

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

hors-série n°2

patrimoine
sylviculture
progrès
connaissances
économie
forêts et société
environnement
biodiversité
gestion durable



Gestion des hêtraies dans les forêts publiques françaises

Hors-série

Rendez-Vous techniques

Directeur de la publication

Jacques Valeix

Rédactrice en chef

Christine Micheneau

Comité éditorial (2005)

Yves Birot, Claude Barbier, Peter Breman, Jean-Marc Brézard, François Chièze, Jean-Luc Dunoyer, Claude Jaillet, Patrice Mengin-Lecreux, Rémy Metz, Pierre-Jean Morel, Frédéric Mortier, Jérôme Piat, François-Xavier Rémy, Bernard Rey, Thierry Sardin, Dominique de Villebonne

Maquette, impression et routage

Imprimerie ONF - Fontainebleau

Conception graphique

NAP (Nature Art Planète)

Crédit photographique

page de couverture

R. Canta, INRA

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 technique, 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 (sauf abonnement 2005, incluant ce hors-série n°2)

Dépôt légal : septembre 2007

Toutes les contributions proposées à la rédaction sont soumises à l'examen d'un comité de lecture choisi chaque fois en fonction du thème abordé.

Citation recommandée

■ du hors-série dans son entier : Office national des forêts. Direction technique, 2007. Gestion des hêtraies dans les forêts publiques françaises. Rendez-vous techniques de l'ONF, hors-série n° 2. 112p.

■ d'une contribution du hors-série : CORDONNIER T., PILARD-LANDEAU B., CHOPARD B., 2007. Sylviculture juvénile du hêtre : compromis entre élagage naturel et croissance radiale. Rendez-vous techniques de l'ONF, hors-série n° 2 « Gestion des hêtraies dans les forêts publiques françaises », pp. 59-65

s o m m a i r e

Hors-série n°2

- 3 — **L**e hêtre : une essence majeure des forêts publiques en France — *par Thierry Sardin, Brigitte Pilard-Landeau et Jean-Marie Michon*
- 9 — **P**anorama du marché du hêtre (2006) — *par Marianne Rubio et Eric Marquette*
- 14 — **L**e hêtre et la biodiversité — *par Nicolas Drapier, Hubert Voiry, Thierry Noblecourt, Pascal Denis, Laurent Tillon*

Évolutions passées et futures du hêtre

- 22 — **L**’histoire du hêtre au Quaternaire : un nouvel éclairage et des enseignements pour l’avenir — *par Brigitte Musch, Alain Valadon et Rémy Petit*
- 29 — **L**e hêtre face aux changements climatiques — *par Guy Landmann, Jean-Luc Dupouey, Louis-Michel Nageleisen, Isabelle Chuine et François Lebourgeois*

Les apports de la recherche à la gestion des hêtraies

- 39 — **C**roissance en hauteur dominante du hêtre dans le Nord de la France – Des courbes de référence qui intègrent les tendances à long terme
Par Jean-Daniel Bontemps, Pierre Duplat, Jean-Christophe Hervé et Jean-François Dhôte
- 48 — **C**omportement du hêtre sous abri : les intérêts d’une bonne gestion du couvert — *par Isabelle Vinkler, François Ningre, Catherine Collet*
- 59 — **S**ylviculture juvénile du hêtre, compromis entre élagage naturel et croissance radiale — *par Thomas Cordonnier, Brigitte Pilard-Landeau et Bruno Chopard*
- 67 — **L**es interventions sylvicoles dans la hêtraie adulte : connaissances sur la croissance en grosseur — *par Eva Simon, Noël Le Goff et Jean-Marc Ottorini*
- 76 — **L**es contraintes de croissance du hêtre : état des connaissances et perspectives — *par Thiéry Constant, Gérard Nepveu et G. Becker*
- 85 — **L**e Cœur rouge est-il détectable sur pied ? — *par Holger Wernsdörfer, Thiéry Constant, Gilles Le Moguedec, Frédéric Mothe, Gérard Nepveu et Ute Seeling*

Sylvicultures du hêtre aujourd’hui

- 92 — **L**ibre propos d’un sylviculteur — *par Edgar Kieffer*
- 94 — **L**e hêtre en Lorraine – Contextes et orientations sylvicoles — *par Jérôme Bock, Dominique Messant, Philippe Durand*
- 97 — **L**es hêtraies de la moitié sud de la France : caractéristiques et grands principes de gestion — *par Thierry Sardin, Ariane Angelier, Xavier Gauquelin, Benoît Jacquemin et Jean-Marc Courdier*
- 100 — **G**uide de la hêtraie Nord-Atlantique – Des éléments clés qui intègrent les spécificités du Nord-Atlantique - *par Brigitte Pilard-Landeau*
- 105 — **L**a place du hêtre en région méditerranéenne — *Par Jean Ladier, Philippe Dreyfus et Daniel Reboul*

Avant-propos

Le hêtre est une essence majeure des forêts publiques en France. De ce fait mais aussi en raison des contraintes économiques qui pèsent sur le marché du hêtre depuis les tempêtes de 1999 et des questions que posent les scénarios annoncés en matière de changement climatique, il nous est apparu opportun de lui consacrer ce hors série des « Rendez-vous techniques ».

La simple observation dans les peuplements forestiers de son comportement écologique et social démontre que le hêtre est sans conteste une de ces espèces dites « dryades » ou « climaciques » qui composent les dernières phases des successions végétales en forêts tempérées. Il a même une forte tendance à se répandre et à supplanter ses concurrents, de par sa vigueur et son couvert sombre !

Il incombe au forestier de bien canaliser, voire maîtriser, ce comportement hégémonique et envahissant. Ce faisant, il favorisera la diversité spécifique des peuplements et améliorera d'autant leur résilience face aux aléas climatiques. Les sylvicultures des hêtraies sont donc très attentives au mélange des essences, en y confortant par exemple la place du chêne sessile dans les stations qui lui sont le plus appropriées, eu égard à la renommée mondiale du chêne français et par précaution vis à vis des impacts des changements climatiques. Mais il s'agira aussi de conserver un attrait particulier aux paysages forestiers, avec ici du hêtre et du sapin, là du hêtre et des feuillus précieux, de tels mélanges présentant en outre le grand avantage de faciliter leur propre régénération naturelle.

Considérant les caractéristiques technologiques du bois de hêtre et son positionnement sur le marché des bois, le forestier cherchera à en valoriser les principaux atouts en visant notamment, dans des billes de pied sans défaut, la production de bois clairs à larges accroissements.

Les sylvicultures préconisées pour la conduite des hêtraies sont donc, sans ambiguïté, des sylvicultures dynamiques. Elles respectent toutefois la phase de compression des très jeunes tiges, étape des plus importantes pour bien les inciter à monter et à s'élaguer naturellement. Ensuite, à l'opposé des futaies cathédrales, l'aspect recherché est bien plutôt celui du taillis sous futaie clair avec des arbres présentant une bille de pied courte mais « propre » et un houppier fonctionnant sans concurrence. Cette architecture permet d'éviter la mortalité des branches basses et l'apparition du cœur rouge, singularité qui déprécie la qualité technologique et commerciale des grumes.

Nous ne prétendons pas proposer ici une monographie générale sur le hêtre, ni reléguer dans l'oubli les autres ouvrages et documents de référence sur cette essence. Plus modestement, ce numéro hors série vise à présenter les connaissances les plus récentes qui sous-tendent les évolutions sylvicoles en cours, ainsi que les orientations les plus importantes pour la gestion des hêtraies.

Le Directeur technique et commercial bois

Jacques VALEIX



Le hêtre : une essence majeure des forêts publiques en France



T. Sardin, ONF

En France, les peuplements dans lesquels le hêtre est l'essence prépondérante dans la strate principale couvrent **1 300 000 ha**, toutes propriétés confondues ; il s'agit de la troisième essence feuillue, après les chênes sessile et pédonculé. C'est une essence dotée d'un fort pouvoir dynamique, mais qui pour cela exige des conditions de bilan hydrique favorable, lui permettant d'être l'essence dominante dans une grande partie de son aire potentielle.

Les précipitations sont sur l'ensemble de l'aire de la hêtraie égales ou supérieures à 600 mm avec pas plus de 2-3 mois secs (c'est-à-dire avec des précipitations inférieures à deux fois la température moyenne) ; le hêtre est absent là où la pluviosité est trop faible (cas de la Hardt en Alsace), ou alors il devient subordonné au chêne sessile.

L'aire de la hêtraie couvre l'étage des collines et des basses montagnes. Dans les régions méridionales, la hêtraie exige des précipitations supérieures, de l'ordre de 1 100 mm (pour compenser une humidité atmosphérique moindre), et ne débute alors qu'à l'étage

montagnard. Dans les massifs montagneux, la hêtraie-chênaie collinéenne fait place à la sapinière-hêtraie dès le montagnard inférieur. Mais des hêtraies pures restent nombreuses sur certains massifs car d'origine anthropique (cf. article sur les hêtraies du Sud, p. 100). Le hêtre subsiste au sommet des montagnes de moyenne altitude (1 200-1 600 m) à l'étage subalpin. Les grands froids hivernaux entraînent toutefois sa disparition dans les Alpes internes.

La hêtraie est présente sur des sols avec une très grande amplitude vis-

à-vis du niveau trophique (des sols très acides aux sols carbonatés) et vis-à-vis des niveaux hydriques (des sols secs à des sols présentant un certain engorgement). Elle disparaît sur les sols très engorgés, au profit des chênaies, ainsi que sur les sols constitués d'éléments grossiers (au profit des érablaies ou des tillaies) et sur les sols superficiels de crêtes (pour plus de détails voir l'article sur la biodiversité, p. 14). Cette très grande tolérance vis-à-vis des conditions du milieu permet à la hêtraie de couvrir de larges surfaces en France.

TOUTES forêts publiques		Forêts domaniales	
Départements	Surface (ha)	Départements	Surface (ha)
Meuse	56 129	Seine Maritime	24 844
Vosges	49 335	Meuse	21 126
Meurthe-et-Moselle	41 179	Moselle	17 387
Haute-Marne	40 494	Meurthe-et-Moselle	16 580
Pyrénées Atlantiques	37 828	Ariège	16 418
Bas-Rhin	35 212	Bas-Rhin	16 194
Doubs	32 730	Haute-Marne	15 895
Moselle	31 958	Vosges	15 234
Ariège	31 767	Oise	14 526
Côte d'Or	31 767	Côte-d'Or	14 378
TOTAL.....	388 399	TOTAL.....	172 582
(% France)	(52 %)	(% France)	(57 %)

Tab. 1 : surface de peuplement à hêtre prépondérant dans la strate principale pour les dix départements les plus couverts (données IFN 2005)

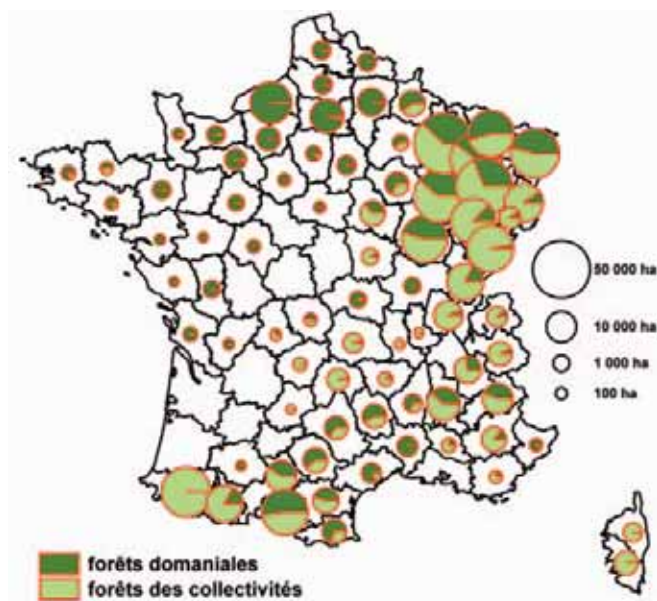


Fig. 1 : surfaces des peuplements à hêtre prépondérant dans la strate principale des forêts publiques

Des surfaces importantes... en augmentation

Alors que la forêt française est en très grande majorité privée (75 %), plus de la moitié des peuplements où le hêtre est prépondérant (746 000 ha, soit 57 %) sont en forêts publiques, ce qui donne à cette espèce un intérêt particulier pour l'ONF. D'autant que cette hêtraie publique est à 40 % domaniale avec 301 000 ha. Cette prédominance des forêts publiques est une particularité, car les autres grandes essences françaises, les chênes et les résineux (pin, sapin, épicéa), sont toujours plus représentés en forêts privées.

La hêtraie publique française est surtout abondante dans le quart nord-est, la chaîne des Pyrénées, le Nord-Ouest et les Alpes (cf. figure 1). Les dix départements où la hêtraie publique

couvre le plus de surface sont pour huit d'entre eux dans le quart nord-est (dont les 4 départements lorrains), les deux autres appartiennent au massif des Pyrénées (cf. tableau 1). Ensemble, ces dix départements représentent plus de la moitié (52 %) de la hêtraie publique française.

La répartition entre forêts domaniales et autres forêts publiques est très irrégulière, et si les dix départements où les hêtraies domaniales sont les plus importants comprennent encore l'ensemble de la Lorraine, deux départements du Nord-Ouest, la Seine Maritime et l'Oise, font leur apparition dans ce classement (cf. tableau 1 et figure 1). Les dix départements les plus couverts en hêtraie domaniale représentent à eux seuls 57 % de la surface totale de la hêtraie domaniale de France qui est de 301 000 ha.

Comme pour l'ensemble des forêts, la surface de la hêtraie progresse (cf. tableau 2). Mais alors qu'entre les deux derniers cycles d'inventaire de l'IFN la surface forestière de production en forêt domaniale a augmenté de +3 %, celle de la hêtraie a progressé de +6 %. Pour les autres forêts publiques, la progression de la hêtraie est conforme à l'augmentation générale de la surface de production pour cette nature de propriété (+5 %).

Ces chiffres ne rendent toutefois pas compte d'évolutions liées aux changements de pratiques sylvicoles en cours. Ainsi, le hêtre regagne probablement une partie des surfaces où il a été sévèrement limité au profit des chênes au sein de son aire potentielle collinéenne. En montagne, sa forte dominance suite aux actions qui ont fait régresser le sapin s'amenuise. Enfin, en région méditerranéenne il s'installe à l'ombre des pinèdes de recolonisation naturelle des terres agricoles (pin sylvestre) ainsi que sous les pinèdes de reboisement RTM (cf. article de Ladier *et al.*, p. 105). Mais ces phénomènes d'extension-régression selon les conditions stationnelles et l'action de l'homme pourraient évoluer rapidement avec les conséquences des changements globaux (cf. article de Landmann *et al.*, p. 29).

Structure des peuplements : dominante de futaie régulière en forêt domaniale et de mélange futaie — taillis en forêt des collectivités

La structure forestière, qui n'est pas nécessairement équivalente au traitement sylvicole, peut être approchée par les données IFN.

Domaine	Continental	Alpes	Pyrénées	Atlantique	Méditerranée	Ensemble
Forêts domaniales	139 000 ha +9 %	16 000 ha +27 %	32 000 ha +3 %	113 000 ha +2 %	*	301 000 ha +6 %
Autres forêts publiques	290 000 ha +6 %	37 000 ha +0 %	78 000 ha +0 %	30 000 ha +11 %	9 600 ha +6 %	445 000 ha +5 %

* surfaces trop réduites

Tab. 2 : évolution des surfaces des peuplements à hêtre prépondérant, par domaine biogéographique et propriété (entre les deux derniers cycles IFN)

Notion de structure forestière au sens de l'IFN

La nomenclature IFN est fondée sur le taux de couvert relatif du taillis et de la futaie, ainsi que sur la régularité de la strate dominante :

Structure forestière	Nomenclature sur le régime	Nomenclature sur la structuration verticale
	Taux de couverture relatif de :	Taux de couverture relatif de :
Futaie « régulière »	Taillis < 25 %	Futaie haute $\geq 2/3$ Hauteur régulière du couvert forestier
Futaie « irrégulière »	Taillis < 25 %	Futaie haute < 2/3 Hauteur régulière du couvert forestier
Mélange futaie et taillis (« Taillis sous futaie »)	Taillis ≥ 25 % et futaie ≥ 25 %	---
Taillis et assimilés	Futaie < 25 %	---

Cependant, la nomenclature IFN pour caractériser la structure forestière est particulière et différente de celle utilisée par l'ONF qui dispose souvent de typologies de peuplements spécifiques à chaque grande formation forestière (cf. encadré).

Tout en sachant que les types de structure forestière ainsi déterminés sur des critères particuliers ne préjugent pas des intentions de gestion, le panorama de la hêtraie publique en fonction de cette structure livre des informations intéressantes (cf. tableau 3).

Environ un tiers des peuplements à hêtre prépondérant présente une structure irrégulière ou à deux strates. Cette proportion est sensiblement plus élevée dans les forêts des collectivités (42 %) par rapport aux forêts domaniales (17 %). Plus des deux

tiers des peuplements ont une structure régulière, principalement en futaie (le taillis de hêtre ne représente seulement que 5 % de la surface totale). En surface, la futaie régulière est répartie à part égale entre la propriété domaniale et les autres forêts publiques. Ces dernières étant plus abondantes, cette structure est proportionnellement plus importante en forêt domaniale (79 %) que dans les autres forêts publiques (53 %).

Cette distribution des structures est toutefois inégale selon les domaines biogéographiques. Ainsi le mélange futaie-taillis est beaucoup plus abondant sur le domaine continental, avec 36 % des surfaces (toutes forêts publiques), que sur le domaine atlantique où il ne représente que 9 % des peuplements. Ajouté au fait que la croissance en hauteur des hêtres, ainsi que sa

réaction aux changements globaux (cf. Bontemps *et al.*, p. 39), se différencie nettement entre ces deux domaines biogéographiques, cela explique la recherche par les gestionnaires des hêtraies du Nord-Est et du Nord-Ouest d'itinéraires techniques spécifiques et adaptées chacun à leurs conditions. Ceci les a conduits à disposer chacun d'un nouveau guide de sylviculture, élaboré de manière autonome mais non indépendante (cf. Bock *et al.* p. 94, et Pilard-Landeau p. 97).

Un capital sur pied relativement élevé dans la hêtraie publique

Remarque : les données de ce paragraphe, et de l'ensemble de l'article, proviennent de l'IFN et ont été extraites de sa base fin 2004. Compte tenu de la méthode d'inventaire appliquée jusqu'en 2004 (un passage environ tous les dix ans), on peut considérer que ces données datent en moyenne de 1998-99. L'impact de la tempête de 1999 est donc peu pris en compte, d'autant qu'aucun département lorrain, là où la hêtraie a été particulièrement touchée, n'a bénéficié d'un inventaire post-tempête.

Le capital sur pied présent dans les forêts publiques peut être approché par la surface terrière moyenne à l'hectare, variable représentée en figure 2. À l'échelle du département, la surface terrière moyenne à l'hectare doit être comparée à la moyenne des surfaces terrières recommandées dans les guides de sylviculture pour tous les stades de développement de la hêtraie. En futaie régulière, la surface terrière est nulle au stade juvénile (tant que les semis n'ont pas atteint 1,30 m de hauteur et si le peuplement adulte a été retiré) et augmente progressivement jusqu'à environ 18-19 m²/ha pour 60 arbres/ha de diamètre 60-65, objectif moyen pour la classe de fertilité II en Lorraine, ou bien jusqu'à 26 m²/ha pour 70 arbres de 70 cm dans le Nord-Ouest. Avec un équilibre des classes d'âge atteint, la sur-

Propriété	Futaie régulière	Futaie irrégulière	Mélange futaie et taillis	Taillis	Total
Forêts Domaniales	238 850 79 %	6 650 2 %	43 900 15 %	11 350 4 %	300 750 100 %
Autres forêts publiques	234 493 53 %	44 743 10 %	141 760 32 %	23 718 5 %	444 714 100 %
Total	473 343 63 %	51 393 7 %	185 660 25 %	35 068 5 %	745 464 100 %

Tab. 3 : surface de peuplement à hêtre prépondérant selon la structure et la propriété

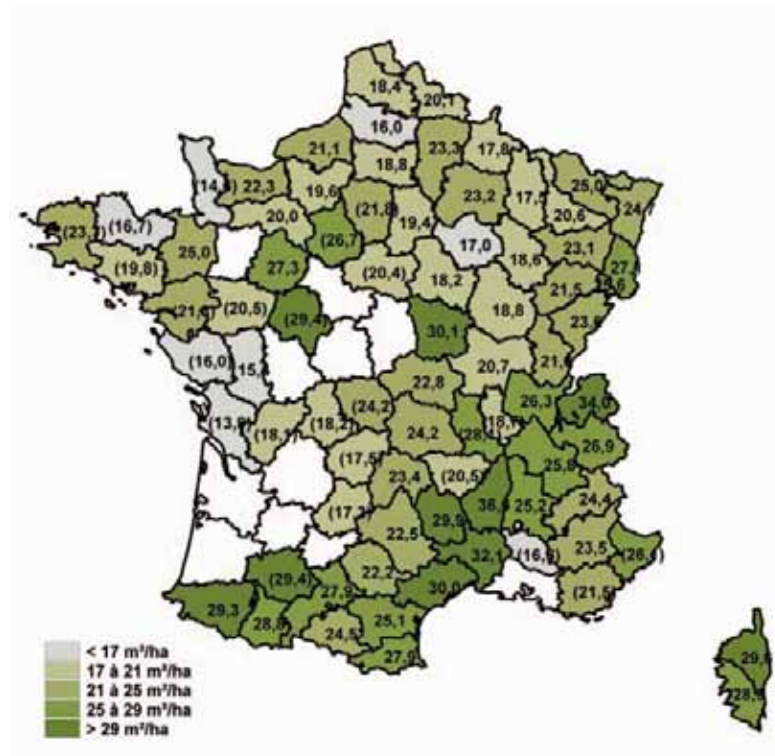


Fig. 2 : surface terrière moyenne par ha des peuplements à hêtre prépondérant dans la strate principale (forêts publiques)

Les valeurs sont entre parenthèses pour les départements dont la surface à hêtre prépondérant est inférieure à 1 500 ha, c'est-à-dire avec une précision plutôt faible.

face terrière moyenne peut être évaluée ainsi à 18-19 m²/ha. En futaie irrégulière, la surface terrière moyenne recherchée est souvent donnée pour devoir varier entre 18 (avant coupe) et 14 m²/ha (après coupe), soit en moyenne 16 m²/ha.

Remarque : ces chiffres ne concernent que les tiges précomptables c'est-à-dire dont le diamètre à 1,30 m est supérieur à 17,5 cm. Ainsi que le prévoient certains guides de sylvicultures, conformément à ce qui est observé sur le terrain, 3-4 m²/ha supplémentaires peuvent provenir des strates basses (taillis et perches).

Au niveau national, la surface terrière moyenne observée par l'IFN

est de 23 m²/ha, c'est-à-dire sensiblement supérieure à ce que l'on serait en droit d'attendre avec des peuplements conduits selon les guides de sylviculture en vigueur et un équilibre des classes d'âges pour ceux traités en futaie régulière. Les plus fortes valeurs s'observent au Sud, pour les départements où les hêtraies sont essentiellement en zone de montagne, donc avec des difficultés d'exploitation.

Cette valeur élevée peut être la conséquence de deux phénomènes, indépendants ou combinés, la surcapitalisation (surface terrière supérieure à ce que les guides de sylviculture recommandent) ou le vieillissement (déséquilibre des

classes d'âge au détriment des jeunes classes).

Pour faire la part de ces deux causes potentielles, surcapitalisation et vieillissement, nous présentons en figure 3 l'âge moyen des hêtraies en futaie régulière par département, la moyenne nationale étant de 97 ans. De manière similaire à ce que nous avons fait pour la surface terrière, nous pouvons déterminer l'âge moyen des peuplements d'un ensemble de forêts conduits en futaie régulière où l'équilibre des classes d'âge serait atteint. En prenant un âge d'exploitabilité de 120 ans (âge retenu pour une fertilité intermédiaire), la moyenne devrait être proche de 65-75 ans. Il ne s'agit en effet pas de l'âge médian, qui est de 60 ans, car dans les peuplements en cours de régénération naturelle, l'IFN prend comme âge du peuplement celui des semenciers encore sur pied. Ainsi, en considérant que la régénération dure 10 ans, avec des semis qui apparaissent dès le début, lorsque les derniers arbres sont abattus ils ont 130 ans et les semis qui les remplacent ont déjà 10 ans. L'âge moyen est alors de 70 ans $([130+10]/2=70)$.

Globalement on peut donc considérer que la hêtraie publique traitée en futaie régulière est vieillie, avec un âge moyen de 97 ans très nettement supérieur à ces 65-75 ans. Ce vieillissement est plus marqué pour les hêtraies du Sud, c'est-à-dire plutôt en montagne (Alpes, Massif Central et Pyrénées). Les difficultés d'exploitation, mais aussi la sylviculture passée (taillis fureté converti par la suite en futaie régulière, pas de sylviculture par absence de desserte, retard dans

Domaine	Continental	Alpes	Pyrénées	Atlantique	Méditerranée	Ensemble
Forêts domaniales	19,7 Mm ³	1,8 Mm ³	5,3 Mm ³	17,7 Mm ³	*	44,7 Mm ³
	-2 %	+20 %	+4 %	-6 %		-2 %
Autres forêts publiques	36,0 Mm ³	3,8 Mm ³	15,7 Mm ³	3,5 Mm ³	1,6 Mm ³	60,7 Mm ³
	+2 %	+6 %	+16 %	+23 %	+7 %	+7 %

Mm³ : millions de m³ - * surfaces trop réduites

Tab. 4 : évolution (entre les deux derniers cycles IFN) des volumes de hêtre dans les peuplements à hêtre prépondérant, par domaine biogéographique et propriété



T. Sardin, ONF

Essai jeune futaie (Vosges).

le renouvellement...) sont là des causes très probables de ce vieillissement plus important (cf. article sur les hêtraies du Sud, p. 100).

Parmi les départements de la moitié nord avec le plus de hêtraie, celui de la Meuse se distingue avec un âge moyen de seulement 58 ans. Il y a là certainement un effet des nombreuses transformations en hêtre des peuplements résineux installés après la première guerre mondiale (« zone rouge »). Pour les départements dont l'âge n'est pas excessif mais où les surfaces terrières moyennes sont élevées, on peut penser que c'est le phénomène de surcapitalisation qui domine.

Le vieillissement de la hêtraie est un phénomène plus prégnant dans les forêts des collectivités où l'âge moyen est de 104 ans contre 91 ans pour les forêts domaniales. Cette observation va dans le sens d'une conversion plus ancienne et donc plus avancée dans les forêts domaniales ainsi qu'une proportion plus importante des forêts des collectivités dans la moitié sud, en zone de montagne plus difficile d'accès.

Le capital sur pied élevé n'est pas une spécificité du hêtre. C'est une observation générale à la plupart des essences, comme le fait que ce capital augmente régulièrement.

Pour juger de l'évolution du capital des peuplements à hêtre prépondérant, nous avons regardé l'évolution des volumes de hêtre entre les deux derniers cycles d'inventaire de l'IFN (cf. tableau 4).

Aux premiers abords, les pourcentages d'évolution par domaine biogéographique et propriété sont très variables (allant de +23 % à - 6 %) sans pouvoir y trouver des tendances. Outre le fait que ces données doivent être analysées en prenant en compte les évolutions en surface (tableau 2), des changements de méthodes du calcul des volumes ont pu intervenir entre les deux cycles. Toutefois, pour les ensembles les plus importants, avec plus de 10 Mm³, on constate un début de décapitalisation pour les forêts domaniales et une augmentation pour les autres forêts publiques, augmentation légère en plaine (continental) plus forte en montagne (Pyrénées).

Cependant, il est important de rappeler que ces chiffres sont issus de mesures prises sur le terrain en par-

tie avant 1999 et qu'ils ne prennent pas en compte les volumes abattus par la tempête de 1999. Pour cette raison et également du fait de la mise en œuvre de sylvicultures plus dynamiques depuis quelques années, la tendance à la décapitalisation s'est certainement accentuée en domanial et amorcée nettement en forêt communale.

Des hêtraies plus ou moins pures, conséquence du tempérament de l'essence et des histoires sylvicoles diversifiées

Les données précédentes de cet article concernent les peuplements où le hêtre est prépondérant dans la strate principale, c'est-à-dire lorsqu'il a le plus fort taux de couvert relatif. Cela inclut des peuplements où il peut être en mélange. Pour le savoir, nous avons extrait des données de l'IFN le taux de pureté du hêtre en surface terrière dans ces peuplements, par domaine biogéographique (cf. tableau 5).

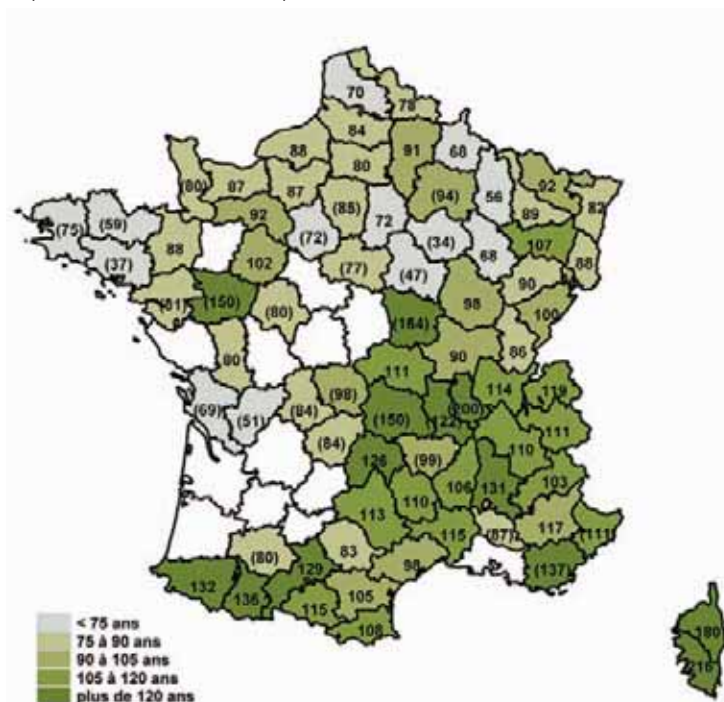


Fig. 3 : âge moyen des futaies régulières à hêtre prépondérant pour l'ensemble des forêts publiques

Les valeurs sont entre parenthèses pour les départements dont la surface en futaie régulière à hêtre prépondérant est inférieure à 1 500 ha, donc avec une précision plutôt faible.

Domaine	Continental	Alpes	Pyrénées	Atlantique	Méditerranée	Ensemble
Forêts domaniales	68 %	68 %	85 %	76 %	*	73 %
Autres forêts publiques	58 %	65 %	87 %	73 %	93 %	67 %

* surfaces trop réduites

Tab. 5 : proportion de la surface terrière en hêtre dans les peuplements à hêtre prépondérant, par domaine biogéographique et propriété

La pureté des peuplements à hêtre prépondérant est équivalente en forêts des collectivités et en forêts domaniales sauf dans le domaine continental où elle diffère de 10 %. Ceci est certainement la conséquence d'une plus forte proportion de peuplements avec une structure proche de l'ancien taillis sous futaie dans les forêts des collectivités de ce domaine biogéographique, traitement qui a largement favorisé les mélanges d'essences.

Le degré de mélange varie par contre sensiblement selon le domaine biogéographique. Ce sont les hêtraies pyrénéennes qui sont les moins mélangées, et à un degré moindre, celles du domaine atlantique. La pureté des hêtraies des deux domaines de la haute montagne, les Alpes et les Pyrénées, diffèrent nettement. Il s'agit là certainement d'une conséquence du passé sylvicole très différent de chacun des deux massifs. Dans les Pyrénées, la conduite en taillis fureté pour la production de bois de chauffage (charbon de bois et bois) était généralisée avant la conversion en futaie régulière, ce traitement éliminant alors le sapin.



T. Sardin, ONF

Dispositif expérimental hêtre en Franche-Comté

Mais le hêtre est également largement présent en mélange dans des peuplements où l'essence prépondérante est autre. Les peuplements « avec présence de hêtre » couvrent ainsi 1 570 000 hectares en forêts publiques, dont 613 000 ha en forêt domaniale, soit plus du double par rapport aux peuplements où le hêtre est simplement prépondérant. Ces peuplements représentent plus du tiers des forêts publiques métropolitaines !

Conclusion

La hêtraie, avec notamment plus de 20 % de la surface de production des forêts domaniales, est une essence importante pour l'ONF, même si aujourd'hui le contexte commercial reste incertain (cf. *Panorama du marché du hêtre*, p. 9). Sa faculté à s'adapter à des sols très variés et son caractère dynamique font qu'elle comprend plusieurs habitats forestiers importants soit pour leur surface soit pour leur intérêt (cf. *Le hêtre et la biodiversité*, p. 14).

La large présence du hêtre sur le territoire national et sa forte sensibilité aux conditions climatiques (cf. article sur la croissance en gros-seur, p. 67) rendent cette essence particulièrement fragile dans le contexte des changements globaux. Son aire potentielle est sujette à une très forte régression potentielle (cf. Landmann *et al.*, p. 29) même si dans certaines conditions elle apparaît en phase d'expansion : reconquête de chênaies collinéennes où elle avait été éliminée par l'homme, expansion dans l'arrière-pays méditerranéen (cf. Ladier *et al.*, p. 105).

Sa présence dans plusieurs contextes bioclimatiques, collinéen

atlantique, collinéen continental et montagnard pour ne citer que les principaux, est associée à des histoires sylvicoles diversifiées qui aujourd'hui se traduisent par la présence de diverses structures de peuplement. La multiplicité de ces situations a conduit à adapter les référentiels sylvicoles (cf. Bock *et al.* p. 94, Pilard-Landeau p. 97, et Sardin *et al.* p. 100). Pour cette essence dont la qualité du bois est liée à une croissance rapide en diamètre (cf. Constant *et al.* p. 76), il est en effet important d'éviter les errements passés qui ont conduit à une surcapitalisation, un vieillissement et une trop grande pureté des peuplements. Si ces phénomènes sont en cours de résorption, ils marquent encore les données récentes dont on dispose pour les hêtraies.

Les réflexions sur les itinéraires techniques ne sont pour autant pas terminées, le marché du bois pouvant nous réserver pour les années à venir quelques surprises avec l'apparition de nouveaux processus de fabrication incluant en tout ou partie du bois de hêtre, évolutions qui pourraient influencer sur nos objectifs de production (cf. *Panorama du marché du hêtre*, p. 9).

Thierry SARDIN

ONF, direction technique
département forêts
thierry.sardin@onf.fr

Brigitte PILARD-LANDEAU

ONF, DT Ile-de-France – Nord-Ouest
service patrimonial territorial
brigitte.pilard-landeau@onf.fr

Jean-Marie MICHON

ONF, direction technique
bases de données techniques
jean-marie.michon@onf.fr

Panorama du marché du hêtre (2006)

Le marché du hêtre connaît depuis quelques années une grave dépression. Après avoir traversé une embellie à la fin des années 90, les entreprises de transformation utilisant cette essence subissent aujourd'hui les conséquences de ce marché en pleine morosité.

La production brute de hêtre en France est en progression régulière et se monte aux environs de 8,3 millions de m³/an (a), en majorité dans des peuplements de futaie. Cependant, la récolte de grumes destinées au sciage, déroulage et tranchage ne cesse de diminuer. Après un pic de récolte en 2000, suite aux tempêtes de décembre de 1999, le volume de hêtre récolté en 2004 dépasse à peine 1,1 million de m³ (b), soit la moitié du volume récolté dans les années 1970. Les forêts publiques gérées par l'ONF apportent sur le marché une part prépondérante du bois de hêtre.

Le volume de sciage de hêtre produit par les scieries françaises est en baisse continue : de 688 000 m³ en moyenne sur la période 1995-1999, il chute à 448 000 m³ en 2004 (b). Les quatre principales régions productrices de sciage de hêtre totalisent à elles seules environ 65 % de la production nationale, il s'agit de la Lorraine (155 000 m³ environ en 2004), la Franche Comté (57 000 m³), la Champagne Ardennes (42 500 m³) et la Picardie (38 500 m³) (c).

Le hêtre avant tempête, une essence recherchée

En 1999, le marché du hêtre est dynamisé par un fort courant d'exportation vers l'Asie et une mode en matière de mobilier orientée sur les bois clairs. Cette essence est alors utilisée massivement en décoration intérieure. Les prix augmentent de façon importante : plus de 65 % de hausse entre 1993 et 1999

pour atteindre 95 €/m³ sur pied en 1999 (moyenne pour du hêtre de diamètre 40 cm et plus relevée aux ventes de l'automne 1999) (d). Les volumes mis en vente sont par ailleurs restés stables, la concurrence sur le marché était d'autant plus forte.

La crise sur les marchés du hêtre

Entre 2000 et 2004, la production nationale de sciage de hêtre est passée de 721 000 m³ à 448 000 m³ (b), soit une baisse de presque 40 %

sans précédent pour cette essence. Le prix moyen du m³ sur pied de hêtre de diamètre 40 cm et plus a chuté à 38 €/m³ en 2004 (d). Les prix obtenus en 2005 à 34 €/m³ sont proches des prix auxquels se vendait cette essence entre 1985 et 1990. Cette crise s'explique par plusieurs phénomènes.

L'impact des tempêtes

L'afflux de matière suite aux tempêtes de 1999 a amené les entreprises françaises à exporter massivement sur l'Asie, qui représentait alors un marché porteur. Parmi les

Sources des chiffres de ce Panorama

- (a) : Inventaire Forestier National 2004
- (b) : Agreste : Enquêtes annuelles de branche
- (c) : Étude prospective et de marché pour les sciages de Hêtre français – Synthèse de l'enquête de terrain – CTBA/DRAF Lorraine – Juin 2006
- (d) : Office National des Forêts, département commercial bois – Ventes d'automne en forêts publiques
- (e) : European Hardwood Conference 03/11/04 – Li Hongfan – China Wood International Inc. Beijing
- (f) : AGRESTE GRAPH AGRI – La Forêt et les Industries du Bois 2006 – MAP
- (g) : Données CEEB
- (h) : AFP Mail : environnement Chimie Construction distribution/20/04/06 – topic@afp.co

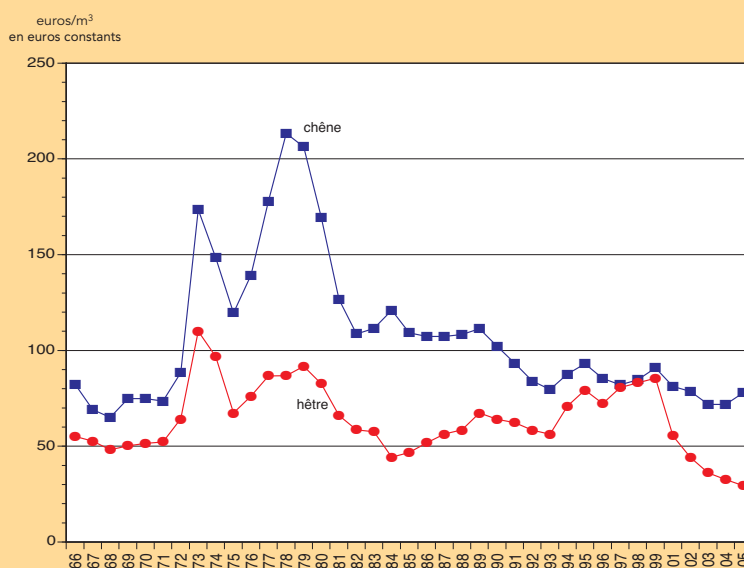


Fig. 1 : évolution des prix moyens du hêtre (en rouge) et du chêne vendus sur pied de 1966 à 2005, en euros constants

grumes envoyées, bon nombre présentaient des défauts de qualité importants. Les transformateurs asiatiques se sont alors détournés de cette essence, au profit par exemple, des bois tropicaux ou du noyer américain. Le hêtre est ensuite passé de mode. La Chine, notamment, a continué de réduire ses importations de grumes pour tomber à 133 000 m³ importés entre janvier et juin 2005, soit une baisse de plus de 10 % par rapport à la même période en 2004 (e). Alors que les feuillus représentaient avant tempête les deux tiers des exportations françaises de bois ronds, les résineux occupent désormais plus de 55 % (f). De même l'Allemagne, premier exportateur de grume de hêtre, se tourne progressivement vers des pays tels que la Suède ou le Danemark pour écouler ses volumes.

L'exportation contrariée par le niveau de l'euro...

En parallèle, les exportations françaises de sciages de hêtre ne cessent de diminuer, fortement handicapées par une parité euro/dollar très défavorable. Elles ont chuté de plus de 37 % entre 2000 et 2004 (c). En 2002, 40 à 50 % des volumes de sciage produits en France étaient exportés dans la zone \$; en 2004, 95 % du volume reste dans la zone euro. Les entreprises chinoises se réorientent vers du sciage en provenance d'Afrique et d'Asie du Sud Ouest. Leurs importations de sciage de hêtre passent de 80 000 m³ en 2004 à 63 000 m³ en 2005 sur la période janvier-juin, soit une baisse de plus de 20 % (e). En dehors de la France, les principaux pays exportateurs de sciage de hêtre que sont l'Allemagne et la Roumanie subissent la même évolution.

...et autres effets de concurrence

Par ailleurs, l'augmentation importante du cours du hêtre à la fin des années 90 a conduit certains industriels à substituer cette essence par d'autres bois (cas du bouleau pour le déroulage), voire par d'autres matériaux (plastique, métal pour les intérieurs de canapés).

Reste à signaler également la forte concurrence menée par les pays de l'Est sur des marchés déjà en perte de vitesse et l'augmentation régulière des coûts de transport (en particulier SNCF liés la fermeture des gares bois) qui ont entraîné peu après les tempêtes de 1999 une chute importante des cours du hêtre et un malaise profond sur les marchés. Les entreprises ciblent de nouveaux débouchés, notamment sur le Maghreb, mais à des prix très bas. Quelques-unes seulement parviennent à conserver des marchés spécialisés mais restent limitées dans leurs capacités de production : déroulage pour la fabrication de bâtons de glace, construction d'escalier avec les bois issus de taillis sous futaie...

Le hêtre : des marchés et des utilisations variées

Le tranchage

Le tranchage permet de valoriser au mieux les plus hautes qualités de grume : 1 m³ de grume permet de réaliser 800 m² de placage. Le principe du bois tranché repose sur l'utilisation du bois pour ses caractéristiques esthétiques. Les feuilles ainsi fabriquées ont une épaisseur comprise entre 0,5 et 0,8 mm d'épaisseur, elles sont utilisées dans l'industrie du meuble et du panneau comme placage. Seuls 5 à 8 % des billes de pied conviennent au tranchage. Le tranchage de hêtre s'est considérablement réduit ces 5 dernières années, sous le coup, notamment, de la concurrence des autres matériaux (mélanine, papier, plastique) et de la délocalisation importante des industries de transformation du bois vers les pays de l'Est

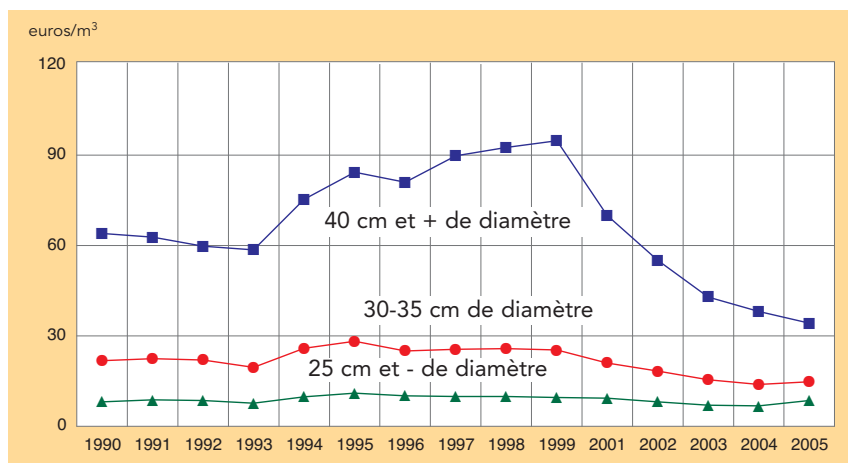


Fig. 2 : évolution des prix moyens de bois façonnés de hêtre par catégorie de diamètre de 1990 à 2005 en euros courants

La dégradation des prix observée sur les bois de diamètre 40 et plus est fortement liée aux qualités mises en marché (forte incidence des tempêtes sur la qualité du bois de cœur).

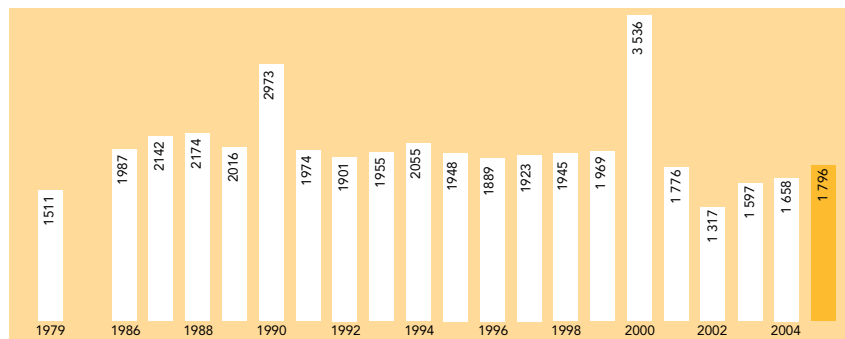


Fig. 3 : évolution des volumes de hêtre mobilisés (= vendus et délivrés) en forêts publiques de 1979 à 2005, en milliers de m³

voire vers l'Asie. Il existe cependant encore, à l'heure actuelle, quelques entreprises françaises et belges qui achètent des grumes pour le tranchage entre 250 et 350 €/m³ bord de route.

Le déroulage

Le déroulage produit des feuilles de placage d'une épaisseur supérieure aux produits issus du tranchage (placage déroulé, épaisseur standard entre 0,6 et 4 mm). Ces placages sont utilisés en tant que base de nombreuses applications industrielles : boiseries pour le mobilier, accessoires de sport (crosse de hockey par exemple), instruments de musique. Le hêtre est utilisé pour ses propriétés esthétiques mais aussi mécaniques. Ces dernières années, la forte concurrence exercée par le placage de bouleau sibérien conjuguée à la crise sur les marchés du hêtre a largement mis à mal les entreprises françaises de déroulage. Celles-ci ont fortement réduit leur approvisionnement, et les prix ne se situent plus qu'autour de 70 à 150 €/m³ bord de route suivant la qualité, pour des gros bois. À noter que les petits bois et les bois moyens peuvent aussi être déroulés, notamment pour la fabrication des bâtons de glace.

Le sciage

Les produits issus des scieries de hêtre sont variés : avivés, plateaux dépareillés, carrelots, plots, pré-débuts sur liste... Une majorité d'entreprises proposent, pour ces produits, une opération supplémentaire : séchage artificiel, étuvage, traitement à la chaleur, rabotage. Le hêtre est utilisé pour ses propriétés mécaniques et ses qualités d'usinage et d'imprégnabilité. Par contre, lui sont reprochés son manque de durabilité naturelle, sa nervosité, son manque de stabilité et sa coloration rouge.

Le secteur des sciages feuillus s'est modernisé et a réalisé des gains de productivité importants ces dernières années, il a subi un mouvement fort

interview

M. Vacheyrou,

Directeur Général du groupe Hesse France regroupant 4 entreprises :
Brugère, Reynier, Cardinaut et PMF.

Leader au niveau international pour le déroulage de hêtre

Brugère : Activité d'exploitation forestière,
de déroulage et de panneau contreplaqué.

Capacité de production : 50000 m³/an

Données 2004 : 130 personnes, 9 M € de CA

Comment se porte le marché du contreplaqué aujourd'hui ?

« Le contexte sur le marché du contreplaqué est globalement favorable depuis quelques années : la demande est en croissance. Cependant la concurrence exercée par les bois exotiques et le bouleau sibérien est très forte. Nos marchés se situent presque exclusivement hors France, nos clients sont les industries du meuble. Le bouleau sibérien représente une source de matière première de taille importante, les propriétés mécaniques du contreplaqué de bouleau sont par ailleurs très proches de celles du hêtre. Pour conquérir des nouveaux marchés, nous mettons en valeur, au sein de l'entreprise Brugère, la qualité des produits fabriqués. »

Qu'en est-il du marché du placage ?

« Le marché du placage ne se porte pas très bien : il est en régression de plus de 2 % par an. Le prix du placage de hêtre a diminué de 35 % depuis 2001. La concurrence exercée par les autres matériaux tire les prix vers le bas. La majorité de la production est réalisée par 3 à 4 entreprises de déroulage situées en Europe occidentale. Le faible coût de la main-d'œuvre dans les pays de l'Est ne joue bien sûr pas en notre faveur. »

Comment gérez-vous votre approvisionnement ?

« Nous nous approvisionnons principalement sur la région Champagne Ardennes et, dans une moindre mesure en Allemagne et dans l'Ouest de la France. Nous cherchons à acheter de plus en plus des bois triés, avec un approvisionnement régulier dans le temps. Nous avons besoin d'avoir plus de visibilité sur les disponibilités de la ressource. »

de concentration. Les entreprises sont en effet contraintes de s'adapter à la mondialisation des échanges. La concurrence est forte, en particulier du côté des pays de l'Est mais aussi du fait de l'Allemagne, où la société Pollmeier, premier producteur de sciages de hêtre, produit à elle seule plus de 700 000 m³ de sciages par an avec ses deux unités.

Les principaux indicateurs économiques sont à la baisse. Le prix du m³ de sciage de hêtre peine à dépasser les 320 € en 2005, il était de 380 € en 2000 (en euros courants) (g). Le secteur du meuble, qui était jusqu'à présent le débouché privilégié du sciage de hêtre, se voit petit

à petit remplacer par le secteur de l'emballage. Le secteur de l'ameublement est en effet, à l'heure actuelle, très morose, bien que le marché intérieur soit en progression. La distribution, très concentrée, exerce une forte pression sur les marques de fabricants et donne la priorité aux meubles importés.

Pour conclure, la demande intérieure en sciages de hêtre reste encore trop faible pour permettre un retour à des niveaux satisfaisants des carnets de commande, d'autant que les prix des produits finis ne permettent pas d'espérer une amélioration rapide des marges. Cependant, la concurrence des pays

interview

M. Lefèvre,
Groupe Lefèvre regroupant 3 scieries situées en Picardie,
Haute Normandie et Roumanie.
Volume de sciage (données 2005) :
100 000 m³/an
CA consolidé (données 2005) : 35 M €
Effectif : 450 personnes



Groupe Lefèvre

Comment expliquez-vous la crise sur le marché du hêtre ?

« Suite aux tempêtes de 1999, la qualité des produits envoyés en Chine a considérablement baissé dû à l'exportation de grumes. Les marchés sur l'Asie se sont fermés en mai 2002, au profit du bois exotique, du noyer américain, du PVC, de l'aluminium... Par ailleurs le hêtre était devenu tellement cher à la fin des années 90 que de nombreux clients se sont réorientés vers d'autres matériaux, par exemple les fabricants de canapés. Il est difficile aujourd'hui de provoquer le mouvement de substitution inverse, même si les cours du hêtre sont fortement descendus. »

Pourquoi vous êtes-vous installé en Roumanie ?

« Lors de mes démarches de recherche d'implantation dans un pays de l'Est en 1996, la Roumanie a retenu toute mon attention après avoir visité la République tchèque, l'Albanie, la Yougoslavie et la Russie (Caucase). Pourquoi ? Des disponibilités importantes de matière première à des prix à l'époque trois fois inférieurs à ceux pratiqués en France. Mais je tiens à le souligner en priorité, l'assurance d'obtenir des approvisionnements à un certain niveau de prix alors qu'en France, toujours à cette époque, un seul exploitant forestier, s'il avait conclu un contrat avec l'étranger, pouvait faire exploser les cours d'achat, ce que j'ai vécu pendant la décennie 1990-2000 lors des adjudications d'automne.

Bien entendu les frais de personnel étaient et sont toujours infiniment inférieurs aux coûts français mais il en est de même dans autres pays cités ci-dessus. »

Comment voyez-vous l'avenir pour les scieries de hêtre en France ?

« Après plus de 5 ans de marasme, beaucoup de scieries de hêtre ont dû fermer ou se réorienter vers d'autres essences. Des marchés se sont ouverts sur le Maghreb, mais à des prix très loin de ceux de 1999. Le hêtre est pour l'instant passé de mode, mais ce n'est qu'une question de temps. La situation cette année est un peu meilleure que l'année précédente, les commandes reprennent petit à petit, même si les prix restent bas. »

de l'Est devrait s'atténuer progressivement, le marché chinois ayant drainé une part importante de l'offre. Autre acteur majeur sur lequel il faudra compter dans les années à venir, l'Inde, qui représente un marché considérable. Compte tenu de leurs besoins respectifs en matériaux bois, cette situation devrait se poursuivre et permettre un relâchement de la tension sur le marché européen.

Des pistes de développement

Les contrats d'approvisionnement
L'ONF s'est lancé dans une dynamique de contrats d'approvisionnement. La mise en place de ces contrats permet aux entreprises de transformation du bois de sécuriser leur approvisionnement et donc de se concentrer sur l'aval de la production et la commercialisation des

produits transformés. Cette démarche de contractualisation doit se faire dans une perspective gagnant/gagnant. Le principe du contrat permet en effet de diminuer les coûts d'approche de la matière et de sécuriser les investissements de l'entreprise. Pour cela, le prix du bois est supérieur dans un contrat d'approvisionnement à la moyenne constatée lors des ventes publiques.

De nouveaux process

Les résultats de la recherche sont également encourageants. Le fabricant d'huissierie Lapeyre a annoncé en avril 2006 avoir mis en place un procédé issu de la « chimie verte » conférant au bois utilisé en extérieur une résistance à l'humidité, aux champignons et aux insectes se rapprochant de celle du PVC (h). En France, le bois a été supplanté très

largement par le PVC pour la fabrication des portes, fenêtres et volets, du fait de la lourdeur de l'entretien. Ce nouveau procédé permettrait ainsi de valoriser des essences locales telles que le hêtre, peu durable en extérieur à l'état naturel.

L'écocertification

Enfin, le hêtre (comme tous les matériaux bois) est renouvelable et issu de forêts gérées durablement. L'ensemble des forêts domaniales et plus de la moitié des forêts des collectivités gérées par l'ONF disposent aujourd'hui de la certification PEFC. Cet engagement environnemental est à faire valoir auprès du consommateur final. Certains acteurs majeurs de la grande distribution, tel que Carrefour par exemple, renoncent désormais à la commercialisation de bois non écocertifiés.

Conclusion et orientations pour la gestion

Le cours du hêtre sur pied a atteint, en 1999, des valeurs proches de celles du chêne, pour subir, par la suite, une chute brutale et sans précédent. Cette essence est désormais considérée comme un produit industriel courant. La crise sur le marché du hêtre ne doit cependant pas nous faire oublier l'importance de conduire les peuplements de façon dynamique, en adéquation avec les potentialités de l'essence et les besoins actuels ou nouveaux des utilisateurs.

En effet, les industries de transformation du hêtre européennes sont à la recherche d'approvisionnement durable, en terme de quantité et qualité, même si les marchés tels qu'ils existent aujourd'hui sont moins rémunérateurs qu'il y a quelques années.

La mise en œuvre d'une sylviculture dynamique dans le hêtre permet :

- d'atteindre l'objectif de production de gros bois de qualité (bois blancs, peu nerveux), sachant que ce sont précisément ces produits qui résistent le mieux en période de crise ;
- de mobiliser en éclaircie des produits de qualité moyenne à médiocre (palette, trituration, chauffage et bois-énergie) pour lesquels il existe des marchés où règne actuellement une forte concurrence ;
- de valoriser dans la mesure du possible les bois susceptibles de petit déroulage.

Cette crise sur le marché du hêtre, qui tend à se résorber, illustre bien l'intérêt pour l'ONF de mener le hêtre de façon dynamique afin d'éviter de surcapitaliser les forêts gérées et de produire des bois en adéquation avec les marchés.

Marianne Rubio

ONF, DT Ile-de-France - Nord-Ouest
service commercial bois

Eric MARQUETTE

ONF, direction technique département commercial bois

interview

M. Guilbert

Association French Timber

Quels sont les principaux atouts du hêtre par rapport aux autres essences ?

« La couleur claire, le faible prix de la matière première, la grande disponibilité et régularité de la ressource et la facilité avec laquelle ce bois se travaille sont les principales qualités de cette essence. Le hêtre est devenu aujourd'hui un produit industriel. »

Quels sont aujourd'hui les marchés pour les sciages de hêtre ?

« Les pays du Maghreb représentent à l'heure actuelle un marché important, principalement pour les sciages de qualité moyenne (bois rouges). Des marchés de niche existent toujours en Europe : fabrication d'escalier, de meuble... Depuis quelques mois ces entreprises se tournent à nouveau vers le hêtre du fait des difficultés d'approvisionnement en bois exotiques. Les marchés à l'export sur la Chine sont alimentés presque en intégralité par les scieries allemandes et roumaines. »

Comment voyez-vous l'évolution à court et moyen terme pour les entreprises de transformation françaises qui travaillent cette essence ?

- « On peut distinguer 3 stratégies différentes :
- Certaines entreprises vont chercher à réaliser plus de valeur ajoutée : panneau contre collé, lamellé collé... »
 - D'autres vont cibler la productivité et développer le côté industriel pour produire des quantités importantes à un prix maîtrisé.
 - D'autres entreprises vont utiliser le hêtre, et en particulier les premières éclaircies, pour produire du combustible afin d'alimenter la filière bois énergie. »

Le hêtre et la biodiversité

Cet article « patchwork » a pour objet de présenter les divers éléments de la biodiversité – habitats et espèces – liés au hêtre, en tant qu'essence, et aux peuplements qu'il constitue.

Les mesures de prise en compte de la biodiversité dans la gestion courante en vigueur à l'ONF depuis 1993, et qui seront reprises et complétées dans l'instruction et le guide en préparation sur ce thème (dans le cas du hêtre, îlots de vieillissement et conservation de vieux arbres, d'arbres morts ou à cavités, de bois mort sous différentes formes) peuvent généralement suffire à conserver la richesse faunistique, floristique et fongique liée à cette essence où à l'ambiance si particulière de la hêtraie.

En complément, la mise en œuvre de mesures de gestion adaptées (calendrier des travaux, conservation de zones de peuplements denses au profit d'espèces sciaphiles comme les fougères, certaines mousses, ou le pouillot sifflleur) et la création, dans des cas limités, de réserves biologiques dirigées, permettent de conserver les espèces les plus remarquables.

Enfin, la mise en place d'un réseau de réserves intégrales, couvrant l'ensemble des habitats de hêtraie y compris ceux situés en limite d'aire, apportera des informations d'un grand intérêt sur l'évolution de ces milieux face aux changements climatiques.

Les habitats de hêtraies

Signalons en préambule que, tout au long de cet article, le terme de « hêtraie » sera employé dans un sens générique et fera référence à des types plus ou moins mélangés, avec principalement du chêne à l'étage collinéen, du sapin et de l'épicéa au montagnard. De fait, selon les cas, la gestion passée aura souvent tiré ces « hêtraies » vers des *sylofaciès* dominés par d'autres essences (chênaie sessiliflore, sapinière vosgienne). Chez les forestiers,

les réflexions et publications sur les « hêtraies à hêtre » ou sans hêtre, et sur le caractère naturel ou anthropique de l'absence du hêtre dans certains milieux, avaient déjà cours dans les années 1950...

Les habitats de hêtraies (depuis les hêtraies-chênaies de l'étage collinéen jusqu'aux hêtraies-sapinières du montagnard, et au delà) ont une aire de répartition aussi vaste que l'aire naturelle du hêtre. Partout où celui-ci trouve des conditions assez favorables pour que s'exprime son tempérament de dryade*, les hêtraies sont les habitats forestiers climaciques par excellence.

Dans un si vaste territoire, grande est la diversité des hêtraies, à la mesure des variations climatiques, édaphiques et floristiques. C'est ce que nous allons passer en revue, en prenant comme entrée principale la codification européenne *Corine biotopes* (CB). Pour les types d'habitats d'intérêt communautaire, nous figurerons en plus les codes de la directive habitats (DH). Pour tous, nous indiquerons aussi les équivalences

phytosociologiques, telles que précisées par le récent *Prodrome des végétations de la France* (voir tableau 1).

Les hêtraies acidiphiles médioeuropéennes (CB 41.11, DH 9110) et atlantiques (CB 41.12, DH 9120)

Elles caractérisent respectivement le domaine biogéographique médioeuropéen (ou continental) et le domaine atlantique. Naturellement pauvres en espèces, elles sont de composition floristique très semblable. La luzule blanchâtre (*Luzula luzuloides*) est l'espèce médioeuropéenne caractéristique du 41.11, tandis que le développement de faciès à houx très denses est typique du 41.12 (sans en être exclusif).

Les deux types comportent des variantes collinéennes et montagnardes (hêtraies à luzule blanc de neige, à saxifrage hirsute... pour le 41.12). À l'étage collinéen, les variantes les plus sèches (à cause du climat ou de sols extrêmement superficiels) font la transition avec des chênaies sessiliflores climaciques ; sur des sols à engorgement temporaire (variante à molinie), le hêtre « s'accroche » même si ses potentialités sont médiocres, et il faut de très fortes contraintes pour qu'il cède la place au chêne sessile, si le régime hydrique est très contrasté, ou au pédonculé. Frugal aussi pour sa nutrition minérale, le hêtre supporte des sols très acides, y compris certains podzols : à l'étage montagnard, il faut des conditions d'acidité extrême (plus ou moins combinées aux rigueurs climatiques) pour que les hêtraies-sapinières cèdent progressivement la place aux sapinières-pessières de la classe des *Vaccinio-Piceetea*.

Les hêtraies neutrophiles (sensu lato) de la moitié nord de la France (CB 41.13, DH 9130) et du sud-ouest (CB 41.14, non DH)

Fondamentalement plus riches floristiquement que les précédentes,

Quelques définitions*

- **Dryade** : espèce sciaphile (exigeant ou tolérant un faible éclaircissement) qui a une longue durée de vie.
- **Mégaphorbiaie** : groupement herbacé luxuriant des vallées alluviales (en plaine) ou plus largement répandus en montagne, dominés non pas par des graminées ou cypéracées mais par des dicotylédones (reine des prés, adénostyle, aconit...) et certaines fougères.
- **Multicaule** : se dit d'individus à tiges multiples, de façon naturelle ou du fait d'un traitement en taillis.
- **Vicariant** : se dit d'un habitat écologiquement voisin d'un autre mais le remplaçant dans une région particulière, les deux habitats présentant des différences floristiques suffisantes pour qu'ils soient distingués dans la classification.

Habitats et stations

Vulgarisée par la directive européenne *Habitats, faune, flore* 92/43 du 21 mai 1992, la notion d'*habitat* est moins familière aux forestiers que celle de *station*. Un habitat est caractérisé par un ensemble de facteurs physiques (climat, sol...) et par un cortège d'espèces associées. On le voit donc, les deux notions sont équivalentes, et les types de stations de nos catalogues (une richesse documentaire propre aux milieux forestiers) se prêtent souvent très bien à une « traduction » en types d'habitats.

Pour le forestier, le maniement de la notion d'habitat présente plusieurs intérêts : à partir de documents à couverture nationale comme les *Cahiers d'habitats* ou les classeurs *Gestion forestière et diversité biologique*, les typologies d'habitats permettent de pallier de façon valable l'absence de catalogues dans certaines régions naturelles. D'autre part, qui dit habitats dit directive habitats... et implique la responsabilité particulière de l'ONF en tant que gestionnaire de surfaces considérables d'habitats d'intérêt communautaire, et comme principal opérateur de documents d'objectifs Natura 2000. Les enjeux sont donc de taille, ils sont d'ailleurs pour beaucoup dans la réunion des compétences internes au sein du nouveau réseau naturaliste national « habitats et flore ».

Abondante pour les habitats d'intérêt communautaire, la documentation (voir bibliographie) l'est beaucoup moins (plus dispersée et moins accessible) pour les autres habitats. Le *Prodrome*, exclusivement phytosociologique, a l'avantage de couvrir la totalité des groupements de végétation français, mais sans descendre jusqu'au niveau des associations. La prochaine réédition des guides *Gestion forestière et diversité biologique* comportera des clés d'identifications exhaustives pour les habitats forestiers, couvrant toutes les associations françaises (qu'elles soient ou non concernées par la directive).

On n'oubliera pas les catalogues de stations : les plus récents prennent généralement en considération les codifications Corine biotopes et Natura 2000 ; quant aux anciens, datant souvent d'une époque où le terme même d'*habitat* n'était pas encore apparu... ils comportent souvent des renseignements phytosociologiques qui peuvent (avec plus ou moins de difficultés) servir de « passerelle » vers les codifications récentes.

Les hêtraies et la directive habitats

Les habitats « de la directive » rentrent dans deux grandes catégories :

- des habitats remarquables (rares/à aire naturelle réduite/voire en voie de disparition) dits habitats « prioritaires » ;
 - des habitats plus ou moins communs, mais retenus car typiques d'une des grandes régions biogéographiques européennes dits habitats « d'intérêt communautaire ».
- De cette dichotomie sont nées bien des incompréhensions de gestionnaires, aux premiers temps de l'application de la directive habitats, face à l'apparente banalité d'habitats retenus par les instances européennes.

Largement répandues, les hêtraies sont, dans l'ensemble, typiques de la seconde catégorie. C'est surtout à un niveau régional que certaines hêtraies, en limite d'aire du hêtre ou d'un cortège particulier d'espèces associées, peuvent présenter un caractère remarquable.

Plus énigmatique reste le fait que certains types de hêtraies (41.14, 41.17) n'aient pas été retenus comme d'intérêt communautaire. Cela fait partie des mystères de la directive...

elles présentent une très grande diversité : liée à l'étagement de végétation, encore et toujours, mais surtout à des substrats très variés engendrant des variantes allant de mésoacidiphiles (transition avec les types précédents) à calcicoles (transition avec le 41.16, voir plus loin). Pour le 41.13, on trouve au collinéen des associations à asperule, à jacinthe (typiquement atlantique), à pâturin de Chaix (médioeuropéenne)... et, au montagnard, des associations à orge d'Europe, à fétuque des bois, à mercuriale, à dentaire...

Les hêtraies du 41.13 concernent approximativement la moitié nord de la France (domaine atlantique aussi bien que continental). Les hêtraies du 41.14 sont limitées au sud-ouest du pays, des Pyrénées à



Fig. 1 : le cadre biogéographique régissant la distribution des habitats (d'après Rameau et al., 2000)

NB : appuyée sur les limites des régions écologiques forestières de l'IFN, cette carte diffère sensiblement de la carte « officielle » du réseau Natura 2000

une bonne partie du Massif Central (hêtraies à hellébore vert, à scille lis-jacinthe...), avec en plaine des variantes qui montent jusqu'au sud du Bassin Parisien (hêtraies à garance, à flore plus thermophile que véritablement xérophile, mais assez proches du type suivant). Ces hêtraies du 41.14, ne sont pas prises en compte par la directive habitats, mais elles ont un intérêt patrimonial qui n'est pourtant pas moindre que celui des autres types de hêtraies.

Les hêtraies calcicoles « sèches » (CB 41.16, DH 9150)

Au-delà du pôle calcicole mais encore mésophile ou xérocline du type précédent, ce type d'habitat est caractérisé par une flore réellement mésoxérophile¹ : hêtraies à séslerie, à laïche blanche, à grémil... Elles-mêmes sont prolongées, en situation de xéricité croissante, par les chênaies pubescentes ou certaines chênaies sessiliflores, ou par divers types de pineraies en montagne.

Ces hêtraies étant caractérisées par la sécheresse du milieu, ceci va souvent de pair, en régions de plaine à climat tempéré (Bassin Parisien...) avec une situation chaude de haut de pente exposée au sud. Mais diverses situations de sol très superficiel ou de climat aride peuvent aboutir au même résultat. Aussi ne sera-t-on pas surpris que le 41.16 comporte des hêtraies-sapinières montagnardes (y compris sur des ubacs), pourvu que la xéricité soit au rendez-vous d'une manière ou d'une autre.

Les hêtraies subalpines (CB 41.15, DH 9140)

Des 41.11/12 aux 41.13/14 puis 41.16, les différents types de hêtraies se succèdent le long d'un gradient de nutrition minérale ou hydrique. Les hêtraies de l'étage subalpin inférieur (ou montagnard supérieur, selon les auteurs) en diffèrent par un déterminisme altitudinal. Rien ne s'oppose donc à ce qu'elles présentent en revanche

La flore des hêtraies

Habitats forestiers (moins riches que les milieux ouverts) et à couvert souvent dense, les hêtraies ont leur lot d'espèces forestières typiques mais se distinguent rarement par une flore remarquable. Les espèces rares associées aux hêtraies sont soit des semi-héliophiles associées à des peuplements relativement ouverts (*Cypripedium calceolus* ou sabot-de-vénus dans les hêtraies sèches), soit au contraire des espèces particulièrement tolérantes à l'ombre (*Epipogon aphyllum*, *Epipactis microphylla*, *Polystichum braunii*...), soit encore des bryophytes profitant de micro-habitats de la hêtraie (*Dicranum viride*, *Buxbaumia viridis*...).

une grande diversité trophique, depuis des types acidiphiles jusqu'à des types franchement neutrophiles (la variante hygrocline à flore de mégaphorbiaie* étant la plus typique).

Corine Biotopes CB	Directive habitats DH	Alliance	sous-alliance
41.11	9110	collinéen : <i>Quercion roboris</i> (= <i>Quercion robori-petraeae</i>)* montagnard : <i>Luzulo luzuloidis-Fagion</i>	<i>Quercenion robori petraeae</i> <i>Luzulo luzuloidis-Fagenion</i> et <i>Galio rotundifolli-Abietenion</i> **
41.12	9120	collinéen : <i>Quercion roboris</i> montagnard : <i>Luzulo luzuloidis-Fagion</i>	<i>Illici aquifolli-Quercenion petraeae</i> <i>Illici-Fagenion</i> et <i>Galio rotundifolli-Abietenion</i> **
41.13	9130	collinéen : <i>Carpinion betuli</i> (= <i>Quercio-Fagion</i>)* montagnard : <i>Fagion sylvaticae</i>	- <i>Eu-Fagenion</i> (= <i>Galio odorati-Fagenion</i>)
41.14	Non DH	collinéen : <i>Carpinion betuli</i> montagnard : <i>Fagion sylvaticae</i>	- <i>Scilio lilio-hyacynthi-Fagenion</i>
41.15	9140	<i>Acerion pseudoplatani</i> (= <i>Aceri-Fagenion</i>)*	-
41.16	9150	<i>Cephalanthero-Fagion</i>	-
41.17	Non DH	neutrophile : <i>Fagion sylvaticae</i> acidiphile : <i>Luzulo luzuloidis-Fagion</i>	<i>Geranio nodosi-Fagenion</i> <i>Galio rotundifolli-Fagenion</i> et <i>Galio rotundifolli-Abietenion</i> **

* entre parenthèses, pour mémoire, synonymes invalides mais utilisés dans des publications récentes

** dans les régions du 41.11 comme du 41.12 et du 41.17, le *Galio rotundifolli-Abietenion* est une sous-alliance qui marque la transition avec les forêts résineuses hyperacidiphiles de la classe des *Vaccinio-Piceetea* ; la distinction de cette sous-alliance, par rapport aux à cette classe et aux sous-alliances du *Luzulo luzuloidis-Fagenion*, de l'*Illici-Fagenion* et du *Galio rotundifolli-Fagenion*, est malaisée.

Tab. 1 : correspondances phytosociologiques

¹ Voir les groupes écologiques d'espèces dans le livret introductif du classeur Gestion forestière et diversité biologique ou en annexe de la Flore forestière française.

Les hêtraies du sud-est (CB 41.17, non DH)

Code Corine « fourre-tout », réunissant des hêtraies ayant en commun leur localisation géographique (Alpes du Sud, Cévennes, Corse...) mais allant de types acidiphiles à mésoxé-rocalcicoles. D'ailleurs, si ce grand type d'habitat n'est pas concerné par la directive habitats, certaines variantes sont « récupérables » comme habitats d'intérêt communautaire en jouant sur leur double rattachement au 41.17 et au 41.12 ou 41.16.

Deux types sont réellement propres à la région : les hêtraies neutrophiles vicariantes* des 41.13/14 (hêtraies à calament, à géranium nouveaux...) et les hêtraies acidiphiles orientales (vicariantes des 41.11/12) propres aux Alpes maritimes et à la Corse (hêtraies à luzule du Piémont...).

Hêtraies et réserves

Habitats forestiers, de surcroît climatiques donc fondamentalement « autonomes », les hêtraies ne justifient pas d'une gestion conservatoire

spécifique au-delà des règles ordinaires de prise en compte de la biodiversité. Elles n'ont donc guère vocation à figurer dans des réserves biologiques dirigées (RBD), sauf cas particuliers de gestion du milieu au profit d'une espèce remarquable, y compris le cas très particulier des hêtres tortillards de la RBD des Faux de Verzy. Les hêtraies ont beaucoup plus leur place au sein de réserves intégrales, pour l'observation de leur devenir sur le long terme, notamment face aux changements climatiques.

Ainsi, la plupart des grands types de hêtraies et leurs principales variantes, y compris celles situées en limite d'aire, sont d'ores et déjà bien représentés (ou en passe de l'être) dans le réseau national de RBI : 41.11 (exemple : Ingwiller [67]), 41.12 (Fontainebleau [77], Tronçais [03]), 41.13 (Brotonne [76], Haye [54], Bellevaux [73]), 41.15 (Gérardmer [88]), 41.16 (Gap-Chaudun [05], Sommedieu [55]), 41.17 (La Brèche [48], Sainte-Baume [83]). D'autres sites bénéficient d'un classement en Réserve naturelle, en particulier la

fameuse hêtraie de la Massane [66] et la hêtraie-sapinière du Ventron [88-68].

Prise en compte de la fonge de la hêtraie dans la gestion

Quand on évoque la fonge du hêtre, on peut penser en premier au chancre ou à la maladie de l'écorce dus aux champignons du genre *Nectria*. Il s'agit des deux exemples les plus connus de champignons parasites pour lesquels les différents ouvrages ou guides sur le hêtre sont bien documentés. On considère à présent qu'il est vain de vouloir éradiquer ces maladies en enlevant les hêtres chancreux : en effet, on a pu observer la disparition spontanée de ces chancres et l'on pense actuellement qu'ils sont liés à l'état physiologique des arbres.

Plus préoccupant est le développement de la maladie de l'encre due à des champignons du genre *Phytophthora*, parasites de faiblesse qui apparaissent notamment sur des hêtres qui ont subi un tassement de sol.



Hêtraie acidiphile atlantique, RBI de Fontainebleau

A. M. Granet, ONF



Creolophus cirrhatus

La diversité fongique de la hêtraie est évidemment beaucoup plus vaste que ces espèces parasites. On peut schématiquement distinguer les champignons de la litière et les champignons des arbres et du bois.

Les champignons de litière et du sol

Parmi les espèces de litière et du sol, les mycorhiziens sont liés aux racines tandis que les saprophytes décomposent la litière. Citons comme exemples de symbiotes spécifiques, donc uniquement liés au hêtre, *Lactarius subdulcis* ou *Russula fellea* mais ce sont des exceptions : les autres espèces symbiotiques appartiennent aux genres lactaire, russule mais aussi bolet, cortinaire, inocybe, amanite, et à d'autres genres plus discrets et ne sont pas spécifiques. D'autres essences que le hêtre comme les bouleaux, noisetiers, charmes, tilleuls ou d'autres essences principales comme le sapin, le chêne ou l'épicéa ont leurs propres symbiotes ou peuvent partager les mêmes champignons associés. La diversité des essences tend donc à favoriser la diversité des mycorhiziens. Certaines essences jouent aussi le rôle d'hôte relais et peuvent abriter une espèce mycorhizienne commune avec le hêtre, d'où l'intérêt du couvert du bouleau par exemple dans les stades de recolonisation, ou du sous-étage d'essences variées en futaie régulière.

Des études physiologiques sur les ectomycorhizes montrent que la diversité fongique est caractérisée par un partage des tâches et par la

notion d'espèces remplaçantes ou complémentaires. Cette diversité fonctionnelle est décisive pour la capacité d'adaptation du peuplement aux contraintes environnementales. En futaie régulière de hêtre, il a été montré que de fortes éclaircies augmentaient justement cette diversité de mycorhiziens.

Les espèces saprophytes qui décomposent la litière appartiennent aux genres clitocybe, marasme, mycène, etc. Leur développement est lié à l'importance des litières et à l'interaction avec les autres micro-organismes.

Les champignons des arbres et du bois

C'est un fait bien connu que le bois de hêtre peut être facilement dégradé par de nombreux champignons lignivores : polypores comme l'amadouvier ou champignons à lames comme les pleurotes ou les armillaires. En d'autres termes, on peut dire que le hêtre abrite un cortège important de champignons saproxyliques.

La situation est particulièrement favorable dans les réserves intégrales de hêtraie où l'on observe de nombreuses espèces saproxyliques dont certaines très rares ne fructifient que dans ces conditions. Cette diversité est favorisée par l'apport régulier de bois mort offrant des stades de décomposition avancée et par des bois de toutes dimensions y compris de très grosses dimensions. Les conditions climatiques et microclimatiques influencent aussi cette diversité.

On peut améliorer la diversité fongique en hêtraie gérée en laissant du bois mort de toutes dimensions. Certaines espèces qu'on rencontre habituellement en hêtraie en réserve intégrale semblent pouvoir réapparaître assez rapidement comme *Creolophus cirrhatus*.

Quant aux hêtres « champignonnés », ils portent en fait des fructifications d'amadouvières ou de pleurotes ou d'espèces voisines. Il s'agit de champignons qu'on peut qualifier de parasites de faiblesse. Les hêtres champignonnés conservés sont la porte d'entrée aux espèces cavi-coles : oiseaux et chauves-souris.

Il ne faut donc pas récolter ces bois systématiquement. En effet, vouloir diminuer le potentiel d'infection en retirant les fructifications paraît dérisoire quand on connaît la capacité de production de spores de ces champignons. En fait, l'exploitation de ces bois peut se justifier pour des raisons économiques (si le bois est encore récupérable) mais non pour des raisons strictement sanitaires.

Certaines espèces dites clés de voûte constitueraient la porte d'entrée à une plus grande diversité saproxylique. Deux champignons sont signalés à ce titre pour le hêtre : *Ischnoderma resinosum*, polypore annuel connu des entomologistes, et le ganoderme aplani *Ganoderma lipsiense*, espèce pérenne plus courante et assez facilement identifiable surtout quand il y a des galles d'insectes à la face inférieure. Ces hypothèses mériteraient d'être confirmées et pourraient constituer un critère supplémentaire de choix des arbres à vocation biologique.

Les insectes liés au hêtre

Le hêtre abrite et nourrit de très nombreuses espèces d'insectes : dans sa phase de jeunesse et adulte, ses feuilles servent de nourriture à des espèces appartenant à des ordres différents. Citons par exemple pour les lépidoptères la hachette (*Agria tau*) et l'écureuil ou bombyx du hêtre (*Stauropus fagi*) pour ne citer que les

plus grands et les plus connus, même s'il existe plusieurs centaines d'autres espèces plus petites et d'une identification délicate dans les familles des *Geometridae*, des *Noctuidae* ou des *Tortricidae*. Chez les diptères, on trouve plusieurs espèces cécidogènes (galligène, qui provoque la formation de galles ou cécidies), dont *Mikiola fagi*, la plus connue, qui orne les feuilles de petites galles pointues en forme de pépin d'orange. D'autres diptères minent les feuilles, tout comme un tout petit coléoptère *Curculionidae* (charançon) : *Orchestes fagi*. Parmi les autres coléoptères consommant le feuillage, nous pouvons citer d'autres charançons appartenant au genre *Phyllobius* (*P. argentatus* par exemple). Plusieurs espèces d'hyménoptères consomment également le feuillage notamment quelques tenthrèdes, comme *Cimbex fagi* ou *Hypolaepus fagi*. L'arbre adulte abrite une très forte diversité d'espèces, qu'on pourrait qualifier de biodiversité banale (même si certaines espèces sont peu communes) qui compte plusieurs centaines d'espèces différentes d'insectes.

Dans sa phase de sénescence ou après sa mort, le hêtre abrite un cortège très différent, principalement composé d'espèces xylophages ou saproxylophages appartenant à différents ordres (diptères, lépidoptères, coléoptères) et de leurs prédateurs, dont certains sont protégés ou font partie des espèces dites « à forte valeur patrimoniale ». C'est le cas de la célèbre rosalie des Alpes (*Rosalia alpina*, *Cerambycidae*), d'un petit *Lucanidae* (*Sinodendron cylindricum*), de taupins rares (*Ampedus elegantulus*, *Lacon lepidopterus*...), d'*Eucnemidae* (*Isohipis nigriceps*) ou



Ganoderme aplani, faces supérieure/inférieure

de *Tenebrionidae* (*Bolitophagus interruptus*, *Neomida haemorrhoidalis*) qui se développent dans les parties cariées, dans le bois mort, ou dans les carpophores. D'une façon générale, les vieux hêtres cariés, tout comme les vieux têtards, représentent des habitats exceptionnels pour de nombreuses espèces saproxyliques très exigeantes et très rares. Par rapport à l'arbre adulte, cette biodiversité est bien moins importante en nombre d'espèces, mais elle est beaucoup plus importante en terme de valeur patrimoniale. La valeur biologique de ces bois est sans commune mesure avec leur valeur commerciale souvent très faible voire nulle. Avant de marquer de tels bois, chaque forestier devrait se poser deux questions : combien d'années faudra-t-il à la forêt pour reconstituer de tels habitats et que pèsent ces bois par rapport à la valeur totale de la coupe ?

L'avifaune des hêtraies

Le hêtre constitue des physionomies forestières particulières, par les peuplements purs qu'il peut composer, par l'élancement de ses fûts (phénomène amplifié par la structure en futaie) et la faible part souvent prise par la strate buissonnante. Son avifaune, souvent intermédiaire entre celle des autres forêts feuillues et les forêts résineuses, est diversifiée en fonction des conditions rencontrées (altitude, latitude, essences associées...).

Riches de quelque soixante-dix espèces, les communautés aviennes

de la hêtraie sont constituées d'un ensemble d'espèces forestières ubiquistes, peu dépendantes de l'essence dominante ou de l'âge du peuplement (merle noir *Turdus merula* par exemple), auxquelles s'ajoutent des espèces plus spécialisées liées :

- aux stades jeunes (semis, fourrés : pouillot fitis *Phylloscopus trochilus*),
- aux stades intermédiaires (gaulis/jeune futaie : mésange boréale *Parus montanus*),
- aux stades matures (grimpeur des jardins *Certhia brachydactyla*),
- ou encore aux essences accompagnatrices (chênes : pic mar *Dendrocopos medius*, ou résineux : roitelet triple-bandeau *Regulus ignicapillus*).

Parmi les espèces ubiquistes, les mieux représentées sont : le pinson des arbres *Fringilla coelebs*, la fauvette à tête noire *Sylvia atricapilla*, la mésange charbonnière *Parus major* et le rouge-gorge familier *Erithacus rubecula*.

D'autres espèces montrent une préférence marquée pour le hêtre. Elles sont beaucoup mieux représentées en cas de dominance de cette essence dans le peuplement² : le pigeon colombine *Columba oenas*, le pic cendré *Picus canus*, le pic noir *Dryocopus martius*, le gobemouche noir *Ficedula hypoleuca* et le grimpeur des bois *Certhia familiaris* habitent les hautes futaies, le pouillot siffleur *Phylloscopus sibilatrix* recherche les hêtraies au sol dégagé dès le stade perchis, tandis que la fauvette des jardins *Sylvia borin* occupe les fourrés et le pipit des arbres *Anthus*



Galles de *Mikiola fagi*

² différences statistiquement significatives, données alsaciennes inédites de l'auteur.



A. Perthuis, ONF

Pigeon colombin



A. Perthuis, ONF

Pic noir



J-C Auria

Pic à dos blanc

trivialis les coupes ou les lisières. Les hêtraies ouest pyrénéennes sont caractérisées, entre 700 et 1 500 mètres d'altitude, par la présence unique en France du pic à dos blanc *Dendrocopos leucotos*. On notera à l'inverse la très faible présence du pic épeichette *Dendrocopos minor* dans les hêtraies.

La densité moyenne d'oiseaux nicheurs en hêtraie est de 60 à 65 couples aux 10 ha ; elle se situe dans la moyenne des densités observées dans les forêts françaises.

En automne ou en hiver, les faines souvent abondamment dispensées attirent les espèces granivores : on rencontre ainsi de grandes bandes de pigeon ramier *Columba palumbus* ou de pinson du Nord *Fringilla montifrigilla* dans les futaies de hêtre, de plaine comme de montagne.

Beaucoup des espèces inféodées aux hêtraies sont des espèces patrimoniales, inscrites à la directive européenne Oiseaux, sur les listes rouges nationale ou régionales ou en baisse sensible d'effectifs d'après les données issues de quinze années de programme STOC³ ; c'est notamment le cas du pouillot siffleur. La gestion forestière doit en tenir compte. Par exemple les cavités creusées par le pic noir dans les fûts de hêtre sont occupées par un cortège d'espèces (dont le pigeon colombin et la rare chouette de Tengmalm *Aegolius funereus*) ; il est important de préserver les arbres porteurs de ces cavités.

Des mammifères liés au hêtre ?

Contrairement aux insectes, par exemple, on peut difficilement parler de vertébrés directement dépendants du hêtre.

Dans le cas des mammifères en particulier, la relation entre l'arbre et l'animal est loin d'être évidente.

C'est plutôt la présence et la quantité d'habitats particuliers (les cavités naturelles sur les arbres par exemple) plus que la nourriture « produite » par le hêtre qui conditionne la plus ou moins grande abondance d'une espèce.

Cependant, le hêtre présente des caractéristiques intéressantes pour les mammifères. Certains rongeurs se nourrissent des faines produites par les arbres adultes. S'ils ont ainsi un rôle déprédateur, ils assurent aussi une fonction très importante dans la dispersion des graines, et participent grandement à la colonisation de l'espèce sur les lisières forestières. Parmi les espèces les plus attirées par le hêtre, on citera le loir *Glis glis* (Gosalbez and Castien 1997 ; Schlund, Scharfe et al. 2002) et le mulot à collier *Apodemus flavicollis* (Castien and Gosalbez 1994), espèces particulièrement friandes des faines. D'autres espèces comme l'écureuil roux ou les autres rongeurs peuvent consommer des faines, voire écorcer les arbres dans leur jeune âge.

Parmi les espèces arboricoles à forte valeur patrimoniale, les chauves-souris sont elles aussi concernées, même si certains travaux ont mis en évidence qu'elles sélectionnaient surtout des chênes quand elles pouvaient choisir entre différentes essences feuillues. Cependant, dans les hêtraies pures ou les forêts à forte dominance de hêtre, les chiroptères recherchent les arbres à cavités, avec un choix orienté particulièrement sur les fentes et les trous de pic de taille moyenne. Cela a été démontré pour certaines espèces comme la noctule commune *Nyctalus noctula*, la noctule de Leisler *Nyctalus leisleri* et le murin de Daubenton *Myotis daubentonii*, animaux relativement forestiers qui apprécient ce genre de cavité (von Helversen and von Helversen 1994 ; Boonman 2000). En général les animaux choisissent des gîtes les plus hauts possibles dans l'arbre : dans les futaies cathédrales en particulier, cela complique pour le marteleur le choix des arbres à marquer s'il veut prendre en compte ces espèces, de par la difficulté pour percevoir cet habitat. Dernier point important, les chauves-souris contribuent aussi à la régulation de bon nombre d'espèces qui elles-mêmes se nourrissent du feuillage ou du bois de hêtre. Avec parfois entre 100 et 800 insectes dévorés en une seule nuit par individu, les chauves-souris sont les « alliées » des forestiers, particulièrement lors des pullulations d'insectes ravageurs.

³ STOC : Suivi Temporel des Oiseaux Communs, programme national dirigé par le Muséum National d'Histoire Naturelle auquel participe l'ONF (voir l'indicateur 2.10 du bilan patrimonial des forêts domaniales)

Maintenir les arbres à cavités, habitats de ces espèces, c'est donc aider à pérenniser un meilleur fonctionnement de l'écosystème forestier.

Nicolas DRAPIER

ONF, Direction de l'environnement et du développement durable chargé de mission gestion des réserves
nicolas.drapier@onf.fr

Hubert VOIRY

ONF, animateur du réseau mycologie
hubert.voiry@onf.fr

Thierry NOBLECOURT

ONF, animateur du réseau entomologie
thierry.noblecourt@onf.fr

Pascal DENIS

ONF, réseau avifaune
pascal.denis@onf.fr

Laurent TILLON

ONF, animateur du réseau mammifères non ongulés
laurent.tillon@onf.fr

Bibliographie

RAMEAU J.C., GAUBERVILLE C., DRAPIER N., 2000. *Gestion forestière et diversité biologique. Domaine continental/Domaine atlantique* (2 volumes). Paris : IDF

Collectif, 2001. *Cahiers d'habitats Natura 2000. Tome 1 (volume 1) Habitats forestiers*. Paris : la Documentation française. 339 p.

BARDAT, J., BIORET F. et al., 2004. *Pro-drome des végétations de France*. Coll. Patrimoines naturels. Paris : Muséum National d'Histoire Naturelle. 170 p.

GARBAYE, J., 2004. Pourquoi une si grande diversité de champignons associés aux racines des arbres forestiers. *Rendez-vous techniques*, n°5, pp. 4-9

RICHARD F. et al., 2005. Conservation des champignons saproxyliques en France : perspectives pour la gestion forestière. In : Bois mort et à cavités, une clé pour les forêts vivantes, VALLAURI D., ANDRE J., DODELIN B., EYNARD-MACHET R., RAMBAUD D. (coord.). Paris : Lavoisier. pp. 157-165

Collectif, 2006. Directive régionale d'aménagement de la Lorraine. Nancy : ONF Direction territoriale de Lorraine

FOLTZER P., 2004. Typologie des arbres à cavités pour une meilleure prise en compte du Pic noir dans les hêtraies-sapinières des Hautes-Vosges. *Rapport d'étude ONF/PNR des Ballons*. 28 p.

ONF, 2004. Les Pics des hêtraies et chênaies à vieux arbres en Pyrénées-Atlantiques : prospections Pic à dos blanc et Pic mar (2001-2002) : mesures de gestion préconisées. *Rapport d'étude ONF Agence départementale Pyrénées-Atlantiques*. 27 p. + annexes

BOONMAN M. 2000. Roost selection by noctules (*Nyctalus noctula*) and Daubenton's bats (*Myotis daubentonii*). *Journal of Zoology*, vol. 251, pp. 385-389

CASTIEN E., GOSALBEZ J., 1994. Habitat selection of *Apodemus flavicollis* in a *Fagus sylvatica* forest in the Western Pyrenees. *Folia Zoologica*, vol. 43, n° 3, pp. 219-224

GOSALBEZ J. and CASTIEN E., 1997. Abundancia y reproducción de *Glis glis* (Linnaeus, 1766) (Rodentia, Gli-ridae) en el Pirineo occidental. *Acta Vertebrata*, vol. 24, n° 1-2, pp. 91-102

SCHLUND W., SCHARFE F. et al., 2002. Long-term comparison of food availability and reproduction in the edible dormouse (*Glis glis*). *Mammalian Biology*, vol. 67, pp. 219-232

TILLON L., 2005. Biodiversité, dynamique et conservation des petits mammifères cavicoles en France. In : Bois mort et à cavités, une clé pour les forêts vivantes, VALLAURI D., ANDRE J., DODELIN B., EYNARD-MACHET R., RAMBAUD D. (coord.). Paris : Lavoisier. pp. 145-154

VON HELVERSEN O., VON HELVERSEN D., 1994. The « advertisement song » of the lesser noctule bat (*Nyctalus leisleri*). *Folia Zoologica*, vol. 43, n° 4, pp. 331-33

L'histoire du hêtre au Quaternaire : un nouvel éclairage et des enseignements pour l'avenir

Les glaciations du quaternaire ont confiné le hêtre dans des « zones refuges » restreintes et isolées d'où il a reconquis l'Europe à la période postglaciaire. Or la façon dont le hêtre s'est diffusé influe sur la diversité génétique de l'espèce et sur sa structuration géographique. De nouvelles méthodes d'investigation apportent sur cette histoire un éclairage inédit qui modifie les hypothèses admises jusque récemment, avec des incidences pratiques sur le dispositif de conservation des ressources génétiques du hêtre.

Présentation de la famille des Fagacées et du Hêtre

La famille des *Fagaceae* comprend majoritairement des arbres monoïques* et des arbustes. Cette famille est représentée par 9 genres et environ 1 000 espèces, ce qui fait d'elle une des familles les plus importantes du règne végétal. Shen, en 1992 dans sa monographie sur le genre *Fagus*, décrit 2 sous-genres : le sous-genre *Engleriana*, que l'on trouve dans l'Est de l'Asie et le sous-genre *Fagus* qui se répartit entre l'Eurasie et le continent nord américain. En Europe, on distingue traditionnellement *Fagus sylvatica* L. et *Fagus orientalis* Lipsky (Tutin et al. 1964). Les relations phylogénétiques entre ces deux espèces ne sont pas encore clairement établies. Les derniers résultats obtenus avec des marqueurs moléculaires et morphologiques semblent montrer qu'il s'agit d'une seule et même espèce. Au sein même de l'espèce *Fagus sylvatica* L., on distingue aussi les taxons *Fagus maesiaca* dans le Sud des Balkans, *F. taurica* Popl en Crimée ; le premier est considéré comme un taxon différent (morphologie et caractéristiques génétiques différentes) mais rien n'est tranché pour le second.

Le hêtre européen (*Fagus sylvatica* L.) est une espèce forestière diploïde*

($2n = 24$) présente en Europe avant même le Quaternaire (Denk et al. 2002). Son aire naturelle est vaste (17 millions d'hectares), des monts Cantabriques en Espagne jusqu'aux Carpates et de la Sicile à la Suède. Elle est limitée au nord par la durée de saison de végétation, au sud par la faible humidité estivale et à l'est par des conditions trop continentales (figure 1). Aux limites nord et est de son aire de répartition actuelle, le hêtre est encore en évolution et continue sa progression dans le Sud de la Suède ; vers le nord-est, en Pologne, le facteur limitant n'est probablement pas le climat mais plutôt les activités humaines.

L'action humaine a très certainement largement influencé sa répartition par le biais de la sylviculture. Il a ainsi été introduit avec succès dans des zones écologiquement favorables mais dont il était naturellement absent, comme les Îles britanniques et les pays Baltes.

Espèce anémophile* caractérisée par un taux d'autofécondation relativement faible (0-0,1 %, Merzeau et al. 1994), le hêtre se reproduit à un âge relativement avancé (40-50 ans) et la production de graines est plutôt irrégulière. Les faines sont barychores* et sont généralement transportées à faible distance du semencier par des petits rongeurs.

Les geais peuvent également jouer un rôle non négligeable dans la dispersion des faines sur quelques kilomètres.

L'intérêt des études sur l'histoire passée des espèces

Du fait de son importance écologique et économique, le hêtre est l'une des espèces forestières les plus étudiées aussi bien sur le plan sylvicole qu'écologique, paléoécologique et génétique. Ainsi, de nombreuses données ont pu être accumulées sur sa distribution passée et sur sa diversité, obtenues à l'aide de différents marqueurs. Elles permettent aujourd'hui de faire le lien entre génétique et données fossiles pour une meilleure compréhension de la distribution actuelle de la diversité génétique et phénotypique de cette espèce, nécessaire pour mener une gestion durable de ses ressources génétiques.

De nombreux auteurs se sont intéressés très tôt à la localisation des zones refuges durant les dernières glaciations pour les plantes et les animaux. Le russe Vavilov a été un des premiers dès 1930 à montrer l'importance « des centres de diversité », zones qui contiennent encore aujourd'hui le plus de diversité. Ces centres de diversité établis par Vavilov pour les espèces cultivées

* Pour l'explication du vocabulaire spécialisé marqué du signe « * », voir le glossaire du hors série RDVT n° 1 « diversité génétique des arbres forestiers, un enjeu de gestion ordinaire »

se superposent complètement avec les zones refuges. Cette dernière décennie, les différentes études menées sur les espèces forestières ont démontré que ces zones refuges concentrent pour une espèce donnée le maximum de génotypes rares ou uniques. La connaissance et la préservation de ces zones refuges sont donc essentielles en matière de conservation des ressources génétiques, elles représentent un stock de variabilité, gage d'adaptation pour le futur de l'espèce. Mais la connaissance de l'histoire passée des espèces forestières ne doit pas s'arrêter à la localisation des zones refuges, elle doit aussi s'intéresser aux routes qu'ont suivi les espèces lors du dernier réchauffement climatique. En effet, les retracer est essentiel pour connaître l'origine des espèces que nous avons sur notre sol, mais aussi parce que les zones de contact des différentes routes de recolonisation rassemblent les génotypes des différentes zones refuges. Afin de pouvoir cerner ces différents « hot spots » de diversité il est essentiel de combiner les données fossiles et génétiques. Les études des données fossiles permettent de circonscrire les zones refuges et les voies de recolonisation ; les études génétiques permettent de préciser la variabilité des zones refuges et les limites des zones de contact entre les voies de recolonisation.

Dans le cas particulier du hêtre, nous allons tenter de répondre aux questions suivantes :

- Où étaient localisés les refuges glaciaires du hêtre et quelles en étaient les conditions écologiques ?
- Quelles routes le hêtre a-t-il suivi pendant la recolonisation postglaciaire et quels rôles ont joué les barrières oro-géographiques ?

Dans cet article, nous essaierons de reconstruire l'histoire du hêtre européen depuis le Pléistocène à partir des pollens et des macrofossiles (graines, charbon de bois) puis de décrire sa structuration génétique

actuelle en utilisant différents types de marqueurs (isoenzymes* et ADNcp*). Enfin, en intégrant les deux types de données, nous essaierons de proposer des réponses aux questions posées ci-dessus.

La paléobotanique : l'étude des pollens et l'étude des macrofossiles

Un nombre important de données polliniques est disponible pour le hêtre, résultats d'une longue tradition d'études palynologiques en Europe et bien sûr du caractère anémophile* de l'espèce.

Que nous apportent les nouvelles données paléobotaniques ?

Ces dernières années, un effort important a été consacré à l'étude des macrofossiles qui deviennent particulièrement importants pour les périodes les plus anciennes ou lorsque les arbres sont très dispersés et produisent très peu de pollen. Ces travaux fournissent des renseignements détaillés et non contestables sur la végétation arborée locale durant le dernier âge glaciaire (Birks et Birks 2000). Dans beaucoup de régions d'Europe, la présence de macrofossiles de bois de hêtre atteste de manière certaine de la présence de hêtre alors que les taux de pollen mesurés sont négligeables (inférieurs à 2 % du total des pollens de végétaux identifiés). On peut alors en conclure que, dans certains sites, le hêtre était bien présent depuis longtemps mais constituait une composante mineure de la végétation locale, incapable d'accroître sa présence dans les successions forestières, et ce pendant des milliers d'années.

Les refuges du hêtre

Jusqu'à récemment, les différents auteurs semblaient s'accorder sur le rôle des péninsules italienne et balkanique comme refuges principaux du hêtre durant la dernière période glaciaire. En revanche, ils divergeaient sur les voies de colonisa-



Fig. 1 : aire de répartition actuelle de *Fagus sylvatica*

(compilé par les membres d'Euforgen
http://www.ipgri.cgiar.org/networks/euforgen/Distribution_Maps)

tion utilisées à partir de ces refuges. L'importance, la localisation, le rôle et l'existence même des refuges secondaires restaient aussi sujets à débat.

Le nombre des données fossiles et des synthèses régionales (de Beaulieu et al. 1994 pour les Alpes françaises et le Jura par ex.), en constante augmentation, a permis d'améliorer la connaissance des voies de migration et la localisation de possibles zones refuges secondaires durant la dernière glaciation. Le cas de la péninsule ibérique est à cet égard le plus significatif ; des bois fossiles de hêtre ont été trouvés dans les Pyrénées, le Pays Basque et la côte Cantabrique datant du dernier maximum glaciaire, du tardiglaciaire et de la première moitié du postglaciaire (figure 2) alors que les pollens sont présents à des taux très faibles et de manière discontinue à ces périodes. De plus, l'expansion notable du hêtre dans cette région apparaît il y a seulement 4 000 ans BP¹ alors qu'il occupait indiscutablement de nombreux refuges. Le décalage entre la présence de hêtre, documentée par les macrofossiles, et sa représentation dans les pollens suggère que durant la période glaciaire, le hêtre était incapable de se développer assez pour produire un niveau de pollen détectable dans de nombreux sites. Cela peut être dû à la réduction drastique du nombre d'arbres dans les différents refuges mais aussi au changement physiologique des plantes durant une période de conditions clima-

¹ BP (before present) : le décompte du temps se fait à partir de 1950 après. JC

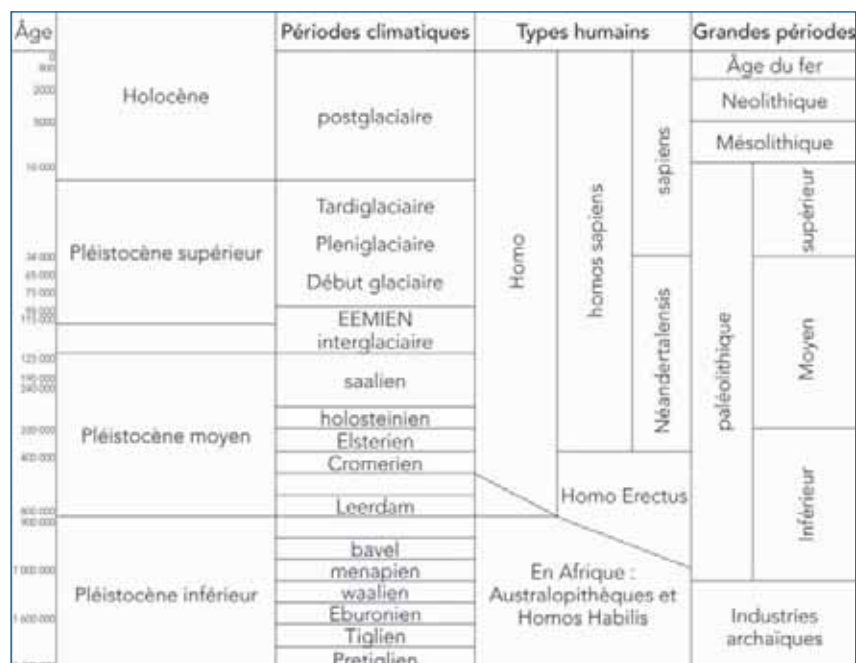


Fig. 2 : chronologie des périodes glaciaires et interglaciaires du pléistocène inférieur à l'holocène

tiques très rudes réduisant la production de pollen (Willis *et al.* 2000). En dépit de quelques incertitudes, les données paléobotaniques démontrent clairement que le hêtre a survécu dans des régions variées d'Europe durant les dernières glaciations. Les données récoltées ces dernières années confirment les péninsules italienne et balkanique comme zones refuges, comme le montraient les travaux plus anciens, ainsi que les Alpes slovènes. L'analyse des macrorestes a permis de mettre en évidence des refuges secondaire en Espagne, dans les Alpes et sur la côte méditerranéenne en France, et peut être dans les monts Apesu en Roumanie et dans le Sud des Carpates (figure 3).

Des rythmes de colonisation variables

L'expansion du hêtre à partir des différents refuges n'a pas été simultanée lorsque les conditions climatiques sont devenues favorables, et cela même pour des sites faiblement éloignés ; des décalages dans le temps de près de 2 500 ans pour le début de l'expansion du hêtre sur des sites distants de seulement 25 km en Bohême, Moravie et

Slovaquie ont été observés. Dans de nombreux cas, l'accroissement des populations a été très lent ou très tardif. Tous les refuges n'ont donc pas contribué de manière égale à la colonisation de l'Europe. Les populations s'accroissant tôt et rapidement, comme celles de Slovaquie, ont joué un rôle plus important que celles de Grèce, par exemple, qui ont essaimé tardivement et lentement. Ces résultats rendent considérablement plus délicate l'identification des zones refuges qui ont joué un rôle majeur dans la recolonisation. La présence ancienne de macrofossiles de hêtre permet d'attester l'existence de certaines d'entre elles sans qu'elles aient pour autant joué un rôle essentiel dans la recolonisation de cette espèce. C'est le cas pour les péninsules italienne et balkanique qui ne sont pas à l'origine de la colonisation du hêtre en Europe. En fait, les populations italiennes ont migré depuis le sud atteignant les Apennins relativement tard (5 000 ans BP) alors que le hêtre était déjà largement présent dans le centre de l'Europe. Les populations balkaniques ont commencé réellement

leur progression encore plus tardivement, vers 4 000 ans BP, et elles sont distinctement séparées de celles des Carpates. Enfin, il apparaît à la lecture des données récentes que la péninsule ibérique a elle aussi constitué un refuge pour le hêtre, d'où il ne s'est propagé vers le nord que peu et tardivement durant l'Holocène. Ainsi, contrairement à ce qui est généralement admis, les données paléobotaniques montrent qu'aucune des trois péninsules n'a joué un rôle majeur dans le processus de recolonisation. Il semble donc que seule la zone des Alpes slovènes ait joué un rôle majeur dans le processus de recolonisation du hêtre en Europe.

Par où est-il passé ?

Les données fossiles montrent que le hêtre s'est étendu le long de routes particulières. Dans la première moitié du postglaciaire, le hêtre s'est principalement propagé en suivant les terrains vallonnés et les montagnes du centre-Sud de l'Europe. Il a donc profité des pentes des Alpes pour se propager de la Slovaquie vers le sud : Italie puis la France et l'Espagne et vers le nord ouest jusqu'à atteindre les plaines d'Europe du Nord de manière plus tardive seulement après 4 000 ans BP. Les chaînes montagneuses n'ont donc pas été des barrières géographiques pour cette espèce comme on le pensait, mais dans de nombreux cas, elles ont au contraire facilité sa préservation puis sa diffusion. Le hêtre n'a pas traversé les plus grands massifs comme les Alpes mais il en a tiré avantage en s'étendant sur leurs pentes. L'extension du hêtre apparaît ainsi plus limitée par les larges plaines au climat continental comme la plaine hongroise et par les importantes vallées comme celles du Pô et du Danube que par les grandes zones de relief. L'arrivée relativement précoce du hêtre dans le Nord de l'Italie a bloqué l'extension du refuge des Apennins, de même pour les autres refuges secondaires.

Que peut-on conclure des études paléobotaniques ?

Indépendamment des discussions sur le nombre, la localisation et l'extension des refuges glaciaires du hêtre, du temps nécessaire à sa diffusion, des routes empruntées lors de sa migration et des causes qui ont favorisé son expansion, les données fossiles montrent clairement que :

- La plupart des zones refuges du hêtre sont localisées dans des zones montagneuses, où les populations résiduelles pouvaient trouver des zones humides et abritées, favorables à leur survie. Les barrières orogéographiques n'ont pas joué le rôle d'obstacle comme pour beaucoup d'espèces mais au contraire ont permis la diffusion du hêtre en Europe.

- La progression postglaciaire du hêtre est continue, sans important retrait suivi de nouvelle extension ; on peut donc en conclure que la distribution actuelle correspond au maximum d'extension réalisé depuis la dernière glaciation. Les fluctuations de l'importance du hêtre dans beaucoup de diagrammes polliniques à travers l'Europe traduisent simplement les fluctuations des effectifs des populations mais indiquent qu'une fois installé dans une zone donnée, le hêtre ne disparaît généralement pas de ces profils polliniques. Les populations actuelles sont donc les descendantes directes des populations qui se sont installées il y a des milliers d'années.

Les apports des études génétiques

L'apport de nouveaux marqueurs chloroplastiques

Les variants chloroplastiques² détectés par Magri *et al.* 2006 à l'aide de plusieurs marqueurs moléculaires sur plus de 400 populations de l'aire naturelle de répartition du hêtre peuvent être séparés en trois lignées (figure 4).

- La lignée figurée en rouge contient les haplotypes³ trouvés

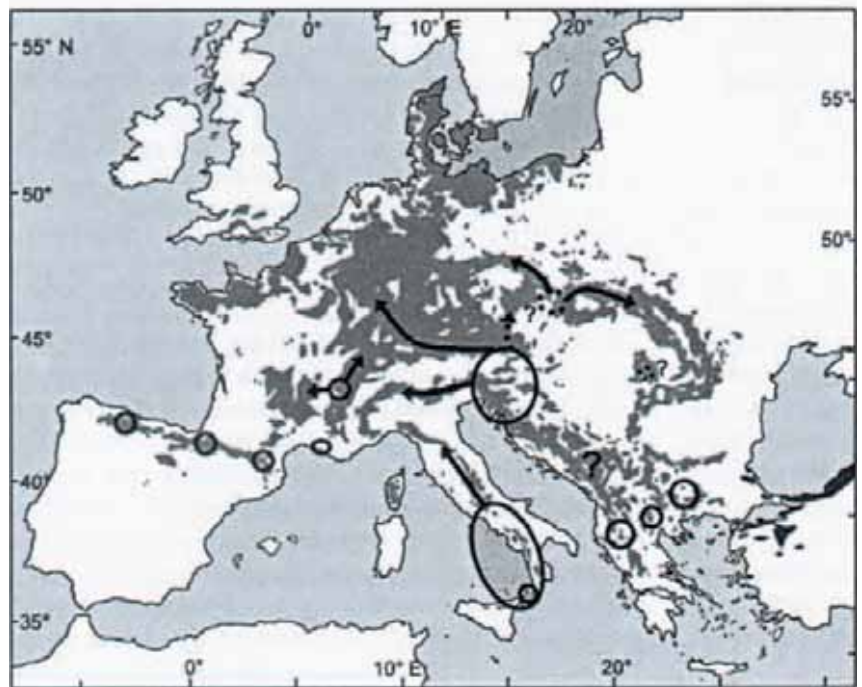


Fig.3 : localisation supposée des zones refuges du hêtre en Europe durant les dernières glaciations

dans toute l'aire naturelle, elle inclut les haplotypes les plus fréquents distribués principalement dans le centre, l'Est et l'Ouest de l'Europe.

- La lignée figurée en bleu cyan comprend des haplotypes présents uniquement dans les Apennins.

- La lignée en bleu foncé et violet comporte des haplotypes spécifiques de la péninsule balkanique. La répartition des haplotypes montre qu'il existe une faible diversité pour ce marqueur au niveau de l'Europe et que seules les péninsules balkanique et italienne présentent des différences. Ces données sont concordantes avec celles obtenues par les palynologistes : un refuge majoritaire à partir duquel le hêtre a eu une progression à la fois vers le nord et le sud bloquant la propagation des hêtres venant des refuges plus méridionaux.

L'apport de marqueurs nucléaires

Ces données sont basées sur un très large échantillonnage, réalisé par deux laboratoires (Université de Bordeaux I et Université technique de Zvolen en Slovaquie). Elles couvrent entièrement l'aire naturelle du

hêtre en Europe aussi bien aux niveaux altitudinal que longitudinal et latitudinal.

L'analyse de ces marqueurs permet de détecter au moins 9 groupes distincts (figure 5) contre 3 pour les marqueurs chloroplastiques. Ils révèlent des structurations génétiques plus complexes que celles décrites par les marqueurs chloroplastiques. Si un génotype (figuré en rouge) est majoritairement présent en Europe centrale et du Nord, en Europe de l'Ouest, les isoenzymes permettent la localisation de groupes différents pour les Carpates, la péninsule italienne, le Sud-Est de la France et l'Espagne. Une explication possible de la présence de groupes bien identifiés dans ces zones est qu'ils correspondent à des refuges secondaires qui n'ont pas contribué significativement au processus de recolonisation.

En confrontant les deux types de données, on peut remarquer que les zones de plus grande diversité (par leur nombre de génotypes différents) sont localisées d'une part dans le Nord de l'Italie et le Nord des Balkans, lieu de contact entre

² Les variants chloroplastiques sont obtenus à partir de l'étude de l'ADN contenu dans les chloroplastes et qui est transmis uniquement par la graine chez le hêtre

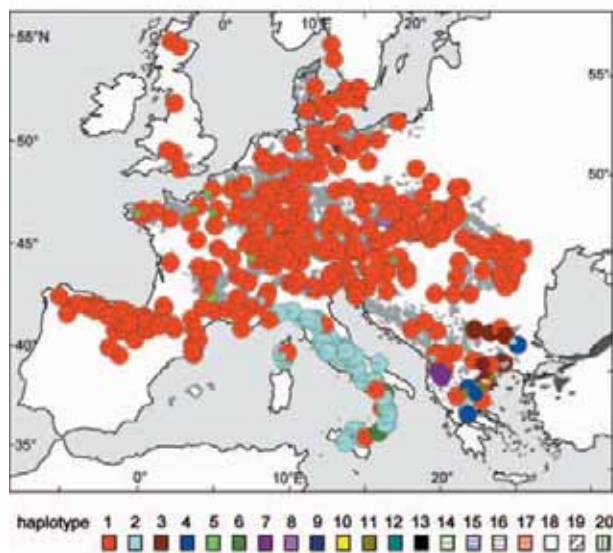


Fig. 4 : répartition géographique des haplotypes (marqueurs chloroplastiques) en Europe d'après Magri et al. 2006

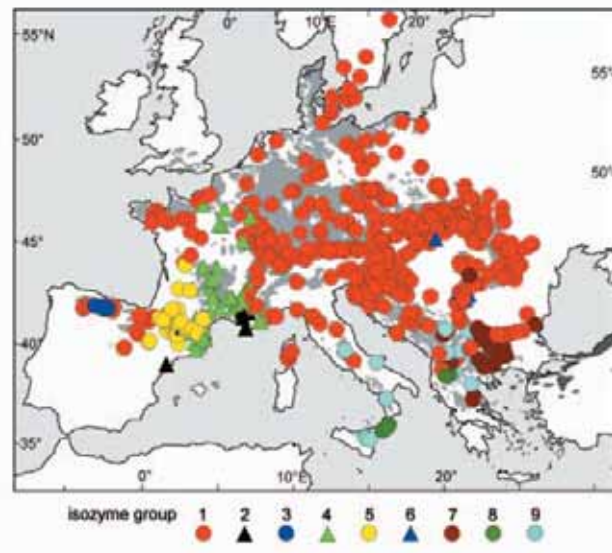


Fig 5 : répartition géographique des génotypes (marqueurs nucléaires) en Europe d'après Magri et al. 2006

Les contradictions apparentes (faible diversité des haplotypes, répartition plus contrastée des génotypes) illustrent deux réalités complémentaires : la recolonisation à partir d'un refuge majoritaire et l'influence localisée de refuges secondaires n'ayant pas contribué significativement au processus de recolonisation

deux lignées chloroplastiques, mais aussi dans la partie ouest de l'aire de répartition du hêtre. Ceci confirme les résultats trouvés précédemment qui montrent que les processus de recolonisation postglaciaire ne sont pas nécessairement associés à de larges pertes de la diversité génétique (Comps et al. 2001).

La combinaison des données paléobotaniques et génétiques : un nouvel éclairage

La combinaison des données paléobotaniques et génétiques offre de nouvelles perspectives pour la reconstruction de l'histoire du hêtre européen. Dans l'ensemble, les données recueillies à la fois par les macrofossiles, le pollen, l'ADNcp et les isoenzymes sont concordantes. Les données paléobotaniques ajoutent le facteur temps et la direction d'extension aux données génétiques, qui, quant à elles, aident à comprendre l'histoire des populations entre zones adjacentes. Les marqueurs chloroplastiques sont très utiles pour détecter des différences génétiques dans les péninsules italienne et balkanique, ce qui correspond particulièrement bien aux résultats paléobotaniques. Les

marqueurs nucléaires sont très efficaces pour distinguer les populations du Sud de la France et les populations espagnoles où l'ancienneté de présence du hêtre est confirmée par les données des macrofossiles et des pollens.

Des complémentarités de techniques d'étude riches d'informations

Les différences entre les reconstitutions génétiques et fossiles peuvent aussi être source d'informations concernant la création de la structure génétique des populations.

Les zones refuges sont précisées :

- une zone refuge dans les Alpes slovènes a joué un rôle majeur dans le processus de recolonisation du hêtre en Europe.

- Les zones refuges du Sud de l'Italie, attestées par les données polliniques, sont confirmées par les données chloroplastiques. Si le hêtre du Sud de l'Italie a migré vers le nord mais n'a jamais atteint la vallée du Pô, certains refuges comme la Calabre n'ont connu aucune expansion. En fait, les Alpes italiennes ont été colonisées par une expansion relativement rapide et de grande ampleur à partir des Alpes de l'Est, de la partie de la république tchèque, de la Slovénie-Istrie, qui

s'est étendue en longeant l'extérieur ouest des Alpes vers les Vosges, le Nord de la France et l'Angleterre.

- Dans l'Ouest des Alpes françaises, la présence très ancienne du hêtre, connue grâce aux données polliniques est validée par les isoenzymes. Cette population est responsable de la colonisation de la plus grande partie sud de la France. Néanmoins, une population, génétiquement différente, a survécu le long de la côte méditerranéenne, se répandant très tôt mais très lentement et occupant une très petite zone.

- Dans la péninsule espagnole, les macrofossiles confirment l'existence ancienne du hêtre et les isoenzymes séparent 3 groupes dans différentes chaînes de montagnes. Ces populations ne se sont répandues que tardivement et localement, sans contribuer à la colonisation du reste de l'Europe.

- En Serbie et Croatie, enfin, les données trop clairsemées ne permettent pas d'affirmer qu'il existe des refuges, mais les populations slovènes ont pu migrer plus au sud vers les Alpes Dinariques. Une zone refuge incertaine est aussi envisagée en Roumanie (monts Apuseni, foyer de richesse allélique) avec une

expansion rapide durant le postglaciaire selon les données polliniques ; ce refuge secondaire aurait été submergé par les immigrants du refuge morave passés à travers l'arc des Carpates. Dans tous les cas, les populations roumaines sont clairement distinctes de celles des Balkans où la persistance sur le long

terme du hêtre est confirmée par les données fossiles et l'important niveau de diversité génétique, suggérant qu'au moins 3 groupes génétiquement différents peuvent être distingués dans différents massifs. Ces groupes balkaniques ne se sont toutefois pas répandus vers le nord pour coloniser le reste de l'Europe.

Réseau de conservation *in situ*

La conservation *in situ* permet de préserver le potentiel d'adaptation des espèces en les laissant évoluer dans leur milieu naturel. La constitution d'un réseau pour une espèce donnée a pour but d'une part, de représenter la diversité génétique à l'échelle de l'aire de répartition, et d'autre part, de limiter les risques naturels (accidents climatiques, incendies...) et anthropiques (pollution génétique par introduction d'espèces ou de provenances qui peuvent s'hybrider avec la ressource locale) de destruction de cette diversité. La conservation *in situ* se raisonne donc à deux échelles spatiales : maintien de la diversité globale à l'échelle nationale, et conservation de cette diversité à l'échelle de chacune des unités. Au sein de chaque unité conservatoire, l'objectif est de limiter les risques de disparition des espèces visées, de favoriser la réponse adaptative des populations aux évolutions de l'environnement, et d'éviter une diminution drastique de leur diversité génétique au fil des générations.

Le réseau « Hêtre » a été un des premiers à avoir été mis en place (en 1986) en France sous l'égide de la « Commission des Ressources Génétiques Forestières ». Il est actuellement constitué de 27 unités conservatoires UC (figure 6). Cet échantillon comporte à la fois des peuplements dans les différentes zones où le hêtre est abondant mais aussi des hêtraies en position marginale (peuplement en limite altitudinale ou station marginale dans le sud ; ex : le massif de la S^{te} Baume) ou présentant un phénotype particulier (Faux de Verzy). Ces unités conservatoires sont des peuplements naturels monospécifiques ou mélangés. Chaque unité conservatoire est constituée d'un noyau central contenant la population à conserver, entouré d'une zone tampon destinée à limiter la contamination génétique provenant de pollen ou de graines des peuplements voisins. Ces UC sont gérées dans le cadre de la sylviculture habituellement pratiquée dans les forêts où elles sont implantées, avec des contraintes spécifiques précisées dans le cahier des charges propre à chaque essence. Ces contraintes concernent presque exclusivement la régénération : programmer la régénération du noyau central avant celle de la zone tampon, maintenir à la coupe d'ensemencement au moins 60 semenciers à l'hectare et, en prévision d'échec plus ou moins total de la régénération naturelle, procéder à des régénérations artificielles mettant en œuvre exclusivement des matériels forestiers de reproduction provenant de récoltes faites au préalable dans le peuplement même.

Dans le contexte nouveau du changement climatique, la représentativité de ce réseau d'unités conservatoires à l'échelle du territoire en fait un outil précieux de veille et de suivi des conséquences génétiques de telles modifications du milieu. La capacité de résistance (ou plasticité) des peuplements adultes peut y être suivie et la pression de sélection exercée par ces contraintes climatiques lors des phases de régénération naturelle peut y être mise en évidence.

Ce réseau « Hêtre », comme les autres réseaux en place ou en cours de constitution (sapin pectiné, chêne sessile, épicéa commun, pin maritime) est coordonné par un animateur (le CGAF en l'occurrence) issu de l'un des organismes nationaux impliqués dans la conservation des ressources génétiques forestières, et par un référent scientifique (A. Ducouso, INRA Bordeaux).

Pour plus de renseignements sur les réseaux de conservation *in situ*, voir le site du CGAF sur intranet, et se référer au document « Conserver les ressources génétiques forestières en France » coordonné par E. Tessier du Cros (1999), édité par la Commission des Ressources Génétiques Forestières.

Une possible explication à ces dynamiques d'expansion variables peut être génétique, associée à la taille de la population relique. Une population refuge peut avoir souffert de dérive génétique* par suite d'une diminution de ses effectifs sous l'effet de contraintes climatiques de plus en plus sévères, avec une réduction du nombre d'allèles, dont ceux ayant une signification adaptative. En outre, les populations avec un nombre efficace de semenciers limité doivent avoir également subi les effets de la consanguinité. À l'inverse, les grandes populations situées dans des refuges étendus doivent avoir été moins affectées par la dérive.

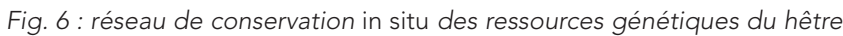
Conclusions et incidences sur la conservation des ressources génétiques

Les données génétiques et paléobotaniques montrent que les populations modernes de hêtre présentes en Europe sont d'origines différentes.

Les données fossiles indiquent que de multiples populations ont survécu au tardiglaciaire mais elles ne peuvent pas détecter le degré de différenciation entre ces populations. Les données génétiques permettent d'évaluer la diversité des populations actuelles mais elles ne peuvent pas renseigner sur leur origine ni sur les routes suivies durant la migration.

Il faut donc intégrer l'information des deux sources de données afin de discuter l'influence possible de la localisation, de l'importance et du nombre de refuges glaciaires qui ont conduit à la structuration et la différenciation génétique aujourd'hui observées pour le hêtre européen.

L'analyse conjointe des données fossiles et génétiques offre des perspectives nouvelles et inattendues sur l'histoire du hêtre européen, répondant ainsi à certaines questions concernant les relations entre sa distribution géographique passée et sa distribution actuelle.



réseau prend désormais en compte ces nouveaux résultats en suréchantillonnant les zones refuges secondaires et les zones de contact des différentes voies de recolonisation.

ONF, conservatoire génétique des
arbres forestiers, Orléans

INRA, UMR biodiversité,
gènes et écosystèmes
Pierroton

BEAULIEU J.L. de, RICHARD H., RUFFALDI P., CLERC. J., 1994. History of vegetation, climate and human action in the French Alps and the Jura over the last 15000 years. *Dissertationes Botanicae*, vol. 234, pp. 253-275

COMPS B., GÖMÖRY D., LETOUZEY J., THIÉBAUT B., PETIT R.J., 2001. Diverging trends between heterozygosity and allelic richness during postglacial colonization in the European beech. *Genetics*, vol. 157, pp. 389-397

DENK T., GRIMM G., STOEGERER K., LANGER M., HEMLEBEN V., 2002. The evolutionary history of *Fagus* in western Eurasia: evidence from genes, morphology and the fossil record. *Plant Systematics and Evolution*, vol. 232, pp. 213-236

MAGRI D., VENDRAMIN G.G., COMPS B., DUPANLOUP I., GEBUREKT, GÖMÖRY D., LATALOWA M., LITT T., PAULE L., ROURE J.M., TANTAU I., VAN DER KNAAP W.O., PETIT R. J., DE BEAULIEU J.L., 2006. A new scenario for the quaternary history of European beech populations: paleobotanical evidence and genetic consequences. *New Phytologist*, vol. 171, pp. 199-221

MERZEAU D., COMPS B., THIEBAUT B., LETOUZEY J., 1994. Estimation of *Fagus sylvatica* L. mating system parameters in natural populations. *Annales des Sciences Forestières*, vol. 51, pp. 163-173

SHEN C.F., 1992. A monograph of the genus *Fagus* Tourn. ex L. (Fagaceae). Ph.D. Thesis. New York, USA : The City University of New York. 405 p.

TUTIN T.G., HEYWOOD V.H.,
BURGES N.A., MOORE D.N.,
VALENTINE D.H., WALTERS S.M.,
WEBB D.A. 1964-1980. Flora Euro-
paea, 1-5. Cambridge, UK :
Cambridge University Press

WILLIS K.J., WHITTAKER R.J., 2000.
The Refugial Debate. *Science*, vol.
287, pp. 1406-1407

Le hêtre face aux changements climatiques

Plusieurs modèles annoncent que la place du hêtre en France pourrait se réduire singulièrement d'ici à 2100 sous l'effet des changements climatiques. Cet article fait le point sur les fondements, la crédibilité et les limites d'un tel scénario et passe en revue les divers « points faibles » du hêtre constatés plus ou moins récemment, notamment après l'été 2003. Au-delà du choc que suscite une telle perspective et des recommandations de bon sens que l'on peut formuler pour limiter les incidences des changements climatiques à venir, il reste à mettre au point une stratégie réaliste directement utilisable par les forestiers : celle-ci nécessitera un travail conjoint des scientifiques et des gestionnaires.

Eté 2004 : la publication par les médias de cartes montrant, avec une grande précision apparente, l'évolution possible de la forêt française d'ici à la fin du 21^e siècle suscite l'émotion dans les milieux forestiers français : on y voit notamment, selon un scénario d'évolution qualifié de « relativement optimiste » du climat par les auteurs, le couvert forestier français se modifier considérablement d'ici à la fin du 21^e siècle. L'aire du hêtre régresserait fortement, se cantonnant au Nord-Est et aux régions de montagne. Au-delà du choc visuel provoqué par ces cartes, issues du projet français CARBOFOR, on assiste à la prise de conscience, dans les milieux forestiers, de l'importance des enjeux du changement climatique. Mais n'y a-t-il pas une part d'inquiétudes infondées ? « Ils ont vu (les cimes décharnées), ils ont cru (aux pluies acides) » écrivait le sociologue Philippe Roqueplo à propos de l'impact des pluies acides (Roqueplo, 1988). Assiste-t-on aujourd'hui à un phénomène analogue ? Dans cet article, nous souhaitons fournir au gestionnaire forestier des éléments lui permettant de mieux comprendre les bases scientifiques, mais aussi les limites, des projec-

tions alarmistes faites par la communauté scientifique pour cette fin de siècle. En conclusion, nous aborderons la question des mesures par lesquelles on peut espérer s'adapter non pas à une nouvelle situation mais à un environnement en perpétuelle évolution.

Le déplacement des aires de végétation sous l'influence du changement climatique en cours n'est pas une problématique nouvelle dans le milieu scientifique. Dans un fascicule dédié en 1992 aux recherches sur les écosystèmes forestiers, Dupouey (1992) indiquait que « l'amplitude des déplacements (des aires) va de quelques centaines à plusieurs milliers de kilomètres selon les espèces et les modèles. Ces déplacements entraîneront des dépérissements massifs sur les limites sud des aires de répartition, ou à la base de certains étages de végétation. Il est à remarquer que la France est presque absente des recherches menées dans ces domaines ».

Les enseignements à tirer des modèles climatiques pour la gestion des forêts avaient également suscité des réflexions dès le début des années 1990. Ainsi, Bouhot et Barthod (1993) rapportaient que « la force qu'a prise la référence à

ces modèles climatiques vulgarisés par les travaux du Groupe intergouvernemental d'étude du climat (GIEC) est telle que les responsables forestiers de nombreux pays européens et nord-américains ont dû rapidement examiner la possibilité de prendre des mesures d'adaptation de la sylviculture et du choix des essences [...] sous peine d'apparaître irresponsables ». Mais d'un rapide examen des connaissances disponibles, ils concluaient alors que : « ces quelques recommandations (de bon sens) ne permettent en aucun cas de s'engager dans une réelle stratégie d'adaptation des choix sylvicoles aux conditions climatiques prédites globalement par les modèles actuellement disponibles ». Les travaux scientifiques français dans ce domaine n'ont réellement émergé qu'à la fin des années 1990, avec plus particulièrement les travaux de l'INRA à Nancy (J.-L. Dupouey, V. Badeau) dans le cadre du projet CARBOFOR (Badeau et al., 2004, 2005), ceux du CNRS, au Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive, à Montpellier (I. Chuine) et au Laboratoire d'écologie alpine (LECA, Université de Grenoble, Thuiller et al. 2005).

* Pour l'explication du vocabulaire spécialisé marqué du signe « * », voir le glossaire du hors série RDVT n° 1 « diversité génétique des arbres forestiers, un enjeu de gestion ordinaire »

Le hêtre en France en 2100 : la portion congrue ?

Le travail réalisé récemment par l'INRA (Badeau et al., 2005) a été réalisé en deux temps :

■ dans un premier temps, on a recherché le modèle statistique expliquant au mieux la présence et l'absence, en France, de l'espèce à partir des variables climatiques et édaphiques disponibles : on calcule ainsi une aire potentielle ;

■ le modèle de répartition du hêtre pour la période actuelle étant établi, on remplace alors les variables climatiques actuelles par leurs valeurs prédites pour le milieu ou la fin du 21^e siècle dans certains scénarios climatiques. Le calcul indique que l'aire de répartition potentielle du hêtre en 2100 connaîtrait une forte régression et serait alors confinée au quart Nord-Est de la France et aux régions de montagne (figure 1).

L'aire de répartition des espèces : modèles statistiques ou basés sur les processus

L'aire de répartition actuelle des arbres et la composition des peuplements forestiers sont la résultante de trois facteurs principaux : 1/les exigences écologiques des essences (réponse au climat, mais aussi aux conditions édaphiques, potentiel de migration, aptitude à la compétition ou la coopération avec les autres espèces), 2/la répartition spatiale des contraintes de l'environnement (géographiques comme la présence de barrières montagneuses, climatiques, édaphiques) et 3/la dynamique antérieure de ce couple biosphère/environnement. L'aire potentielle, déterminée par la niche climatique et pédologique de l'espèce, peut être très différente de l'aire réalisée (observée) qui dépend également des interactions biotiques, avec l'homme en particulier, des capacités de dispersion de l'espèce et des aléas historiques. Un exemple classique est celui du pin de Monterey (*Pinus radiata*) du nom de la baie californienne à laquelle se restreint son aire de répartition et qui a été employé à grande échelle au niveau mondial (notamment dans l'hémisphère sud) pour des boisements de production. On voit nettement dans ce cas que l'aire potentielle de ce pin dépasse très largement les limites de son aire réalisée. L'approche statistique du problème repose sur la recherche des corrélations entre la présence ou l'absence d'une espèce et les paramètres du milieu (climatiques, édaphiques, historiques, etc.). On vise ainsi à cerner au mieux l'écologie des espèces, à préciser les différentes composantes de leur niche. Une part plus ou moins importante peut être attribuée aux différents facteurs écologiques : on peut choisir de « tout » intégrer dans ces modèles ou de s'intéresser uniquement, par exemple, aux contraintes climatiques. Enfin, on peut simuler le devenir des niches climatiques en fonction des conditions futures. Ces modèles sont dits « empiriques » car on les bâtit à partir de l'observation de l'aire actuelle des espèces.

Les modèles basés sur les processus, apparus au début des années 1980 (Shugart, 1984), prennent en compte de façon explicite tout ou partie des principaux mécanismes contrôlant la présence des espèces : reproduction, dispersion, croissance, compétition, mortalité... Ils sont établis à l'échelle du peuplement, de la région ou du biome, pour des espèces ou des groupes d'espèces (types fonctionnels).

Il existe actuellement une grande diversité de modèles biogéographiques, depuis les modèles purement statistiques jusqu'aux modèles basés purement sur les processus. Ces différents modèles donnent des résultats convergents dans la mesure où ils prévoient tous un déplacement important des aires potentielles des essences forestières vers le Nord et vers des altitudes plus élevées, mais cette information est encore insuffisante pour les besoins de la gestion forestière locale.

Seuls les modèles statistiques développés par l'INRA-Nancy et le LECA donnent pour le moment des projections de l'évolution de l'aire de répartition potentielle du hêtre, les travaux sur les modèles basés sur les processus spécifiques à cette espèce n'étant pas encore suffisamment avancés.

Pour ceux qui s'intéressent à l'actualité scientifique, les résultats de ces simulations n'ont rien de surprenant ou de déconcertant. Si les incertitudes qui pèsent sur ce résultat sont nombreuses – nous les passerons en revue –, ce type de scénario reste très vraisemblable.

Reprenons les étapes du travail une à une. Il est basé sur une approche simple mais robuste qui utilise, pour la première fois, des données non disponibles jusque-là ou qui n'avaient pas encore été agrégées à l'échelle nationale :

■ **données de l'Inventaire forestier national (IFN) :** on dispose depuis peu d'une cartographie précise (environ 1 point de relevé pour 130 ha de forêt) de la plupart des espèces forestières en France. Au total, la présence de 67 essences ligneuses a été relevée dans un peu plus de 100 000 points de sondage de l'IFN entre 1985 et 2001, dont 36 549 points où la présence du hêtre est notée.

■ **données climatiques :** les données de base (températures, précipitations, nombre de jours de gel), depuis peu disponibles à une échelle fine (1 km) sur tout le territoire grâce aux interpolations réalisées par Météo France (modèle AURELHY), et les cartes de rayonnement solaire décennale issues d'observations satellitaires (période 1996-2002) ont été utilisées.

À partir de ces données, plusieurs variables synthétiques ont été calculées comme l'évapotranspiration potentielle (ETP) ou le déficit pluviométrique (précipitations — ETP). Pour ce qui concerne les scénarios de prévision à long terme du climat, les modèles n'intègrent pas encore parfaitement tous les processus qui influencent le climat mais des progrès considérables ont été réalisés au cours des quinze dernières années. Le modèle ARPEGE que nous avons utilisé a été élaboré par Météo France. Il fait partie du cercle restreint des modèles de prévision à long terme du climat les plus utilisés au niveau mondial. Arpège est un modèle à

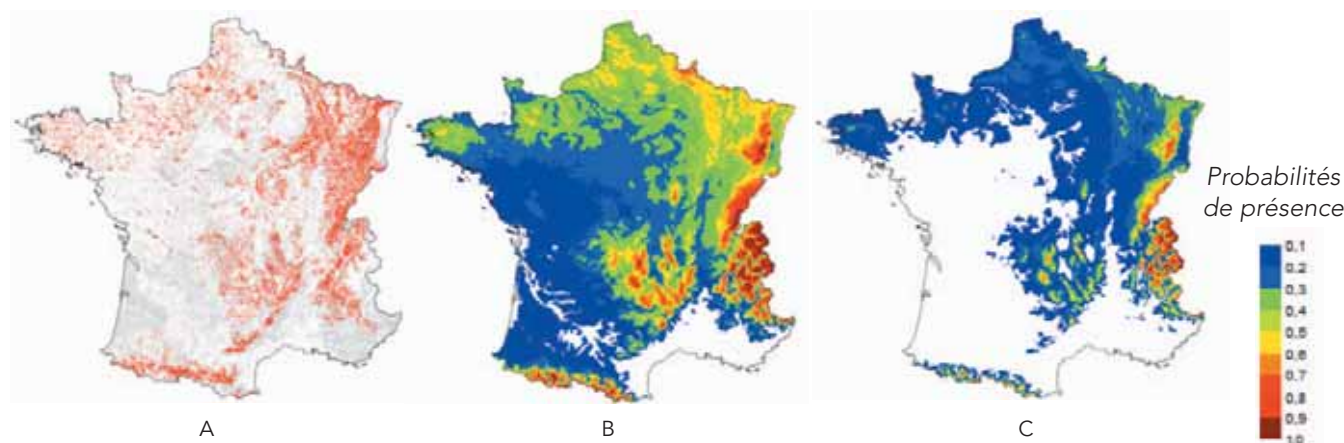


Fig. 1 : A – répartition du hêtre observée par l'Inventaire forestier national ;
B — modélisation de l'aire actuelle de répartition du hêtre (AURELHY) ;
C – extrapolation de l'aire de répartition du hêtre en 2100 (ARPEGE) (Badeau et al., 2004)

maille variable centré sur la Méditerranée : plus on s'en éloigne, plus la maille est lâche ; sur la France, la résolution est de 100-150 km. Il faut noter que l'évolution climatique prévue (ici selon le scénario d'émissions dit B2) fait plutôt partie des prévisions « optimistes », c'est-à-dire que l'hypothèse d'augmentation de température se situe dans la partie inférieure de la palette des divers scénarios disponibles, et donc que les résultats présentés ici (figure 1) ne représentent en aucun cas une hypothèse très pessimiste.

Des résultats cohérents avec les connaissances sur l'écologie de l'espèce

Le modèle statistique indique que la présence du hêtre est très fortement corrélée au niveau du déficit pluviométrique cumulé des mois de juin et juillet ; avec cette seule variable, la présence du hêtre est correctement reproduite sur la totalité du territoire.

Cette corrélation entre présence/absence du hêtre et climat traduit-elle une causalité ? De solides indications vont dans ce sens. Parmi les travaux récents sur le hêtre, on mentionnera ceux sur :

■ **la croissance radiale** : l'analyse de la croissance radiale du hêtre sur les plateaux calcaires de

Lorraine (Badeau, 1995 ; Granier et al. 1995) a montré que près de 70 % de la variance interannuelle des accroissements pouvait être expliquée par les déficits hydriques de juin à août de l'année en cours et de l'année précédente. Ce résultat a été vérifié par Lebourgeois et al. (2005) pour diverses régions françaises à l'aide du réseau RENE-COFOR, et il reste valide à l'échelle européenne (Dittmar et al., 2003 ; Lebourgeois, 2005). La précocité d'apparition d'un déficit hydrique au cours de la saison de végétation est un paramètre déterminant l'arrêt de croissance, donc la largeur du cerne annuel (Lebourgeois, 2005). Il faut souligner que c'est l'interaction entre climat, type de sol (réserve utile) et peuplement (indice foliaire) qui détermine *in fine* le niveau de stress hydrique et donc le potentiel de croissance radiale.

■ **les variations de l'état des cimes**, estimé visuellement dans les réseaux de surveillance, qui, dans le cas du hêtre, apparaissent étroitement corrélées à l'intensité des stress hydriques estivaux de l'été précédent (Badeau et al., 1997). L'effet différé de la sécheresse sur l'accroissement des pousses a également été bien illustré sur le hêtre en Grande-Bretagne par Power (1994) et Stribley et Ashmore (2002).

La prise en compte des températures maximales d'octobre a permis d'améliorer, du point de vue statistique, la qualité du modèle qui prédit alors de façon plus réaliste la présence du hêtre dans toute la moitié nord du territoire et dans les régions de montagne tout en limitant sa présence sur la côte Atlantique et dans la vallée de la Garonne.

Le modèle final permet de prédire avec une très bonne précision les points où l'espèce est réellement présente. Mais on raisonne toujours par rapport à un seuil de probabilité : le modèle utilisé donne pour chaque point de l'IFN une valeur de probabilité comprise entre 0 et 1. Idéalement, l'aire de distribution d'une espèce devrait pouvoir être parfaitement reconstruite à partir de ces valeurs de probabilité en considérant que l'espèce est présente au-dessus du seuil de 0,5 et absente en dessous. Pour obtenir un tel résultat, il faudrait néanmoins que l'espèce étudiée soit réellement observée sur tous les points où elle est climatiquement susceptible d'être présente. Dans le cas du chêne vert par exemple, il est rare : i) de l'observer en dehors de la zone méditerranéenne et ii) de ne pas l'observer en zone méditerranéenne. Le modèle climatique est dans ce cas très tranché. Dans le cas du hêtre,

la dispersion sur le territoire français n'est pas aussi nette, cette essence étant absente d'un grand nombre de points IFN où elle pourrait être présente d'un point de vue climatique : la dynamique forestière, naturelle ou liée à la sylviculture, n'a pas permis l'installation du hêtre dans ces sites. Il n'est pas aisé de quantifier ces « fausses absences » (du point de vue climatique). Une confrontation très attentive des cartes observées (données IFN) et des cartes calculées (probabilités) permet cependant d'arriver, pour certaines essences, à un ajustement satisfaisant. Dans le cas du hêtre, le seuil de probabilité correspondant le mieux aux enveloppes de présence observées par l'IFN est de l'ordre de 0,3. Avec ce seuil, le modèle prédit plus de 80 % des points où le hêtre est réellement présent. À des seuils de probabilité inférieurs (couleurs bleues sur les cartes), le hêtre est beaucoup moins représenté dans les milieux forestiers inventoriés par l'IFN mais il n'en est pas totalement exclu (voir par exemple la Flore Forestière de Rameau).

Un résultat entaché de fortes incertitudes

Les simulations de déplacement de la niche des espèces au cours du 21^e siècle reposent sur des hypothèses climatiques sur lesquelles pèsent encore de fortes incertitudes.

■ **Les modèles climatiques** globaux se sont nettement améliorés depuis dix ans mais sont encore susceptibles d'évoluer par la prise en compte d'un certain nombre de mécanismes imparfaitement connus (aérosols, évolution de la nébulosité, changements d'utilisation du sol, etc.).

■ Même si les modèles climatiques ne cessent d'évoluer, des incertitudes considérables existent concernant les **scénarios d'émissions de gaz à effet de serre** à l'échelle du prochain siècle : ils dépendent en effet d'hypothèses sur le développement



L.-M. Nagelisen, DSF

Un hêtre (sain) en habits d'automne

économique et démographique de la planète, la place respective des combustibles fossiles et des énergies renouvelables, la nature des combustibles (gaz, pétrole, charbon) qui seront employés et, bien entendu, l'efficacité des politiques de réduction des gaz à effet de serre. Dans le rapport 2001 du GIEC¹, 6 scénarios d'émissions avaient été retenus. Pour le prochain rapport (à paraître en 2007), la palette des simulations sera étendue. C'est probablement aujourd'hui la principale source d'incertitude dans toute prévision liée au changement climatique.

De plus, les modèles biogéographiques présentés ici ne prennent en compte que les paramètres climatiques, et ne s'intéressent donc qu'à l'évolution de la niche climatique potentielle des essences. Celle-ci peut être très différente de la niche effectivement réalisée, pour diverses raisons :

■ Dans le cadre d'une sylviculture principalement orientée vers la régénération naturelle, les espèces devront migrer pour réinvestir leur nouvelle aire climatique. Selon la vitesse de migration des essences, il apparaîtra donc un décalage plus ou moins important entre niche

potentielle et niche réalisée. Or, la **capacité à migrer des espèces** est encore très mal connue, même si certains modèles en cours de développement au CNRS (PHENOFIT) ou au LECA (BIOMOVE) visent à simuler la dynamique de l'aire de répartition sur un pas de temps annuel en utilisant des estimateurs de vitesse de migration issus des données palynologiques fossiles et en incluant les stades plantules et juvéniles aux processus.

■ Les déplacements d'aires de répartition concernent potentiellement toutes les espèces, qu'elles soient ligneuses, herbacées, animales ou microbiennes. Leur déplacement entraînera la formation de **nouvelles combinaisons d'espèces** et, donc, l'établissement de nouvelles relations de compétition, de symbiose ou de parasitisme, qui pourront limiter ou favoriser l'extension de certains ligneux. Ces interactions ne sont pas prises en compte dans la plupart des modèles actuels. Enfin, certains facteurs temporels ou spatiaux ne sont pas pris en compte dans les modèles de niche utilisés ici.

■ **La variabilité génétique** actuelle du hêtre, ou celle qui pourra apparaître sous la pression des change-

¹ Le Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat réalise périodiquement (tous les 5 ans) un état de l'art complet des connaissances scientifiques sur l'effet de serre et les changements climatiques.

ments climatiques, permettront-elles à l'espèce de s'adapter à ces changements ? Nos connaissances des processus adaptatifs sont encore trop faibles pour répondre précisément à cette question même si elles suggèrent que des évolutions génétiques rapides auront lieu même chez des espèces à temps de génération long telles que les essences forestières (Davis et al. 2005). Le programme européen EVOLTREE, piloté par l'INRA Bordeaux (A. Kremer) vise à identifier les gènes majeurs d'adaptation au climat, et il serait envisageable, à terme, de créer des modèles intégrant l'évolution génétique des processus modélisés. Sans aller jusque-là, la variabilité génétique présente au sein des populations d'une espèce est encore très peu prise en compte dans les modèles de biogéographie. Certains modèles comme PHENOFIT intègrent cette variabilité en utilisant des paramètres différents selon les provenances actuelles.

■ La teneur en dioxyde de carbone (CO_2) de l'atmosphère joue aussi un rôle direct dans la croissance et la physiologie des arbres, via la photosynthèse, et indépendamment des changements climatiques. Des travaux menés par l'INRA Nancy en condition de double teneur en CO_2 (hypothèse utilisée également dans les scénarios climatiques utilisés ici) ont induit chez les chênes une fermeture des stomates, régulation qui permet une consommation moindre d'eau. Mais chez le hêtre, cet effet antitranspirant du CO_2 dans l'air n'a pas été observé et ses exigences en eau pourraient être augmentées.

■ Les cartes publiées ne prennent que partiellement en compte la variabilité des conditions de station dans les forêts françaises. En particulier, il n'existe pas de données précises, spatialisées, sur la réserve en eau utile des sols forestiers sur lesquelles s'appuyer. Ces cartes n'ont donc qu'une valeur régionale et ne permettent pas de descendre à l'échelle du massif.

Les faiblesses actuelles du hêtre

À long terme, seule une meilleure connaissance des processus écologiques (phénologie, reproduction, mortalité...) permettra une approche réaliste, via des modèles, de ce qui pourra se passer en forêt sous l'influence du changement du climat. Le renforcement des recherches sur l'écologie des espèces ligneuses devra être complété par un renforcement des données de suivi à long terme qui permettront notamment d'alimenter et de valider ces modèles.

De nouveaux outils seront nécessaires. Le projet de Système d'information phénologique pour l'étude et la gestion des changements climatiques (SIP-GECC), piloté par le CNRS (I. Chuine) et couvrant les divers types de végétation s'inscrit dans cette perspective. Le projet QDiv (*Quantifying the effects of global environmental change on terrestrial plant diversity*, Quantification des effets des changements globaux sur la diversité des plantes terrestres), initié en janvier 2006, regroupant notamment des unités INRA, CNRS et le réseau d'arboretums publics, permettra de développer un modèle basé sur les processus pour le hêtre.

Mais les outils de suivi déjà en place fourniront également des données précieuses. À ce titre, l'analyse des variations de l'état des cimes (estimation visuelle, mesure de la surface foliaire à partir des chutes de litière ou à l'aide de mesures de lumière sous couvert) et l'analyse de la croissance devraient permettre d'affiner la modélisation de l'impact d'un certain nombre de contraintes environnementales comme les sécheresses.

Nous passons ci-après rapidement en revue les principaux facteurs de « fragilité » du hêtre actuellement connus avec l'idée que certains de ces facteurs pourraient jouer un rôle significatif dans l'évolution future de l'espèce, tout en gardant à l'esprit qu'il n'est souvent pas possible de mesurer, à ce stade, quels seront leurs rôles précis.

Sécheresse et état sanitaire du hêtre

L'augmentation du déficit foliaire du hêtre observée en 2004 suite à l'été chaud et sec de 2003 (données du réseau européen de suivi des dommages forestiers, Renaud et Nageleisen 2005, figure 2) est conforme aux analyses réalisées sur l'incidence des stress hydriques sur l'état des houppiers du hêtre (Badeau, 1999a, b). En dépit de sa

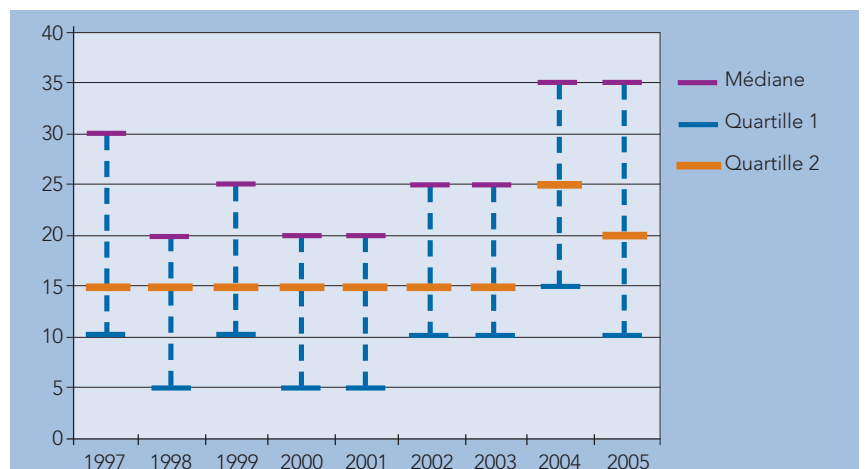


Fig. 2 : évolution du taux de déficit foliaire médian du hêtre, dans le réseau de suivi des dommages forestiers (16 x 16 km) — Source : Ministère de l'agriculture et de pêche (DSF)

forte sensibilité au manque d'eau, évoquée plus haut, le hêtre apparaît ainsi comme une essence capable d'une récupération rapide et très importante, ne subissant que des mortalités très limitées, parmi les plus basses enregistrées dans les réseaux de surveillance des forêts. On a pu évoquer à ce propos le « paradoxe » du hêtre. Cependant l'analyse des dépérissements passés de hêtre liés à la sécheresse, en particulier suite à la période sèche 1989-1991 (Nageleisen, 1993, 1995), incite à la prudence dans l'interprétation des informations recueillies sur un réseau à maille large tel que le réseau européen de suivi des dommages forestiers ; il ne permet pas en effet de mettre en évidence des phénomènes parfois marqués mais très localisés. Suite à la sécheresse et la canicule de 2003, des observations de mortalité de branches et de descente de cime dans diverses régions montrent que l'impact est loin d'être négligeable et des effets cumulatifs avec d'autres aléas restent possibles.

Excès d'eau

Moins de précipitation en été, davantage en hiver, c'est ce que prédisent de façon récurrente les modèles climatiques à long terme. Le risque est une augmentation de l'engorgement du sol en durée et en intensité dans des stations où le hêtre occupe une place importante (luvisols plus ou moins rédoxyques). Au stade juvénile, cette essence est très sensible à l'ennoyage avec une forte mortalité racinaire liée à l'absence de mécanismes spécifiques d'adaptation (Belgrand, 1983) et un dysfonctionnement de la photosynthèse (Dreyer, 1994). Ceci explique qu'en régénération, dans ces milieux, les semis lèvent difficilement ou meurent rapidement (Becker, 1983, Lévy et al., 1989, Lévy et Lefèvre 2001). Au stade adulte, le hêtre est également sensible à une augmentation de la hauteur de la nappe. Des dépérissements localisés après les

hivers et printemps très pluvieux sont souvent observés. De même, la création de conditions anoxiques de surface, suite à un tassement anthropique du sol, est préjudiciable à l'état de santé du hêtre, comme cela a été montré en forêt de Soignes (Herbauts et al., 1998) et observé en forêt de Chaux par exemple. Si les processus sous-jacents sont encore mal connus, il semble que l'altération d'une partie du système racinaire, souvent traçant, suffise à induire des dépérissements en liaison avec un amoindrissement de la résistance à la sécheresse. D'où l'importance d'une sensibilisation des acteurs impliqués aux effets de la mécanisation sur la qualité des sols (Lamandé et al., 2004).

Anomalies thermiques (canicules, hivers doux, gels)

Revenons au deuxième paramètre climatique qui apparaît dans le modèle biogéographique de répartition actuelle du hêtre, à savoir la température ; il est intéressant de noter que parmi les facteurs climatiques qui ont récemment affecté le hêtre figurent des chutes brutales de température en automne, alors que l'endurcissement des arbres n'était encore que partiel. C'est du moins l'hypothèse sur laquelle travaille une équipe de l'INRA à Clermont Ferrand (T. Ameglio) après les observations de terrain réalisées en Ardenne belge et française à la suite de l'épisode marquant de novembre 1998 qui a, sinon causé des mortalités massives, du moins gravement déprécié plus de deux millions de m³ de bois de hêtre dans cette région transfrontière (Belgique, France, Luxembourg, Rhénanie-Palatinat) (Huart et Rondeux, 2001 ; Nageleisen et Huart, 2005). Dans les modèles climatiques cherchant à expliquer les variations interannuelles de croissance, cette période apparaît également importante. L'augmentation de la respiration d'entretien des tissus de l'arbre, induite par l'augmentation de

la température, à une période de l'année où la photosynthèse est terminée, pourrait amener à une consommation augmentée des réserves carbonées (Bréda et al., 2002), entraînant une péjoration du bilan carboné annuel de l'arbre. Les modèles basés sur les processus, couplés à des recherches sur la gestion des réserves, devraient permettre à moyen terme de tester cette hypothèse. Dernière observation allant dans le même sens, des températures hivernales élevées apparaissent défavorables à la croissance en hauteur du hêtre (Seynave et al., 2005). La température moyenne de janvier serait même aussi importante que les conditions estivales pour expliquer les variations de l'indice de fertilité (hauteur dominante à un âge donné) des hêtraies dans le Nord de la France. La clémence des températures automnales et hivernales et ses conséquences sont certainement des facteurs à analyser plus avant.

Tempêtes

Suite aux récentes tempêtes de 1990 et surtout 1999, la crainte d'une fréquence accrue d'événements tempétueux s'est fait jour, et la question d'une gestion plus spécifique ce risque également. Alors que l'augmentation de la fréquence des tempêtes reste débattue, la réflexion sur les composantes d'une gestion adaptée au risque vent est en cours, sur la base des recherches engagées dans le cadre de programmes coordonnés par le GIP Ecofor. Concernant le hêtre, le rôle clé de la hauteur et de la structure des peuplements, en interaction avec les contraintes stationnelles, a été bien mis en évidence par Bock et al. (2006). Dans le contexte des changements climatiques discuté ici, on notera que le détrempage des sols, identifié comme un facteur qui a pesé lourd dans l'importance des dégâts des dernières tempêtes, nous ramène à la question des précipitations hivernales évoquée plus haut :

toutes les futures tempêtes ne se produiront pas sur des sols aussi détrempés que les dernières mais, en tendance, la probabilité de retrouver une situation de type 1999 augmente.

Insectes ravageurs et champignons pathogènes

Globalement, le hêtre est une essence qui présente un cortège de ravageurs et de pathogènes nettement plus réduit que ceux de la plupart des essences feuillues (Nageleisen, 2002). Cependant, c'est moins le nombre de parasites qui importe dans la perspective des changements climatiques que l'existence de quelques-uns qui peuvent, sous certaines conditions (largement inconnues à l'heure actuelle), avoir des phases épidémiques et causer des dommages importants. Ainsi, la cochenille du hêtre (Perrin, 1977) a-t-elle causé au cours des années 1970 un dépérissement du hêtre en Normandie qui a perturbé la gestion locale de l'espèce (Mormiche, 1995). Il convient surtout de s'interroger sur les types de ravageurs ou de pathogènes qui pourraient tirer parti d'un climat plus chaud, plus sec, etc. À ce titre, les observations réalisées par le département de la santé des forêts dans le cadre de la « maladie du hêtre des Ardennes », mentionnée précédemment, sont très intéressantes. En effet, si les scolytes xylophages mis en cause ou les champignons lignivores observés font partie du cortège classique des endémiques de la hêtraie, ils ont connu lors de cet événement un développement explosif jamais vu auparavant. Le facteur déclenchant semble avoir été le gel intervenu à la mi-novembre 1998, à un moment où les arbres étaient sans doute insuffisamment endurcis, ce qui a provoqué des lésions importantes favorisant la pénétration de champignons et à l'origine de suintements abondants et très attractifs pour certains insectes xylophages. Enfin, il faudra prendre en compte



L.-M. Nageleisen, DSF

Hêtre mal feuillé au printemps 2006 dans la Vôge

Ces symptômes sont apparus après à l'été 2005 dans un contexte de nutrition calco-magnésienne déficitaire

la possible émergence de parasites, encore inconnus ou absents en France actuellement, qui pourraient profiter de nouvelles conditions climatiques. Une surveillance phytosanitaire intensive est à ce titre plus que jamais d'actualité pour éviter ou au moins gérer le plus tôt possible de telles éventualités.

Les interactions entre divers aléas, enfin, sont à prendre en compte. Il faut reconnaître que, globalement, et au-delà de l'idée bien ancrée que de tels modes d'action pourraient être importants, les cas bien établis sont peu fréquents et leur importance potentielle mal évaluée.

Un exemple qui s'impose aux observateurs de terrain est que les hêtraies fragilisées par des trouées de chablis multiples à la suite des tempêtes de 1999 ont subi de manière accentuée les effets de l'été 2003. En 2004, on a ainsi assisté à une multiplication des coups de soleil avec décollement d'écorce irrémédiable sur les fûts ou à des mortalités de la moitié supérieure du houppier dans les hêtraies clairiérées. Ces phénomènes sont encore plus accentués dans le cas d'un tassement du sol lié à l'exploitation sans précaution

des chablis. Ces effets cumulés peuvent se traduire dans certains cas par la disparition de la hêtraie et la nécessaire substitution par une autre essence (chêne sessile par exemple) dans les cas où le sol a été durablement perturbé.

Les interactions soupçonnées – ou établies seulement en conditions contrôlées difficilement extrapolables – comme celles entre sécheresse et ozone ou sécheresse et altération des sols sous l'effet des retombées atmosphériques ne doivent pas non plus être perdues de vue. Une observation faite sur le hêtre après la sécheresse de 2003 sur des sols très pauvres dans la région naturelle de la Vôge (département des Vosges) est particulièrement intéressante car des hêtraies ayant bénéficié d'un amendement calco-magnésien présentent nettement moins de dommages que les autres. Cette observation, bien qu'inédite, est cohérente avec les résultats acquis antérieurement, en particulier dans le cadre des recherches sur les pluies acides. Elle fait l'objet d'investigations plus approfondies.

Modifications de la phénologie, de la reproduction ou de la croissance, tous les divers problèmes auxquels le hêtre sera exposé au cours des décennies à venir doivent être ana-

lysés, quantifiés et intégrés dans les modèles basés sur les processus pour comprendre ce qui risque de se passer réellement entre maintenant et 2100 (figure 1). On mesure l'ampleur de la tâche.

Le temps de la décision ?

Qu'advient-il du hêtre d'ici 2100 ? L'examen des connaissances oblige à dire qu'on ne sait pas vraiment, même si on doit retenir l'idée que des modifications importantes interviendront pour cette essence.

Les gestionnaires forestiers, très conscients des évolutions à venir, souhaitent connaître les mesures d'adaptation qui permettraient de minimiser les inconvénients liés à ces modifications.

Certaines recommandations de bon sens ont été formulées sous des formes proches depuis une dizaine d'années (Bouhot et Barthod, 1993 ; Landmann, 2000 ; Riou-Nivert, 2005) :

- ne pas maintenir le hêtre dans des conditions stationnelles qui lui sont défavorables, en particulier du point de vue hydrique ;
- limiter la compétition pour l'eau par une sylviculture réduisant la densité des tiges ou, selon des modalités à définir, l'indice foliaire (qui détermine largement le besoin en eau). Une telle conduite devrait également réduire le risque vis-à-vis du vent.

Ces deux recommandations visent à prévenir et diminuer les risques. D'autres recommandations classiques, telles que le recours aux mélanges d'essences sont d'une efficacité plus difficile à évaluer, l'idée étant que les essences moins vulnérables pourraient prendre le relais en cas de dépérissement d'une autre d'entre elles. Le comportement respectif des différentes essences dans le climat futur sera déterminant, et mérite des investigations plus poussées.

D'autres précautions résultent directement de l'examen de la situation actuelle du hêtre : sensi-

bilité au tassement des sols, sensibilité aux tempêtes, ou de la connaissance de l'évolution des facteurs limitants : les risques de carences nutritives pour une essence dont l'augmentation de productivité passée est considérable restent à surveiller, de même, bien sûr, que les divers agents biotiques connus ou pouvant se manifester.

À quand alors une stratégie précise c'est-à-dire adaptée à l'échelle où le gestionnaire réalise ses plans d'aménagements (de la « région » à la « forêt ») ? Faut-il suggérer d'attendre dix ans, et de nouveaux progrès de la recherche ? Une autre stratégie semble actuellement se dégager, qui s'appuie sur deux constats :

- les recommandations listées ci-dessus nécessiteront une mobilisation coordonnée des outils disponibles (notamment des catalogues de station) et sans doute la mise au point d'outils de diagnostic nouveaux qui appréhendent mieux les paramètres importants comme la réserve en eau des sols. La cartographie des stations reste une étape incontournable. On pourra alors s'orienter vers une mise en adéquation plus poussée des essences et des stations ;
- la stratégie d'adaptation devra être révisée régulièrement en fonction des derniers résultats de la recherche scientifique et de la surveillance de la forêt.

Ce double constat incite à un travail conjoint entre scientifiques et gestionnaires plus poussé que ce qui a pu être le cas jusqu'ici. La meilleure façon de s'y prendre reste à découvrir, mais la volonté des deux parties d'aller dans cette direction semble acquise. La co-construction d'une stratégie, qui se situe sur le terrain de l'expertise, doit permettre de répondre à des questions plus complexes, par exemple : faut-il, et si oui, comment envisager une transformation active des hêtraies de l'Ouest ? les orientations et recommandations techniques en vigueur concernant

le hêtre vont-elles toutes dans le bon sens ? etc. Cette analyse doit également tenir compte de l'évolution socio-économique dont l'influence sur la forêt pourra peser lourdement sur la gestion de la hêtraie française : c'est un défi que de gérer conjointement les deux dimensions – écologique et socio-économique – de cette question.

Guy LANDMANN

GIP ECOFOR, Paris

landmann@gip-ecofor.org

Jean-Luc DUPOUEY

Vincent BADEAU

Yves LEFEVRE

Nathalie BRED

UMR INRA-UHP 1137

Écologie et Écophysiologie Forestières

Équipe Phyto-écologie forestière, Nancy

dupouey@nancy.inra.fr

badeau@nancy.inra.fr

lefevre@nancy.inra.fr

breda@nancy.inra.fr

Louis-Michel NAGELEISEN

DSF Antenne spécialisée, INRA

Nancy

nageleisen.dsf@wanadoo.fr

Isabelle CHUINE

CNRS-CEFE Équipe BIOFLUX,

Montpellier

isabelle.chuine@cefe.cnrs.fr

François LEBOURGEOIS

UMR INRA-ENGREF 1092

LERFOB, Équipe Ecologie Forestière

ENGREF Nancy

lebourggeois@engref.fr

Bibliographie

BADEAU V., 1995. Etude dendroécologique du hêtre (*Fagus sylvatica* L) sur les plateaux calcaires de Lorraine : influence de la gestion sylvicole. Thèse, Université de Nancy I Henri Poincaré. 222 p.

BADEAU V., BRÉDAN., LANDMANN G., 1997. La récente crise de vitalité du hêtre en plaine semble largement liée aux déficits hydriques. Les

Cahiers du DSF, n°1-1997 (La Santé des Forêts [France] en 1996). Paris : Ministère de l'agriculture et de la pêche DERF, pp. 60-63

BADEAU V., 1999a. Étude des relations entre l'état sanitaire des peuplements forestiers et les conditions de l'environnement : premiers résultats de l'analyse spatio-temporelle de la partie française du réseau européen de suivi des dommages forestiers. Rapport final à la CE et à la DERF. Nancy : INRA. 172 p. + annexes.

BADEAU V., 1999b. Causes des variations de l'état des cimes : quelques enseignements tirés du réseau européen de suivi des dommages forestiers. Les Cahiers du DSF, n° 1-1999 (La Santé des Forêts [France] en 1998). Paris : Ministère de l'agriculture et de la pêche DERF, pp. 70-74

BADEAU V., DUPOUEY J.L., CLUZEAU C., DRAPIER J., LE BAS C., 2004. Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences forestières françaises. In : Rapport final, CARBOFOR. Séquestration de carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France : quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles. Volet D1. Programme GICC, INRA Bordeaux, 101-111 <en ligne : <http://www.nancy.inra.fr/extranet/com/carbofor/carbofor-D1-resume.htm> >

BADEAU V., DUPOUEY J.L., CLUZEAU C., DRAPIER J., 2005. Aires potentielles de répartition des essences forestières d'ici 2100. Forêt Entreprise, n°162, pp. 25-29

BECKER M., LEVY G., 1983. Installation et dynamique d'une population de semis de chêne en milieu hydromorphe sous l'influence de divers facteurs (lumière, régime hydrique, compétition herbacée). Acta Oecologica. Oecologia Plantarum, vol. 4 (18), n°3, pp. 299-317

BELGRAND M., 1983. Comportement de jeunes plants feuillus (chêne

pédonculé, chêne rouge, chêne sessile, hêtre) sur substrat ennoyé : adaptations racinaires : application à la mise en valeur forestière des pseudogleys. Thèse INA-PG. 188 p.

BELROSE V., NAGELEISEN L.M., RENAUD J.P., 2004. Les conséquences de la canicule et de la sécheresse sur la santé des forêts : bilan à la fin de l'année 2003. Information Santé des Forêts, décembre 2004. Paris : Ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche et de la ruralité DGFAR. 14 p.

BOCK J., VINKLER I., DUPLAT P., RENAUD J.P., BADEAU V., DUPOUEY J.L., 2005. Stabilité au vent des hêtraies : les enseignements de la tempête de 1999, Revue Forestière Française, vol. 57, n° 2 spécial « L'avenir du hêtre dans la forêt française », pp. 143-158

BOUHOT L., BARTHOD C., 1993. Utilisation des prévisions des modèles météorologiques pour le choix des essences forestières et la conduite des peuplements. La Santé des forêts [France] en 1992. Paris : Ministère de l'agriculture et de la pêche DERF, pp. 65-68

BREDA N., BARBAROUX C., DUFRENE E., 2002. Comparaison des dynamiques saisonnières de croissance, phénologie et réserves glucidiques chez le chêne sessile et le hêtre commun. Groupe d'Étude de l'Arbre, Biologie hivernale, Saint Flour, 22-22 mars 2002, Améglio T., Donès N. eds, Cdrom, ISBN 2-7380-1188-8

BREDA N., GRANIER A., AUSSENAC G., 2004. La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiological et influence sur les arbres forestiers. Revue Forestière Française, vol. 56, n° 2, pp. 109-131

CHUINE I., BEAUBIEN E., 2001. Phenology is a major determinant of temperate tree range. Ecology Letters, n° 4, pp. 500-510

DITTMAR C., ZECH W., ELLING W., 2003. Growth variations of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe : a dendroecological study. Forest Ecology and Management, vol. 173, pp. 63-78

DREYER E., 1994. Compared sensitivity of seedlings from 3 woody species (*Quercus robur* L, *Quercus rubra* L and *Fagus sylvatica* L) to water-logging and associated root hypoxia : effects on water relations and photosynthesis. Annales des Sciences Forestières, vol. 51, pp. 417-429

DUPOUEY J.L., 1992. Déplacement des aires de répartition des essences forestières et évolution de la composition des peuplements. In : Landmann G. (ed.), Les recherches en France sur les écosystèmes forestiers : actualités et perspectives. Paris : Ministère de l'agriculture et de la pêche (DERF), pp. 57-58

DAVIS M.B., SHAW R.G., ETTERSON J.R., 2005. Evolutionary responses to changing climate. Ecology, vol. 86, p. 1704-1714

GRANIER A., BADEAU V., BREDA N., 1995. Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. Revue Forestière Française, vol. 47, n° spécial « modélisation de la croissance des arbres forestiers et de la qualité des bois », pp. 59-68

HERBAUTS J., EL BAYAD J., GRUBER W., 1998. L'impact de l'exploitation forestière mécanisée sur la dégradation physique des sols : le cas des sols limoneux acides de la forêt de Soignes (Belgique). Revue Forestière Française, vol. 50, n°2, pp. 124-137

HUART O., RONDEUX J., 2001. Genèse, évolution et multiples facettes d'une maladie inhabituelle affectant le hêtre en région wallonne. Forêt wallonne, n°52, pp. 8-19

LAMANDE M., RANGER J., LEFEVRE Y., 2005. Effets de l'exploitation forestière sur la qualité des sols. Coll. Les dossiers forestiers, n°15. Paris : ONF. 131 p.

LANDMANN G., 2000. Le sylviculteur face aux changements climatiques : possibilités et limites de l'intervention humaine. In : REBETZ M., COMBE J. (éds) Quelle sylviculture pour les climats à venir ? Actes de la Journée romande, pp.37-42

LANDMANN G., BREDA N., HOULLIER F., DREYER E., FLOT J.L., 2003. Sécheresse et canicule de l'été 2003 : quelles conséquences pour les forêts françaises ? Revue Forestière Française, vol. 55, n° 4, pp. 229-306

LEBOURGEOIS F., BREDA N., ULRICH E., GRANIER A., 2005. Climate-tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). Trees, vol. 19, n°4, 2, pp. 385-401

LEBOURGEOIS F., 2005. Approche dendroécologique de la sensibilité du hêtre (*Fagus Sylvatica* L.) au climat en France et en Europe. Revue Forestière Française, vol. 57, n°1, pp. 33-50

LEVY G., BECKER M., GARREAU B., LEFEVRE Y., 1986. Comportement expérimental de semis de chêne pédonculé, chêne sessile et hêtre en présence d'une nappe d'eau dans le sol. Annales des Sciences Forestières, vol. 43, pp. 131-146

LEVY G., LEFEVRE Y., 2001. La forêt et sa culture sur sol à nappe temporaire : contraintes subies, choix des essences, interventions et gestion durable. Nancy : ENGREF. 223 p.

MORMICHE A., 1994. La gestion du dépérissement du hêtre en Normandie 1961-1988. Revue Forestière Française, vol. 46, n°5 spécial « Les dépérissements forestiers : causes connues et inconnues », pp. 586-590

NAGELEISEN L.M., 1993. Le point sur les dépérissements du hêtre. La Santé des Forêts [France] en 1992. Paris : Ministère de l'agriculture et de la pêche DERF, pp. 23-26

NAGELEISEN L.M., 1994. Le dépérissement actuel de feuillus divers : hêtre, merisier.... Revue Forestière Française vol. 46, n°5, n°spécial « Les dépérissements forestiers : causes connues et inconnues », pp. 554-562

NAGELEISEN L.M., 2002. Les principaux problèmes phytosanitaires du hêtre (annexe 4). In : Le hêtre autrement, G. ARMAND (coord.), Paris : IDF, pp. 216-229

NAGELEISEN L.M., HUART O., 2005. Problèmes sanitaires d'actualité en hêtraie : la maladie du hêtre dans les Ardennes. Revue Forestière Française, vol. 57, n° 2 spécial « L'avenir du Hêtre dans la forêt française », pp. 249-254

PERRIN R., 1977. Le dépérissement du hêtre. Revue Forestière Française, vol. 29, n°2, pp.101-126

PILARD-LANDEAU B., PIAT J., JOURDAIN M., FONTELLE D., 1994. Le dépérissement actuel du hêtre en Picardie. Revue Forestière Française, vol. 46, n° 5 spécial « Les dépérissements forestiers : causes connues et inconnues », pp. 547-553

Power S.A., 1994. Temporal trends in twig growth of *Fagus sylvatica* L. and their relationships with environmental factors. Forestry, vol. 67, pp. 13-30

RENAUD J.P., NAGELEISEN L.M., 2005. Les résultats 2004 du réseau européen de suivi des dommages forestiers. (La santé des forêts [France] en 2004) Paris : Ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche et de la ruralité DGFAR. <en ligne : http://www.agriculture.gouv.fr/spip/re-sources.themes.foretbois.protection-de-laforet.santedesforets_r314.html>

RIOU-NIVERT P., 2005. Changements climatiques et sylviculture. Forêt Entreprise, n°162, pp. 49-53

ROQUEPLO P., 1988. Pluies acides : menaces pour l'Europe. Paris : Economica. 357 p.

SEYNAVE I., GEGOUT J.C., HERVE J.C., DHOTE J.F., 2005. Facteurs écologiques et production du hêtre en France, Forêt-entreprise, sous presse.

SHUGART H.H., 1984. A theory of forest dynamics : the ecological implications of forest succession models. New York : Springer Verlag. 278 p.

STRIBLEY G.H., ASHMORE M.R., 2002. Quantitative changes in twig growth pattern of young woodland beech (*Fagus sylvatica* L.) in relation to climate and ozone pollution over 10 years. Forest Ecology and Management, vol. 157, pp. 191-204

SYKES M., PRENTICE I.C., CRAMER W., 1996. A bioclimatic model for the potential distributions of north European tree species under present and future climates. Journal of Biogeography, vol. 23, pp. 203-233

THUILLER W., LAVOREL S., ARAUJO M.B., SYKES M.T., PRENTICE I.C., 2005. Climate change threats to plant diversity in Europe. Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 102, pp. 8245-8250

Croissance en hauteur dominante du hêtre dans le Nord de la France : des courbes de référence qui intègrent les tendances à long terme

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. Originalité du travail : ces nouvelles courbes de référence intègrent les changements de productivité observés au cours du 20^e siècle. L'utilisation de ces courbes devrait donc permettre d'adapter au mieux la sylviculture aux nouvelles conditions de croissance des hêtraies.

La hauteur dominante est classiquement utilisée comme un indicateur de la productivité des peuplements. La connaissance de la hauteur atteinte à un âge de référence donné (par exemple 100 ans), que l'on appelle indice de fertilité, constitue ainsi l'entrée classique des tables de production, desquelles on peut déduire la production en volume. Estimer cet indice suppose de connaître la relation qui lie la hauteur dominante à l'âge du peuplement, dans des conditions de fertilité variées. La représentation graphique de cette relation définit ce que l'on appelle un faisceau de courbes.

Jusqu'alors, on ne disposait pas en France de faisceaux de courbes de référence, établis pour la croissance en hauteur dominante du hêtre dans un contexte national. Pour estimer l'indice de fertilité des peuplements réguliers de hêtre, on s'appuyait en pratique sur les faisceaux allemand ou anglais, selon la zone de production concernée, comme cela avait été préconisé dans les « Tables de production pour les forêts françaises » (voir la 2^e édition de 1984, présentée par B. Vannière). Ainsi, les courbes

« Schober » (1972 pour la première édition), établies pour le Nord-Ouest de l'Allemagne, et les courbes « Hamilton-Christie » (1971), pour la Grande-Bretagne, ont-elles été respectivement utilisées dans les secteurs nord-est et nord-ouest du pays.

Cette logique de proximité géographique trouve son origine dans la différence de forme qui caractérise les courbes de croissance de ces deux faisceaux. Assez tendues dans le faisceau allemand, elles plafonnent à des âges plus précoces dans le faisceau anglais.

La nécessité d'établir des courbes de croissance pour les hêtraies françaises

Si on ne peut exclure qu'une telle différence puisse être en partie liée à des aspects méthodologiques (nature des données de hauteur disponibles), il est vraisemblable qu'elle traduise une réelle spécificité du rythme de croissance du hêtre, dans ces deux secteurs. La question de la validité de ces faisceaux pour les hêtraies françaises, et de la nécessité d'en établir de nouveaux, était donc posée.

C'est dans ce contexte qu'une vaste campagne d'analyses de tiges a été organisée par le département Recherche - Développement de l'ONF, dans les hêtraies régulières de plaine du nord du pays, entre 1997 et 1999. L'objectif était d'échantillonner des peuplements assez âgés pour pouvoir décrire la majeure partie des courbes de croissance, tout en couvrant une large gamme de fertilités. Une démarche semblable avait été conduite auparavant pour le chêne sessile (Duplat et Tran-Ha, 1997).

Dans cette même période, le LERFoB (Laboratoire d'étude des ressources forêt-bois, Nancy) investiguait le thème de l'évolution à long terme de la productivité forestière, conséquence possible des changements de l'environnement. Des premières études sur cette question, commençant alors à s'établir un consensus en faveur d'une forte augmentation des rythmes de croissance (voir en France les travaux de l'équipe de Michel Becker à l'INRA Nancy, dont une synthèse est donnée dans Becker et al., 1994, complétée par la suite dans Badeau et al., 1996).

L'occasion s'est donc présentée de rechercher en parallèle une évolution historique de la croissance en hauteur dominante de ces mêmes hêtraies. Lors de la campagne précédemment mentionnée, nous avons cherché à apparier une partie des peuplements âgés du Nord-Est français à des peuplements plus jeunes, croissant dans des conditions stationnelles identiques. L'idée était alors de tester et caractériser une éventuelle évolution historique de la croissance en hauteur dominante (sur le siècle dernier), en comparant la croissance respective de ces deux générations. Une telle démarche a été étendue en 2003 au nord-ouest.

Notre objectif est ici de fournir des faisceaux de référence pour le hêtre dans le Nord de la France, dans une partie de sa zone de production. Il n'est pas d'exposer en détails nos résultats sur les changements de productivité du hêtre. Nous nous proposons cependant d'intégrer à ces faisceaux, de façon simplifiée et utile, les évolutions de la croissance en hauteur que nous avons pu constater.

Démarche méthodologique

Peuplements échantillonnés

À l'issue de la prospection réalisée par l'ONF en 1997-99, 86 peuplements, âgés de 90 à 200 ans, ont été échantillonnés. Ils appartiennent à trois ensembles géographiques, correspondant au Nord-Ouest, au Nord-Est et à l'Est du pays (Normandie / Picardie, Alsace/Lorraine et Champagne sud / Bourgogne / Franche-Comté).

Le secteur nord-ouest (32 peuplements dans 13 massifs) est lui-même scindé en deux sous-ensembles géographiques équilibrés, complétés par quelques peuplements disséminés :
- une zone « côtière », allant de l'embouchure de la Seine à celle de la Somme,
- une zone « intérieure », essentielle-ment dans les massifs forestiers de l'Oise.

Le secteur nord-est (36 peuplements dans 26 massifs) s'appuie pour une large part sur des peuplements du plateau Lorrain, et s'étend de l'Argonne aux Vosges, en se cantonnant dans ce dernier cas aux faibles altitudes (Vosges du nord, collines sous-vosgiennes de l'ouest du massif, et quelques peuplements à plus haute altitude en versant alsacien).

Le secteur est enfin comprend un nombre de peuplements plus modéré (18 peuplements dans 13 massifs). Il compte un premier ensemble de peuplements situés sur la moitié sud du plateau de Langres (Haute-Marne), un second ensemble d'importance équivalente, qui s'étend sur les avant-monts Jurassiens et le premier plateau du Jura, au sud de la rivière Doubs (entre Dôle et Montbéliard), et quelques peuplements plus dispersés venant compléter ce secteur par le sud-ouest (sud de la Côte d'Or et Saône-et-Loire).

Aux fins de nos études sur l'évolution de la productivité, 30 peuplements plus jeunes, âgés de 40 à 90 ans dans le Nord-Est, et de 50 à 120 ans dans le Nord-Ouest, sont venus compléter l'échantillon précédant, de façon à disposer d'une quinzaine de couples dans chaque région. Ils ont également été utilisés dans le présent cadre.

Le dernier secteur (est), en revanche, n'a pas fait l'objet d'une telle investigation par notre laboratoire. Or il n'y a pas de raison *a priori* de penser que la croissance des peuplements concernés ait pu être indemne d'une dérive positive. Si l'on se réfère aux études françaises et à la majorité des études européennes publiées à ce jour (Spiecker *et al.*, 1996), réalisées sur des essences et dans des contextes variés, le constat qui s'en dégage est – au moins sur le plan qualitatif – consensuel.

Cet effet potentiel est enregistré dans les courbes de croissance, et a pu les déformer partiellement. Sans

possibilité de le caractériser, on serait conduit à attribuer au seul effet de l'âge un signal qui ne lui est dû qu'en partie, et à produire en conséquence un faisceau de courbes qui l'incorporerait de façon implicite.

L'objectif présent est au contraire d'intégrer explicitement cette tendance aux faisceaux de courbes, ce qui implique en particulier de pouvoir tenir compte de la date de naissance des peuplements lors de leur utilisation. Nous avons donc écarté le secteur est pour la présente étude. Nos travaux sur la croissance du hêtre se poursuivront, et ces données de croissance feront l'objet d'une analyse ultérieure.

La localisation des peuplements que l'on a finalement conservés est indiquée sur la figure 1.

Reconstitution de la croissance en hauteur dominante

Selon un protocole établi et mis en oeuvre à l'ONF, 3 arbres dominants ont été abattus dans chaque peuplement pour en réaliser les analyses de tige. Ils correspondent aux 1^{er}, 3^e et 5^e plus gros arbres à 1,30 m, d'une placette de 6 ares installée à cet effet et représentative du peuplement. Une telle procédure garantit un échantillonnage sans biais de la hauteur dominante.

Les comptages de cernes ont été réalisés sur des rondelles prélevées à des hauteurs mesurées précisément, tous les 4 m environ dans la partie vendable, puis tous les 2 m dans le houppier. De même on a mesuré la hauteur totale de l'arbre. L'âge a été déterminé sur la première rondelle, prélevée à 0,30 m.

À partir des 3 courbes de croissance en hauteur alors obtenues, une courbe moyenne a été calculée pour chaque placette. Nous admettons qu'elle représente la croissance en hauteur dominante du peuplement (nous faisons l'hypothèse que la condition de dominance des 3 arbres a été vérifiée tout au long de leur développement).

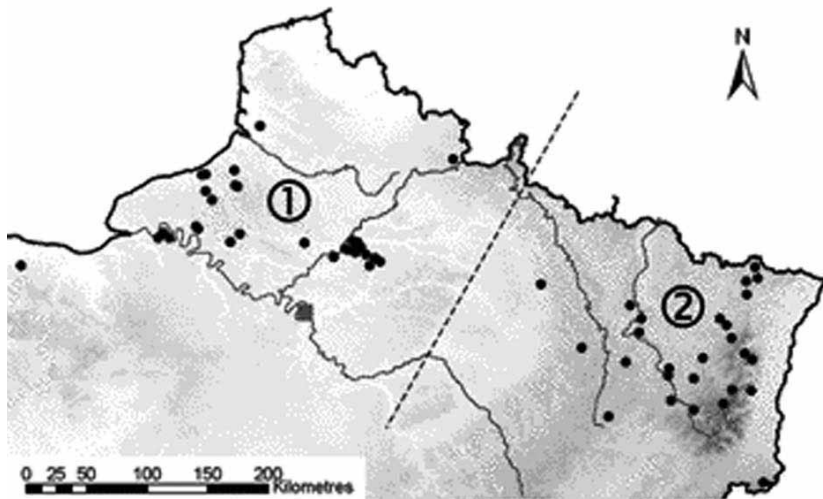


Fig. 1 : localisation des peuplements échantonnés et identification des faisceaux relatifs à chaque région

En l'absence de peuplements intermédiaires, l'axe de séparation des deux régions est positionné à titre indicatif.

Principe de construction d'un faisceau de courbes

Lorsque l'on cherche à analyser et modéliser un processus de croissance à partir de données expérimentales, on a traditionnellement recours à une équation de croissance (encore appelée modèle de croissance), comportant un faible nombre de paramètres. Elle correspond à une courbe sigmoïde : la vitesse de croissance passe par un maximum avant de décroître progressivement, comme on l'observe généralement pour la croissance en hauteur dominante. Les paramètres de cette équation sont ajustés au sens statistique aux données, c'est à dire de façon à ce que le modèle s'approche au mieux des courbes observées, issues des mesures.

Un faisceau de courbes est la représentation graphique d'un tel modèle de croissance (voir encadré 2). Il se traduit par des trajectoires de croissance dans le plan âge-hauteur. De nombreux modèles de croissance ont pu être utilisés et développés en sciences forestières. Une étape de la démarche consiste donc à rechercher le modèle le mieux adapté à la forme des courbes observées.

Notre modèle prédit initialement des accroissements en hauteur en fonction de la hauteur courante. Il dépend de trois paramètres, estimés lors de l'ajustement statistique :

- un paramètre de fertilité : il correspond ici à la vitesse maximale de croissance en hauteur, généralement atteinte à un stade précoce. Il s'apparente donc très fortement à l'indice de fertilité, au sens classique de la hauteur atteinte à un âge de référence donné. Sa valeur est propre à chaque peuplement. C'est ce paramètre qui contrôle la position des courbes dans le faisceau ;

- une hauteur maximale ou hauteur finale (asymptote) : généralement commune à l'ensemble des peuplements représentés, cette grandeur a un sens théorique, dans la mesure où on ne peut l'estimer directement en observant les courbes. En effet, la croissance en hauteur dominante semble ne pas devoir s'interrompre, même pour les peuplements les plus âgés (180 à 200 ans). Le rôle de ce paramètre est en réalité de contrôler le ralentissement que l'on observe dans les courbes de croissance, à mesure que l'âge du peuplement augmente. Selon la fertilité du peuplement, on s'approche plus ou moins rapidement de cette asymptote ;

- un paramètre de forme : en complément des deux paramètres précédents, il permet de préciser la forme de la courbe, c'est à dire son degré de courbure. Sa valeur est également commune à l'ensemble des peuplements.

Une fois le modèle ajusté, la fonction de croissance et les paramètres sont utilisés pour représenter les courbes de hauteur dominante en fonction de l'âge du peuplement. La largeur du faisceau correspond alors à la gamme de fertilités rencontrées dans les peuplements échantonnés, c'est à dire à la gamme de valeurs prises par le paramètre de fertilité. Le faisceau lui-même est constitué de courbes guides en nombre limité, ici étagées selon des niveaux réguliers de la hauteur dominante à 100 ans.

Pour des raisons pratiques, liées à la modélisation de l'évolution de la croissance à long terme (voir encadré 1 sur les changements de productivité), un modèle a été ajusté pour chacune des deux régions. Dans chaque cas, l'ensemble des peuplements jeunes et vieux dont on disposait ont été utilisés.

Elaboration des faisceaux de référence

Une variabilité régionale confirmée, des hêtraies continentales plus « hautes »

Les faisceaux Schober et Hamilton-Christie laissaient supposer des différences régionales dans la croissance en hauteur du hêtre, que nous confirmons ici. A des âges élevés, les peuplements de hêtre du Nord-Est semblent pouvoir croître davantage que ceux du Nord-Ouest, ce qui se traduit par une valeur plus grande du paramètre de hauteur maximale dans cette région (voir constante « a », encadré 2).

Tandis qu'on observe une concordance correcte entre les courbes Schober et celles du Nord-Est, la divergence entre les courbes Hamilton-Christie et les courbes du

Nord-Ouest est sensible : à partir de 100 ans, la croissance en hauteur est étonnamment faible sur les courbes anglaises, tandis que les peuplements peuvent encore gagner de l'ordre de 5 à 7 m jusqu'à 150 ans.

Une distinction semblait par ailleurs être opérée par le gestionnaire, entre les hêtraies côtières de Normandie et Picardie, et celles situées à l'intérieur des terres, plus au sud-est (Oise), et qui passaient pour être généralement plus hautes. On attribuait usuellement cette différence à un effet de la fertilité, supposée moins favorable en zone côtière. Nous confirmons également une différence de croissance entre ces secteurs. Elle ne se traduit cependant pas dans les valeurs du paramètre de fertilité, mais là encore, sur la forme des courbes, c'est à dire sur la croissance en hauteur au stade de la futaie adulte (paramètre de hauteur maximale). Par son ampleur plus modérée – de l'ordre de 1 à 2 m à 100 ans à niveau de fertilité identique – cette dernière différence ne justifie pas que soient distingués deux faisceaux dans le Nord-Ouest.

Un caractère graduel

Ces observations offrent une certaine cohérence sur le plan géographique, et laissent penser que cette variabilité de la forme des courbes pourrait présenter un caractère continu sur l'ensemble de la zone de production du hêtre. En autorisant pour chaque peuplement une variation du paramètre de hauteur maximale autour de la valeur moyenne régionale, il est ressorti que ce phénomène possédait effectivement un caractère graduel, avec des peuplements progressivement plus élevés à mesure que l'on s'avance dans les terres (voir figure 2).

Les fortes corrélations obtenues avec des variables climatiques (normales mensuelles sur la période 1961-1990) suggèrent un contrôle

climatique de ce schéma spatial. En dépit des corrélations entre les variables climatiques elles-mêmes, le long du gradient d'observation, deux axes structurants de cette variabilité peuvent être distingués. On repère ainsi des influences positives liées au froid hivernal (relations négatives marquées avec les températures hivernales, positives avec le nombre de jours de gel) et plus secondairement à la chaleur estivale.

En résumé, le passage d'une influence climatique atlantique à une influence plus continentale verrait donc augmenter l'aptitude des peuplements adultes à une croissance en hauteur plus soutenue. Cela signifie que les deux faisceaux régionaux ici publiés correspondent à un découpage territorial pratique, qui trouve sa justification dans l'existence d'une zone à faible surface forestière (Champagne, centre de la Picardie), dans laquelle on ne dispose d'ailleurs pas de peuplements échantillons (figure 1). Ils doivent cependant être considérés comme la déclinaison ponctuelle d'un phénomène vraisemblablement continu sur la zone de production du hêtre. A ce titre, il sera intéressant de véri-

fier si ce constat se généralise aux peuplements du secteur est.

S'agissant de la notion d'indice de fertilité, ces observations appellent également un commentaire. Ces indices prennent leur sens parce que l'on peut traduire la croissance en hauteur dominante, de manière habituelle et efficace, par un faisceau de courbes croissantes, étagées et non-sécantes, où un seul paramètre varie. Ce dernier contrôle la hauteur de chacune d'elles, et caractérise le niveau de fertilité de la station. Il est couramment exprimé par la hauteur atteinte à un âge de référence.

Dans le présent contexte du hêtre, nous mettons en évidence la nécessité d'un paramètre supplémentaire pour décrire la variabilité constatée. Puisqu'il semble traduire une influence du climat, on doit le considérer en toute logique comme un paramètre stationnel à part entière. Cette seconde source de variation signifie qu'il devient possible d'observer des courbes de croissance présentant une intersection, à partir du moment où les peuplements correspondants sont géographiquement éloignés sur un gradient de continentalité. De tels croisements

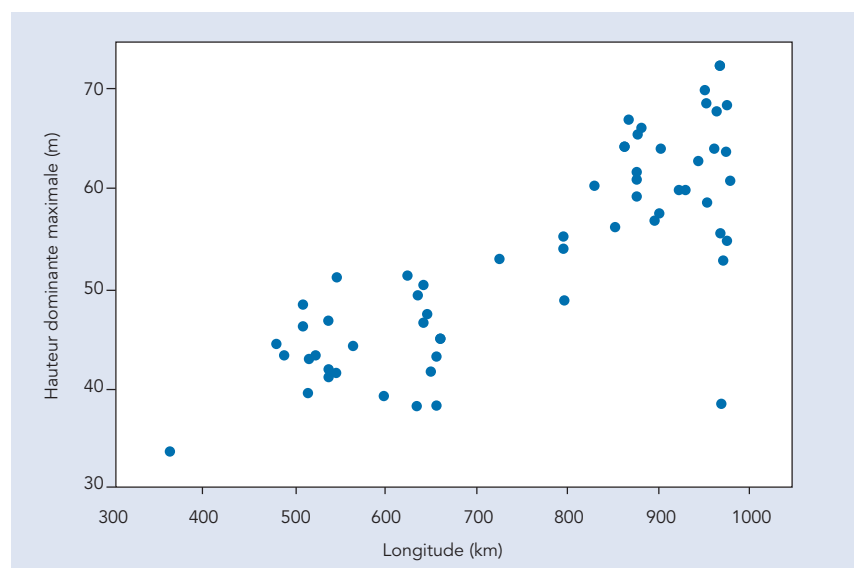


Fig. 2 : relation entre la hauteur dominante maximale théorique et la longitude des peuplements échantillonnés (localisés sur la figure 1)
La longitude est exprimée dans le système de projection Lambert II étendue (référence : méridien de Paris à 600 km).

de courbes ont par exemple pu être constatés dans le jeu de données correspondant aux peuplements du secteur nord-ouest (intersections entre les courbes des peuplements côtiers et de la zone intérieure).

Le concept d'indice de fertilité reste donc ici pertinent, mais à condition de remarquer le caractère local de sa signification (dans une zone homogène du point de vue climatique). On évitera donc de comparer des indices de fertilité qui seraient mesurés sur des hêtraies trop distantes, parce qu'ils ne préjugeraient pas nécessairement de différences de productivité.

Intégration des évolutions de croissance à long terme

Le fait que la productivité des peuplements a pu évoluer au cours du temps (voir encadré 1) vient affaiblir le concept de faisceau de courbes de référence. Leur élaboration suppose en effet que la croissance est au cours des temps, et sous la seule influence de l'âge des peuplements, pour un niveau de fertilité stable *a priori*. Dans ce nouveau contexte, le niveau de la croissance varie à chaque date, et la dérive à long terme se traduit par une déformation progressive des courbes de croissance vers de plus grandes hauteurs.

Même en intégrant le phénomène, un faisceau n'est désormais valide qu'une fois précisée la référence temporelle de son utilisation, par exemple la date de naissance des peuplements. A cet égard, il peut être décliné en autant de versions que de dates de naissance possibles correspondant aux peuplements actuels.

Les tendances mises en évidence valent pour le siècle dernier. Elles ont donc un caractère historique, et ne préjugent en rien de celles que pourraient connaître les hêtraies dans les décennies à venir. Il n'est à l'heure actuelle pas possible de prédire ces évolutions, ce qui tient en partie à l'identification des facteurs

1 - Changements de productivité au 20^e siècle : des tendances positives à caractère régional

La recherche de tendances à long terme sur la croissance en hauteur dominante des hêtraies a été menée pour chacune des deux régions Alsace-Lorraine (Hervé *et al.*, 2000 ; Bontemps *et al.*, 2005) et Normandie-Picardie.

Pour cela, des peuplements de générations distinctes (avec en pratique un écart d'âge moyen de l'ordre de 70 ans), sont associés en couples, au sein desquels les conditions stationnelles sont similaires. La comparaison de la croissance des deux générations permet alors de détecter une tendance à long terme.

L'indice de fertilité étant susceptible d'avoir évolué au cours du temps, il ne constitue plus un critère fixe d'appréciation de la fertilité. La proximité stationnelle a donc été évaluée sur la base des facteurs permanents de la production : topographie, exposition, pente, types de sols (profils pédologiques), complétés par des relevés de flore et d'humus.

Du point de vue de la modélisation, la démarche est similaire à celle indiquée dans la section "Principes de construction d'un faisceau de courbes". On introduit cependant un effet supplémentaire dans le modèle - en pratique un effet de la date - pour rendre compte de la tendance historique recherchée. Il vient multiplier le paramètre de fertilité du modèle, qui augmente alors en présence d'une tendance positive.

Une telle évolution de la vitesse de croissance a été détectée dans chaque région. Elle s'est essentiellement effectuée dans la seconde partie du siècle, avec une forte accélération à partir des années 1950. Des accidents climatiques, correspondant à des successions caractéristiques d'années aux étés secs (décennies 1940 et 1990 notamment) viennent infléchir, de façon parfois importante, l'évolution constatée.

Au delà de ces points communs, le niveau de cette dérive varie fortement d'une région à l'autre. Atteignant +50% sur le 20^e siècle dans le Nord-Est, il est moitié moindre dans le Nord-Ouest. A côté des facteurs globaux souvent invoqués (climat, CO₂ atmosphérique), il traduit donc l'implication probable de facteurs du milieu dont l'évolution est régionale (exemple des dépôts atmosphériques azotés).

L'interprétation de ces chiffres doit être précisée. Une tendance de 50% sur la vitesse de croissance ne signifie pas que les peuplements sont maintenant 50% plus hauts qu'ils ne l'étaient au début du siècle dernier. Elle s'interprète directement en termes de raccourcissement de la durée nécessaire pour atteindre un stade donné. A supposer que la croissance radiale des arbres de la récolte finale ait suivi la même évolution (ce qui semble plausible, la tendance identifiée sur la croissance radiale dominante dans le Nord-Est par une approche semblable étant de même ampleur), et à supposer que le niveau actuel de la productivité se maintienne, ce chiffre implique ainsi une réduction potentielle d'un tiers des durées de révolution dans le Nord-Est. Dans le Nord-Ouest, où la tendance rapportée est de l'ordre de 25%, cette réduction est d'un cinquième.

A titre d'illustration dans le Nord-Est, on a pu montrer qu'une hêtraie née en 1850 et conduite en éclaircies faibles atteignait un diamètre objectif de 60cm en 150 ans, contre 90 ans pour une même hêtraie née en 1950, et ayant subi une sylviculture dynamique (Bontemps *et al.*, 2005).

Cette tendance à long terme présente un caractère plus prononcé dans le Nord-Est que dans le secteur atlantique. Elle ne doit cependant pas être confondue avec le phénomène de continentalité constaté sur un gradient Ouest-Est, à l'origine de la différence de forme des courbes de croissance, (voir texte).

en cause. Pour que des courbes de référence soient applicables aux peuplements futurs, cette prédiction serait cependant nécessaire, ce qui peut constituer une limite à la présente démarche.

Pour établir les faisceaux de référence, nous avons choisi de cibler les jeunes peuplements, prioritaires du point de vue de la gestion. Pour la

simplicité du raisonnement, on considère une gamme d'âge s'étendant jusqu'à 100 ans, correspondant à des peuplements apparus entre 1900 et aujourd'hui :

■ Les courbes de croissance correspondant à des peuplements d'une centaine d'années ont connu une déformation progressive, dont on peut tenir compte, puisqu'on dispose de la chronique de l'évolution

qui a eu lieu au cours du 20^e siècle. Ces considérations conduisent à définir une première référence temporelle pour l'élaboration des faisceaux : les peuplements nés en 1900.

■ A l'opposé, pour des peuplements s'établissant actuellement, on ne connaît pas l'évolution future de leur croissance. En l'absence d'information, la difficulté peut être

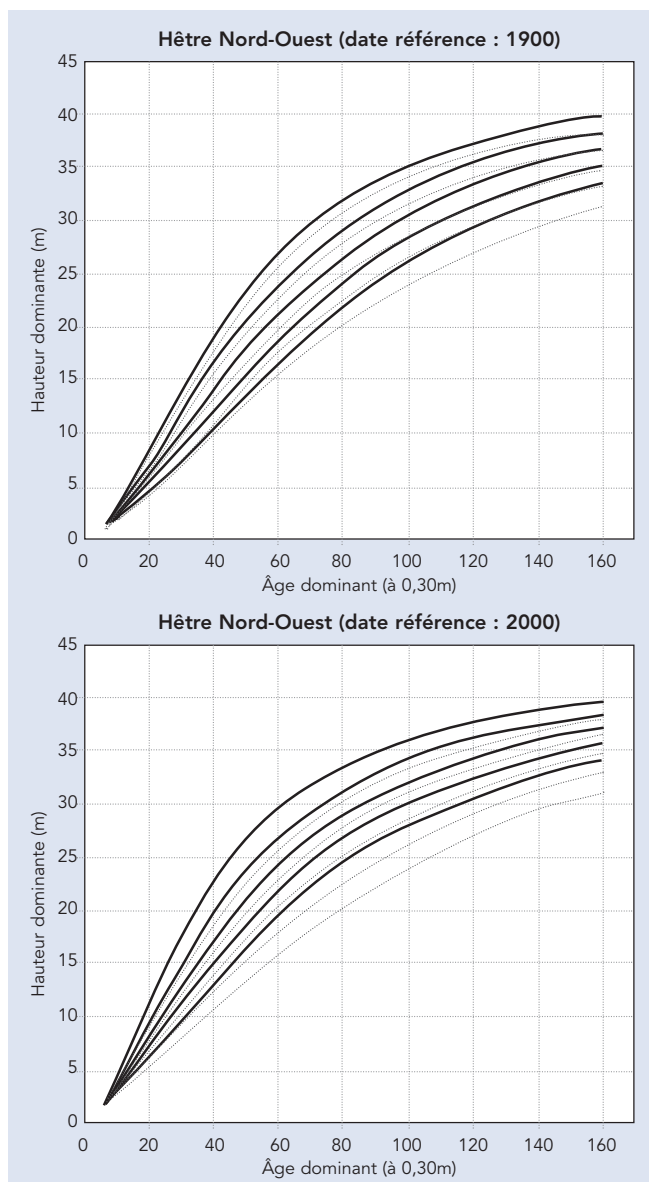


Fig. 3 : faisceaux de référence pour la croissance en hauteur dominante du Nord-Ouest de la France (désignés par ① sur la figure 1)

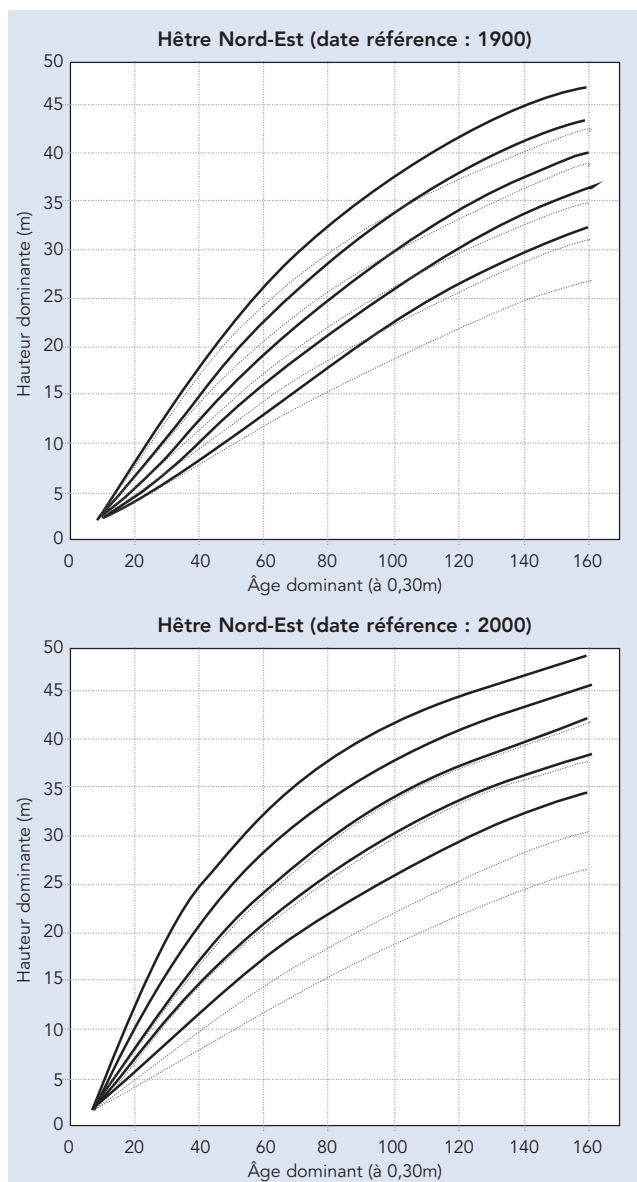


Fig. 4 : faisceaux de référence pour la croissance en hauteur dominante du Nord-Est de la France (désignés par ② sur la figure 1)

Le premier faisceau (date de référence 1900) correspond à des peuplements aujourd'hui âgés d'une centaine d'années. En l'absence de tendances à long terme, le faisceau en pointillés ferait référence.

Le second faisceau (date de référence 2000) est utilisable pour des peuplements dont l'âge est aujourd'hui inférieur ou égal à une cinquantaine d'années.

contournée en adoptant une attitude prudente et en posant l'hypothèse que ces peuplements connaîtront un niveau de croissance constant, égal à celui atteint à la fin du 20^e siècle. On suppose de plus que la forme des courbes de croissance ne sera pas modifiée. Ce raisonnement sert de base à une seconde référence temporelle : les peuplements nés en 2000.

Le fait de fixer la croissance à un niveau de référence signifie qu'il n'y a pas cette fois de déformation progressive des courbes, et que ce dernier faisceau est donc de même forme que celui que l'on aurait obtenu en l'absence de toute évolution. Les courbes s'en trouvent simplement décalées « vers le haut », au contraire du faisceau précédent dont les courbes sont véritablement déformées (voir les faisceaux, figures 3 et 4).

■ Considérons enfin des peuplements d'âge intermédiaire (50 ans), nés au milieu du siècle dernier. Parce que les tendances rapportées, faibles au début du siècle, ont connu une forte accélération à partir de cette date, il s'avère que le faisceau correspondant se superpose quasiment au faisceau intégrant le niveau de croissance de la fin du siècle. Cela signifie que l'ensemble des peuplements qui ont aujourd'hui moins de 50 ans peuvent être en réalité approchés par un faisceau unique.

Cela nous conduit finalement à proposer deux faisceaux pour chaque région identifiée : l'un valant pour des peuplements nés en 1900, et le second pour les peuplements les plus jeunes.

Quelques commentaires sur les faisceaux présentés

L'ensemble de faisceaux de référence présentés distingue donc deux ensembles géographiques et se décline en deux références temporelles différentes. Il vaut pour des peuplements dont l'âge actuel est au maximum d'une centaine d'années. La figure 1 indique les zones

d'utilisation de chacun d'entre eux. Le secteur Champagne-Picardie étant peu forestier, il induit une séparation naturelle de la zone de production du hêtre en deux ensembles régionaux. Combinée au phénomène de continentalité évoqué plus haut, cette réalité nous a conduits à représenter un axe de délimitation indicatif, orthogonal à un gradient de continentalité, mais dont la position précise importe finalement peu. La date de naissance des peuplements permet ensuite de choisir l'un ou l'autre des 2 faisceaux (figures 3 et 4).

Pour représenter ces faisceaux de courbes, on n'a pas tenu compte de la variabilité intra-régionale constatée sur le paramètre de hauteur maximale, pour lequel on a donc considéré la valeur moyenne, relativement à chaque région.

Ils sont définis jusqu'à un âge de 160 ans. Cela tient à la faible représentation de la classe des 160-200 ans dans le Nord-Est (4 peuplements). Cette classe est mieux pourvue dans le Nord-Ouest, avec 9 peuplements dont 7 dans la classe 160-180 ans. Pour

2 - Equations des courbes de croissance en hauteur dominante

La forme de l'équation de croissance que nous avons retenue est la même pour les deux secteurs régionaux (modèle de Korf). Afin d'en alléger la présentation, elle est introduite sous une forme récursive, comme suit :

$$H_t = a \exp \left[- \left(p_f b \text{chprod}(\text{date}_0 + t) + \left[\ln(a / H_{t-t_0}) \right]^{-1/c} \right) - c \right]$$

où H_t désigne la hauteur dominante à l'âge t (la référence choisie pour définir l'âge du peuplement est celle d'un âge nul à la hauteur de 0.30m), date_0 est la date de naissance du peuplement, p_f correspond au paramètre de fertilité, chprod est une fonction de forme quadratique permettant de tenir compte de l'évolution de la croissance à long terme, et a , b , et c sont des constantes dont la valeur dépend de la région d'étude (a est la hauteur maximale théorique en m). Les courbes sont définies à partir d'un âge t_0 et d'une hauteur H_0 .

Pour des valeurs de date comprises entre 1900 et 2000, on a :

$$\text{chprod}(\text{date}) = 1 + d_1 (\text{date} - 1900) + d_2 (\text{date} - 1900)^2$$

Pour une date antérieure à 1900, on a :

$$\text{chprod}(\text{date}) = 1$$

Et pour une date postérieure à 2000 :

$$\text{chprod}(\text{date}) = \text{chprod}(2000)$$

Pour obtenir des courbes sans évolution à long terme (courbes en pointillés sur les faisceaux), le terme « $\text{chprod}(\text{date}_0 + t)$ » est remplacé par la valeur 1.

Valeur des constantes

Constante	Nord-Ouest	Nord-Est
a	44.2	68.7
b	0.032	0.028
c	1.647	0.823
t_0	6	6
H_0	1.4	1.35
d_1	$1.245 \cdot 10^{-3}$	$2.03 \cdot 10^{-3}$
d_2	$1.74 \cdot 10^{-5}$	$3.96 \cdot 10^{-5}$
p_f (gamme observée)	0.29 – 0.58	0.21 – 0.53

l'homogénéité de la présentation, nous nous en sommes tenus à ce seuil, suffisant en pratique.

A des fins de comparaison, les courbes qui auraient cours en l'absence d'évolution à long terme sont également portées sur les faisceaux. Les équations et valeurs des paramètres à la base de ces faisceaux sont indiquées dans l'encadré 2.

Conclusion : un minimum de référence à compléter

Bien que décliné selon deux niveaux régionaux et à deux dates, ce système de référence constitue un minimum acceptable, si l'on souhaite tenir compte des observations réalisées récemment sur la variabilité régionale et temporelle de la croissance en hauteur dominante des hêtraies du Nord de la France. A supposer que les hêtraies du secteur est aient un comportement différencié du point de vue de la croissance, on pourrait de plus être conduit à le compléter. La variabilité régionale repose elle-même sur deux phénomènes distincts – influence probable du climat moyen et changements de productivité au caractère régional – jouant tous deux dans le sens d'une individualisation des deux grands secteurs régionaux de production du hêtre.

A mesure que l'on progresse dans la compréhension du déterminisme de la croissance et l'identification des facteurs en jeu, il ne fait pas de doute que de tels systèmes de références pourront être déclinés de plus en plus finement, en fonction des conditions locales de production. Cela signifie aussi que de nouveaux outils de gestion devront être mis en œuvre. Sur le thème des courbes de références, il faudra probablement préférer des outils plus flexibles, à un système donné de référence graphique. L'utilisation de logiciels de simulation de la croissance permettrait de tenir compte, rapidement et locale-

ment, de l'ensemble des facteurs dont l'influence est avérée.

Les courbes de croissance ici présentées ont été introduites dans le simulateur de croissance et de production Fagacées (hêtre et chêne sessile), développé dans notre laboratoire par J.-F. Dhôte (Dhôte et al., 2005), et implémenté sur la plate-forme logicielle CAPSIS (de Coligny et al., 2004). De façon simple, on peut ainsi explorer la liaison entre indice de fertilité et production des peuplements, tout en tenant compte des tendances à long terme déjà constatées, à un niveau régional.

Jean-Daniel BONTEMPS

Laboratoire d'étude des ressources
forêt-bois
(LERFoB, UMR 1092 INRA/ENGREF),
Nancy

Pierre DUPLAT

Département Recherche
ONF, Fontainebleau

Jean-Christophe HERVE

LERFoB, Nancy

Jean-François DHÔTE

LERFoB, Nancy

Remerciements

Nos remerciements s'adressent à l'Office National des Forêts, pour la mise à disposition des données issues de la campagne d'analyses de tiges dans les hêtraies du Nord de la France. Ils vont également aux personnels des anciennes Sections techniques inter-régionales Nord-Ouest, Nord-Est et Est de l'ONF, sans la contribution desquelles la réalisation de cette campagne n'aurait pas été permise. Nous voudrions remercier plus particulièrement Jérôme Piat, de l'EXSTIR Nord-Ouest, grâce auquel il a été possible de retrouver les peuplements échantillonnés 5 ans auparavant dans cette région, en vue de notre étude sur les changements de productivité des hêtraies.

Les travaux rapportés dans la présente contribution font l'objet d'un financement de l'Office National des Forêts dans le cadre de la convention de recherche ONF-LERFoB 2004-2005 « Production et Qualité des Feuillus Sociaux », que nous remercions à nouveau.

Bibliographie

BECKER M., BERT G.D., BOUCHON J., PICARD J.F., ULRICH E., 1994. Tendances à long terme observées dans la croissance de divers feuillus et résineux du Nord-Est de la France depuis le milieu du XIX^e siècle. *Revue Forestière Française*, vol. 46, n° 4, pp 335-341

BADEAU V., BECKER M., BERT D., DUPOUEY J.L., LEBOURGEOIS F., PICARD J.F., 1996. Long-term growth trends of trees : ten years of dendrochronological studies in France. In : SPIECKER H., MIELIKÄINEN K., KÖHL M., SKOVSGAARD J.P., 1996. Growth trends in european forests. EFI, Berlin : Springer Verlag, pp 167-181

BONTEMPS J.D., VALLET P., HERVE J.C., RITTIE D., DUPOUEY J.L., DHÔTE J.F., 2005. Des hêtraies qui poussent de plus en plus vite : vers une forte diminution de leur âge d'exploitabilité ? *Revue Forestière Française*, vol. 57, n° 2, pp 123-142

COLIGNY F. de, ANCELIN P., CORNU G., COURBAUD B., DREYFUS P., GOREAUD F., GOURLET-FLEURY S., MEREDIEU C., ORAZIO C., SAINT-ANDRÉ L., 2004. Capsis : Computer-Aided Projection for Strategies In Silviculture : open architecture for a shared forest-modelling platform. In : Proceedings of the IUFRO Working Party S5.01-04 conference (September 2002) Harrison, British Columbia, Canada, pp 371-380

DHÔTE J.F., LE MOGUEDEC G., 2005. Présentation du modèle Fagacées. Document interne du LERFoB, UMR 1092 Inra-Engref.

DUPLAT P., TRAN-HA M., 1997. Modélisation de la croissance en hauteur dominante du chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl) en France : variabilité inter-régionale et effet de la période récente (1959-1993). *Annales des Sciences Forestières*, vol. 54, n° 7, pp. 611-634

HAMILTON G.J., CHRISTIE J.M., 1971. *Forest management tables (metric)*. Londres : Her Majesty's Stationery Office.

HERVE J.C., DHOTE J.F., DUPOUEY J.L., 2000. Evolution de la vitesse de croissance en hauteur dominante au cours du XX^e siècle dans les hêtraies régulières du Nord-Est. Rapport de convention ECOFOR/INRA 99.38, composante 4, pp. 1-33

SCHOBBER R., 1987. *Ertragstafeln wichtiger Baumarten*. 3^e édition. Frankfurt am Main : Sauerländer's Verlag. 166 p.

SPIECKER H., MIELIKÄINEN K., KÖHL M., J.P. SKOVSGAARD, 1996. *Growth trends in european forests*. EFI, Berlin : Springer Verlag. 372 p.

VANNIERE B., 1984. *Tables de production pour les forêts françaises*. 2^e édition. Nancy : ENGREF. 158 p.



F. Isnard, ONF



P. Le Gouguet, ONF

Campagne d'analyse de tiges (1988).

Découpage de la rondelle de base à 0,30 m (FD de Lyons) et préparation des rondelles (Compiègne)

Comportement du hêtre sous abri : les intérêts d'une bonne gestion du couvert

La maîtrise de l'environnement lumineux est une préoccupation permanente du sylviculteur soucieux de l'évolution de ses peuplements, particulièrement lors de l'étape juvénile qui conditionne l'acquisition d'un potentiel initial de tiges vigoureuses et de qualité, ainsi qu'un niveau satisfaisant de diversité. Cet article, après avoir fait le point des connaissances actuelles sur la relation entre lumière et développement du jeune hêtre, propose quelques éléments de réflexion sur les conséquences à en tirer en matière de gestion et de sylviculture. Il attire l'attention sur les points délicats dont il faut tenir compte, tant en plantation qu'en régénération naturelle.

Depuis fort longtemps, on recommande le maintien d'un abri (voir définition en encadré) lors des toutes premières années d'installation du jeune hêtre, prenant appui sur son comportement d'essence d'ombre, et sur les « classiques » difficultés de renouvellement rencontrées en plein découvert (coups de chaleur estivale, gels tardifs, forme défavorable). En régénération naturelle comme en plantation sous abri, la mise en pleine lumière intervient ensuite souvent rapidement, dans un délai proche d'une dizaine d'années, parfois moins.

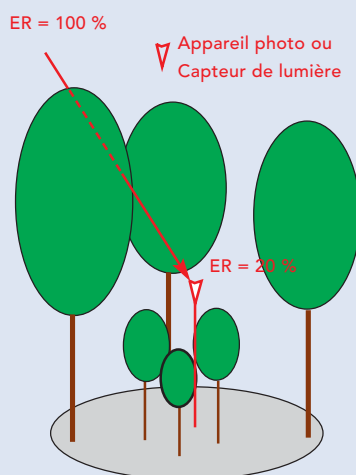
Les problématiques sylvicoles actuelles (conversion des TSF en futaie irrégulière, transformation de peuplements résineux en peuplements feuillus, allongement des durées de régénération en futaie régulière) nécessitent une connaissance renouvelée de l'impact du couvert, dans la perspective d'un champ de questions plus vaste : quel impact du couvert sur l'installation initiale et la mortalité des semis ? quelle incidence du maintien prolongé du couvert sur les propriétés individuelles des tiges, sur la structure et la dynamique de la régénération ? quelle réaction

Les notions d'abri, d'éclairement relatif, et d'ambiance forestière...

Dans cet article, nous utilisons les termes de **couvert ou abri** pour désigner les situations où la présence d'une strate supérieure amène un ombrage au sommet des tiges de la régénération. Cet ombrage issu d'un abri « supérieur » doit donc être bien différencié de la compétition latérale au sein de la régénération.

L'éclairement relatif (ER) au sommet de la régénération peut être mesuré par des photographies hémisphériques ou des capteurs de lumière : il définit **le pourcentage de lumière qui parvient à l'endroit de la mesure, rapporté à l'éclairement à découvert (ER = 100 % en plein découvert)**.

La situation d'abri a pour conséquence évidente une diminution de l'éclairement disponible pour la photosynthèse des semis. Mais elle est associée à une modification plus globale des conditions microclimatiques (température de l'air et du sol, vent, humidité atmosphérique), entraînant une réduction des risques de gel ainsi qu'une diminution du pouvoir évaporant de l'air. La compétition racinaire (eau, éléments minéraux) exercée par le peuplement sur pied et par la végétation au sol est également modifiée en comparaison du plein découvert.



L'ensemble de ces modifications associées à l'ombrage est qualifié d'« **ambiance forestière** ». Dans cet article, cette « ambiance » est appréhendée à partir de l'éclairement relatif (ER) mesuré, simplifié en 4 classes : **abri très dense (ER < 10 %)** ; **abri dense (10 à 25 %)** ; **abri léger (25 à 50 %)** ; **plein découvert (plus de 50 %)**.

lors d'une mise en lumière plus ou moins progressive, ou au contraire lors d'une phase de fermeture du couvert ?

Les éléments de réponse à ces questions importantes sont aujourd'hui encore très partiels. Cet article tente, à partir des résultats de différents dispositifs expérimentaux, de préciser le comportement du hêtre en fonction du niveau d'ombrage, à partir d'observations en régénération naturelle et en plantation. La comparaison des dispositifs entre eux a été réalisée sur la base de l'éclairement relatif mesuré (voir encadré), simplifié en 4 classes : **abri très dense (ER < 10 %)** ; **abri dense (10 à 25 %)** ; **abri léger (25 à 50 %)** ; **plein découvert (plus de 50 %)**.

Abri et croissance des tiges : la croissance nettement favorisée par l'éclairement

La croissance des tiges de jeunes hêtres est globalement très nettement favorisée par l'éclairement (figure 1), et le maintien d'un abri dense ou très dense conduit assez rapidement à des écarts significatifs avec le plein éclairement. Le tableau 1 rassemble différentes observations de croissance en hauteur en régénération naturelle et plantation, dans des conditions d'abri stables dans le temps. La croissance sous abri léger est le plus souvent peu différente de celle observée à découvert, avec une tendance à un effet bénéfique de l'abri dans les toutes premières années en plantation (généralement au cours des 5 premières années).

Les conditions stationnelles peuvent modifier de manière importante la réponse des semis à l'ombrage. Ainsi, dans un exemple comparant la réaction de semis de hêtre à différents niveaux d'abri dans des conditions stationnelles contrastées (figure. 2), nous observons une croissance sous abri qui,

comparée à celle observée en plein découvert, est beaucoup plus réduite en FD Retz, dans des conditions d'alimentation hydrique non limitantes, qu'en FD Auberive, sur un sol calcaire superficiel. Dans certaines conditions (alimentation hydrique très limitante, forte concurrence herbacée, forte occurrence de gels), la croissance en plein découvert peut même être notablement inférieure à celle observée sous un couvert léger, surtout pendant les premières années d'installation des semis.

La figure 1 montre clairement que la croissance en diamètre est plus sensible à une diminution de l'éclairement que la croissance en hauteur : un abri dense amène, par rapport au plein découvert, une réduction de croissance égale à 31 % en hauteur et 46 % en diamètre. Cette capacité à maintenir une croissance en hauteur élevée pour des niveaux d'ombrage importants, alors que la croissance en diamètre est plus sensiblement réduite, contribue vraisemblablement à la forte compétitivité du hêtre en situation d'ombrage.

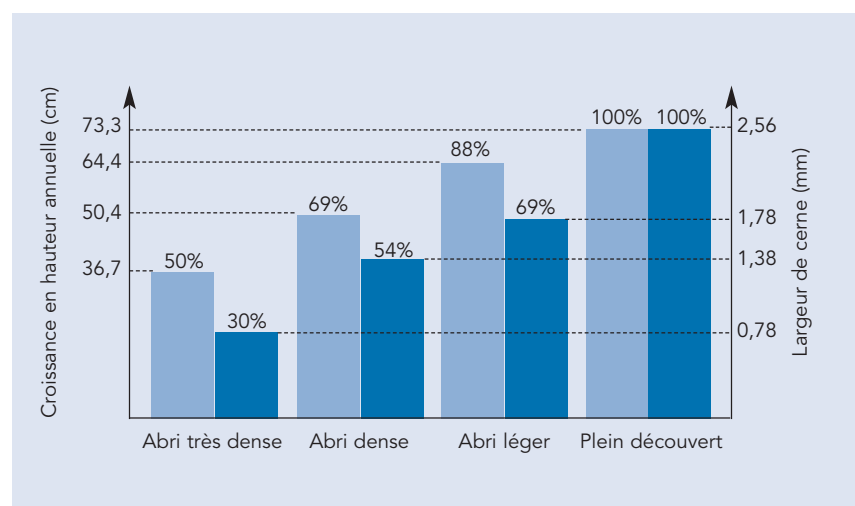


Fig. 1 : incidence de l'éclairement au sommet de la régénération sur la croissance des tiges en hauteur (en bleu clair) et en diamètre (en bleu foncé). Valeurs moyennes établies sur la période 1991-1995 sur des tiges dominantes et codominantes de gaulis issus de régénérations naturelles denses (18 placettes en trouées, hauteurs comprises entre 4 et 10 m) en FD de Compiègne (d'après Vinkler, 2005)

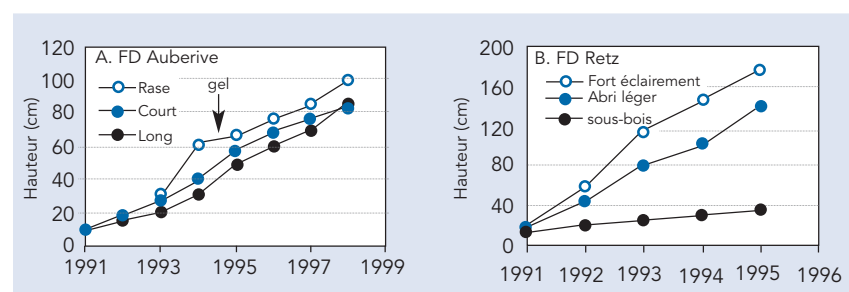


Fig. 2 : croissance en hauteur de semis naturels dans différentes conditions d'abri

A. FD Auberive (sols superficiels à faible réserve en eau) – Scénarios de régénération d'un TSF à dominante hêtre (faînée 1990) : coupe rase = plein éclairement sur semis d'un an ; scénario court = première intervention vigoureuse sur semis d'un an (abri léger) puis définitive après 5 ans ; scénario long = coupes progressives en 4 passages (après 1, 5, 9 et 13 ans)
B. FD Retz (sol profond sans contrainte) – Régénération naturelle d'une hêtraie dense après chablis (faînée 1990) : fort éclaircissement = chablis important en 1990 (ER = 80 %) ; abri léger = chablis modéré en 1990 suivi d'une secondaire durant l'hiver 1992 – 1993 ; sous-bois = semis sous hêtraie très dense n'ayant pas bénéficié d'ouverture.

	Abri léger (25-50%)	Abri dense (10-25%)	Abri très dense (<10%)
Plantations			
Essai Von Lüpke (1982, Allemagne), croissance observée au cours des 4 premières années de plantation (hauteur à découvert finale = 52 cm) Abri = hêtraie adulte (trouées), sol avec végétation herbacée	1,33	0,61	-
Essai Gemmel et al (1996, Suède), croissance observée au cours des 3 premières années de plantation (hauteur finale à découvert = 79 cm) Abri = hêtraie adulte (trouée)	1,14	0,76	-
Essai Ningre et Frochot (1999, FD Haye), croissance observée au cours des 3 premières années de plantation (hauteur finale à découvert = 72 cm) Abri = TSF de hêtre	1,26	0,19 à 0,23	-
Essai ONF (STIR Est), FC Montbéliard (Morel et Planchais, 1999), croissance observée au cours des 8 premières années de plantation (hauteur à découvert = 3 m) Abri = taillis vieilli de charme (vertical = dense, latéral = léger)	0,96	0,77	-
Regénérations naturelles			
Essai Agestam et al (2003, Suède), semis naturels, croissance observée au cours des 7 premières années (hauteur à découvert finale = 45 cm) Abri = hêtraie adulte (trouée)	0,92	0,62	-
Essai ONF (STIR Est), FD Auberive, semis naturels, croissance observée au cours des 6 premières années 1991 à 1996 (hauteur finale à découvert = 76 cm) Abri = TSF vieilli de hêtre	0,90	0,79	-
Essai Planchais (1995), FD Retz, semis naturels, croissance observée au cours des 5 premières années (hauteur finale à découvert = 1,80 m) Abri = hêtraie pure très dense	0,79	-	0,20
Essai Vinkler (2005), FD Compiègne, (semis naturels âgés de 10 à 25 ans en trouées, croissance mesurée sur 5 années consécutives, hauteur finale à découvert = 7,60 m) Abri = hêtraie pure	0,96	0,78	0,34

Tab. 1 : croissance en hauteur sous abri rapportée à la croissance observée à découvert : synthèse de différents essais expérimentaux en régénération naturelle et en plantation avec abri

L'effet « éclaircissement » est significatif dans l'ensemble des essais mentionnés. Dans l'ensemble des dispositifs, le niveau d'éclaircissement est resté relativement stable sur l'ensemble des périodes de mesure considérées (pas d'intervention sylvicole, hormis faible intervention dans l'abri dense en FC Montbéliard).

	Absence d'abri (100 %)	Abri léger (25-50 %)	Abri dense (10-25 %)
Essai ONF – FC Montbéliard (Morel et Planchais, 1999) après 8 ans de plantation Abri = taillis vieilli de charme (vertical = dense, latéral = léger)	26	25	19
Essai INRA-ONF (Ningre et Frochot) FD Haye après 2 ans de plantation Sol très superficiel	Sol maintenu hors compétition herbacée ; travail localisé du sol avant plantation (sauf *)		
Abri : TSF hêtre-charme (vertical = dense, latéral = léger)	31 (*67 sans travail du sol)	23	16
Essai Von Lüpke (1982, Allemagne) après 8 ans de plantation Abri = hêtraie adulte (trouées)	36	20	36
* Dégâts importants de gel et rongeurs	> 95*	75	59

Tab. 2 : taux de mortalité (%) observé dans différents essais expérimentaux de plantation avec abri en forêt

Le caractère d'essence d'ombre du hêtre diminue avec les dimensions et l'âge des arbres, ce qui se traduit par une augmentation, quand les arbres grandissent, du seuil d'éclairement en dessous duquel la croissance chute. Pour des tiges hautes de 6 à 8 m, ce seuil est proche de 25 à 30 %. Il est plus faible, voisin de 15 à 20 % pour de plus jeunes tiges (1 à 2 m) (Süner et Röhrig, 1980 ; Burschel et Schmaltz, 1965).

Abri et survie des semis

Le plein découvert : des risques à ne pas négliger

Une plantation avec abri dense ou léger permet le plus souvent une amélioration des taux de survie en comparaison avec le plein découvert (tableau 2). Les difficultés rencontrées lors d'une exposition précoce au plein découvert sont multiples : le gel en premier lieu, qui peut être à l'origine d'une mortalité

importante (voir encadré), la végétation concurrente, les coups de chaleur sont les facteurs de risque les plus fréquents, auxquels peuvent s'ajouter des facteurs biotiques (Harley, 1939, Le Tacon et Malphettes, 1974 ; Agestam et al, 2003). Il est cependant rare qu'une régénération naturelle soit entièrement compromise de ce fait. En revanche, en plantation, du fait d'une alimentation hydrique des plants encore précaire les premières années, d'un accompagnement ligneux souvent insuffisant et de la présence fréquente de graminées, les effets néfastes du plein découvert sont plus marqués. Cette ambiance forestière avec abri est particulièrement utile dans les contextes stationnels ou climatiques difficiles (gels tardifs fréquents, sols superficiels ou exposés au sud ou à l'est).

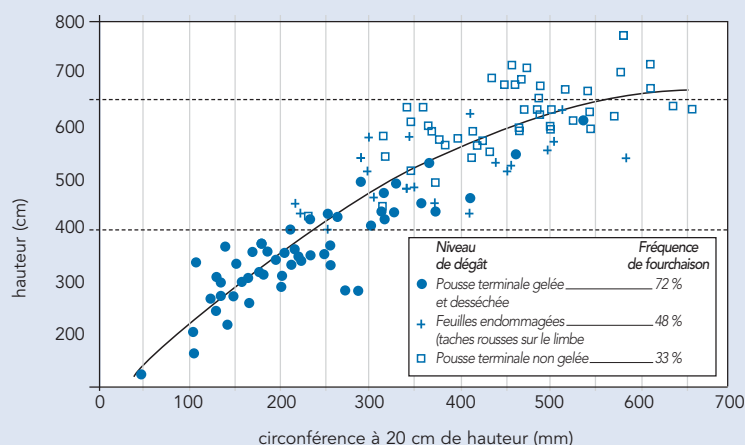
Le gel : une contrainte à ne pas négliger chez le hêtre

Une étude conduite dans une jeune plantation expérimentale de hêtre en plein découvert située à Lyons-La-Forêt (76) a explicitement démontré la relation de cause à effet entre dégât de gel tardif sur la pousse terminale et apparition de fourches, et confirmé la réduction de croissance sous l'effet du gel. Un hêtre à pousse gelée a ainsi un risque plus de 2 fois plus grand de porter une fourche (risque de fourchaison de 72 %) qu'un hêtre indemne de dégâts (risque de fourchaison de 33 %) (Ningre et Colin 2006).

De plus, il est apparu dans cette plantation que les 3 niveaux de dégâts identifiés (pousse totalement gelée, pousse où seules les feuilles avaient été atteintes, pousse indemne) étaient étroitement liés à la hauteur du plant (figure). Ce gel tardif était caractérisé par une hauteur limite des dégâts de 7 mètres et une zone de dégât intense et général dans les 4 premiers mètres. Ces observations montrent bien que le seuil de sensibilité à une gelée tardive peut être en plaine bien supérieur aux 2 premiers mètres classiquement évoqués. L'attention du gestionnaire doit être soutenue dans cette phase déterminante pour la formation d'une grume de qualité, où le peuplement forestier est particulièrement sensible au gel.

On ne peut que recommander dans les zones à risque de gelée, d'utiliser les techniques sylvicoles qui permettent de diminuer préventivement ce risque, comme le maintien ou la mise en place d'un abri latéral (Aussenac 1973, Ningre et al 1997) ou celles qui diminuent de manière curative son impact en pratiquant des défouichages raisonnés (Armand 2000).

Ci-dessous : hauteur totale en fonction de la circonférence en 1994, répartition des hêtres selon l'intensité des dégâts de gel du 15 mai 1995 sur la pousse printanière terminale de l'axe principal de chaque plant (placeau à la densité 625/ha)



Une banque de semis présents même sous couvert fermé

Le comportement d'essence d'ombre du hêtre s'exprime dans la remarquable capacité des semis à germer et survivre à des niveaux d'éclairement très faibles (figure 3a). La limite de survie des semis est généralement proche de 3 à 4 % de l'éclairement en plein découvert, parfois moins dans les contextes climatiques et stationnels les plus favorables. Dans ces conditions limites, la croissance est alors très faible, voire nulle, et le taux de survie des semis peut diminuer rapidement en quelques années. Les observations sur des semis dominants dans différentes modalités d'abri en régénération naturelle font apparaître une mortalité parfois accrue sous abri dense (Oosterbaan et Van Hees, 1989, Süner et Röhrig, 1980), mais c'est surtout sous un abri particulièrement dense (ER < 5 %) que le taux de survie diminue fortement (Szwagrzyk et al, 2001, Madsen et Larsen, 1997). Le plus souvent, l'éclairement observé sous couvert fermé (entre 5 et 10 %) suffit à assurer la survie d'un nombre suffisant de semis pendant de très longues périodes (plusieurs dizaines d'an-

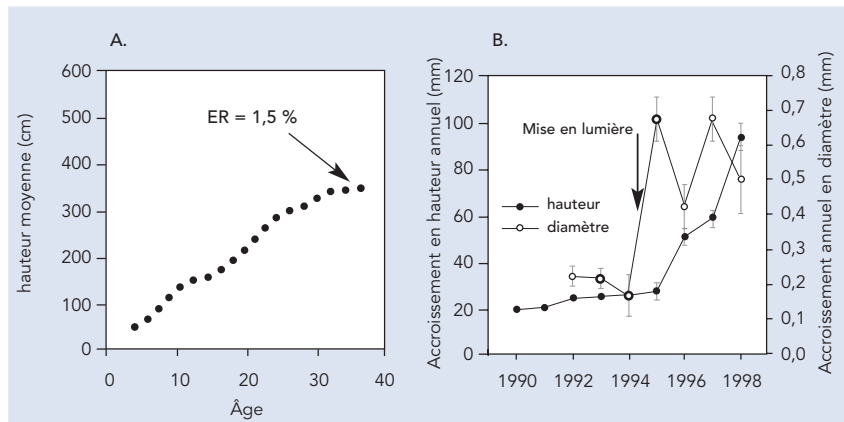


Fig. 3 : évolution de la croissance en hauteur et en diamètre de semis en régénération naturelle sous couvert

A. FD Compiègne : tiges restées pendant plus d'une trentaine d'années sous couvert très dense (ER en 1995 : 1,5 %) – D'après Vinkler, 2005

B. FD Haye : tiges ayant bénéficié d'une trouée durant l'hiver 1994 – 1995 (ER avant ouverture < 5 % ; ER après ouverture compris entre 25 et 50 %) – D'après collet et al, 2001

nées). Dans la plupart des contextes stationnels, cette régénération sous couvert est plutôt aisée. Elle est cependant plus stable dans le temps, plus dense dans les hêtraies peu ou modérément capitalisées qui bénéficient de faînéées plus importantes, et qui présentent un éclaircissement au sol non limitant pour la survie des semis (Szwagrzyk et al, 2001 ; Madsen et Larsen, 1997).

Ces semis constituent ainsi une banque dont certains pourront participer à la formation du peuplement futur, même après de nombreuses années passées sous couvert. Le stock de cette banque est progressivement renouvelé, les semis les moins vigoureux disparaissant et de nouveaux semis apparaissant régulièrement. Des relevés démographiques effectués dans des peuplements fermés montrent une gamme d'âge des semis étendue (de 1 an à plusieurs dizaines d'années), avec une plus forte représentation des tranches d'âge correspondant aux années de bonne faînée.

Abri et forme des tiges

La forme des tiges nettement améliorée par un ombrage modéré...

L'incidence favorable de l'ombrage sur la forme des arbres est particuliè-

rement marquée chez le hêtre, notamment du fait de l'ampleur et de la précocité d'apparition des fourches chez cette espèce (Ningre 1997). Cet effet de l'ombrage est observé depuis longtemps, tant en régénération naturelle qu'en plantation (Kürth, 1946 ; Dupré et Thiébaud, 1982 ; Morel et Planchais, 1999 ; Vinkler, 2005). En situation d'abri, les branches sont bien plus fines et plus horizontales (figure 4 ; tableau 3), ce qui facilite d'autant leur aptitude à l'élagage naturel. Le risque de mise en place de fourches est également fortement réduit (tableau 4). Ces

effets très favorables s'amplifient avec le niveau d'ombrage. Néanmoins, un abri très dense (éclairage inférieur à 10 % du plein découvert) devient néfaste car il compromet souvent la verticalité et la dominance apicale de la tige (Vinkler, 2005 ; Lüpke, 2005), selon deux processus qui se combinent :

■ l'élancement des tiges augmente fortement avec l'ombrage (tableau 3) et, s'il devient extrême, entraîne leur affaissement sous leur propre poids (flambement des tiges).

■ les arbres adoptent une morphologie particulière avec des axes plagiotropes (les arbres « font la table »), qui permet une maximisation de l'interception de la lumière. Tronc et branches principales présentent dans ce cas un développement similaire : ils sont orientés dans un plan horizontal et l'écart de croissance entre le tronc et les branches se réduit, pouvant aboutir à la formation de fourches.

Les seuils d'éclaircissement relatif en deçà desquels ces défauts de forme apparaissent demandent cependant à être connus plus précisément, et sont vraisemblablement susceptibles de varier selon les conditions stationnelles (voir en figure 5 la diversité de forme observée parmi les tiges ayant grandi sous couvert très dense).

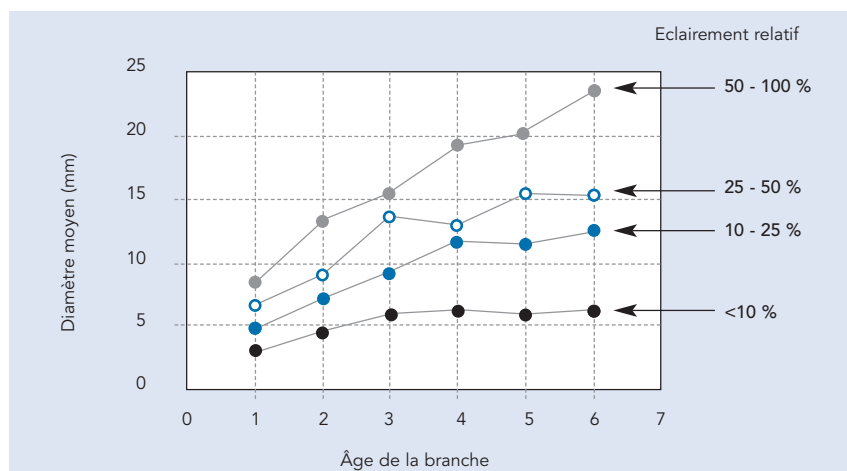


Fig. 4 : incidence de l'éclaircissement au sommet de la régénération sur le diamètre moyen des branches (d'après Vinkler, 2005)

Valeurs moyennes établies sur des tiges dominantes et codominantes issues des régénérations naturelles denses en trouées (âge des tiges compris entre 10 et 25 ans). Mesure de la branche la plus grosse par pousse annuelle du tronc.



T. Constant et M. Pitsch

Fig. 5 : exemple de 3 hêtres ayant poussé sous couvert très dense ($ER < 5\%$), et présentant des formes bien contrastées (boule, plateau et bonne dominance)

Le rôle favorable de la compétition latérale

La compétition latérale au sein de la strate basse joue un rôle important dans l'acquisition de la forme des arbres. Cette compétition est exercée par tous les végétaux présentant une certaine stature verticale qui entourent les jeunes hêtres : semis ou plants de hêtre ou d'une autre essence, végétation accompagnatrice à base de ligneux ou semi-ligneux. Ces végétaux assu-

rent un gainage des hêtres plus ou moins transitoire et épais selon leur type, et créent des gradients verticaux de lumière qui vont induire un plus fort élancement des tiges et une réduction de croissance des axes latéraux. Ce type de compétition est fréquemment rencontré et utilisé à profit dans les jeunes peuplements en système régulier. En revanche, en système irrégulier, en raison de la présence d'un abri vertical qui réduit l'abondance de la

végétation d'accompagnement et la densité de la régénération (voir paragraphe suivant), ce gainage latéral est généralement moins marqué.

Dans les régénérations naturelles à découvert, l'incidence très favorable d'une forte compression sur la régression des grosses branches et des fourches est bien connu (Ningre et Colin, 2003). De même, des observations en régénération naturelle dans des trouées ont montré que de jeunes tiges isolées (sans contact physique avec des arbres voisins) présentent un niveau d'élagage très faible, largement inférieur à celui observé en régénération naturelle dense à découvert (figure 6). Ces constats amènent à souhaiter la présence d'une forte densité locale de tiges, ou celle d'une végétation d'accompagnement suffisamment dense pour permettre une évolution favorable de la forme.

Éclairement incident (%)	Découvert 89 %	Abri léger 29 %	Abri dense 17 %	Abri très dense 7 %
Élancement des tiges	119 (a)	154 (b)	145 (b)	174 (c)
Écart à la verticalité	0,07 (a)	0,09 (a)	0,04 (a)	0,16 (b)
Inclinaison des branches (°/horizontale)	58 (a)	50 (b)	47 (b)	31 (c)

Tab. 3 : caractéristiques morphologiques de tiges dominantes et codominantes en régénérations naturelles denses et pures échantillonnées dans des trouées en FD Compiègne (d'après Vinkler, 2005)
2 lettres différentes sur la même ligne indiquent que les moyennes diffèrent de manière significative.

	Abris très dense	Abri dense	Abri léger	Découvert
D'après Vinkler, 2005 (1)	0	6,2	20	80
Essai Ningre et Frochot (2)	-	-	52	78

Tab. 4 : pourcentage des tiges comportant au moins une fourche dans différentes conditions d'abri

(1) Valeurs moyennes établies sur des tiges dominantes et codominantes de gaulis issus de régénérations naturelles denses en trouées (FD Compiègne, semis âgés de 10 à 25 ans, hauteur comprise entre 3 et 8 m)
(2) Valeurs moyennes établies sur des tiges isolées sous ombrière (plants âgés de 6 ans, hauteur moyenne = 1,80 m)
Critères de définition de la fourche tirés de Ningre (1997) : branches âgées de 3 ans et plus dans (1) et branches d'au moins 1 an dans (2).

Abri, composition et densité de la régénération

Les espèces présentes dans le cortège floristique des régénérations forestières ayant chacune leur propre réponse à l'ombrage en termes de survie, de croissance et de reproduction, le type d'abri va influencer fortement sur la nature du mélange

dans la régénération, ainsi que sur la composition et l'abondance de la végétation d'accompagnement. On dispose aujourd'hui de peu d'éléments pour préciser le niveau d'abri « optimal », adapté au contexte stationnel (qui définit le cortège floristique potentiel) et aux objectifs sylvicoles (nature du mélange souhaité).

De façon générale, l'ombrage limite le développement de la végétation concurrente et la densité du recrû ligneux, particulièrement lorsque l'abri est dense ou très dense (Balandier P, Pauwels, 2002 ; Löf et al, 2005). Le suivi de plusieurs modalités de régénération en forêt domaniale d'Auberive, sur un TSF vieilli à dominante de hêtre, montre par exemple une réduction très sensible de la densité du bourrage ligneux (charme et érable champêtre) (figure 7) et une clématite moins envahissante lorsqu'on évite la mise en lumière immédiate des semis (ONF-STIR Est, 1999 ; Vinkler et al, 2004). L'abri contribue également à réduire la densité de tiges de hêtre, soit par une mortalité des semis directement consécutive à l'excès d'ombrage, soit en accélérant le processus d'auto-éclaircie. En FD de Compiègne, dans des taches de régénérations naturelles développées en trouées, on observe, en l'absence complète

d'intervention en travaux, une réduction très forte de la surface terrière de la régénération avec la densité de l'abri (Vinkler, 2005). La compétition entre tiges accrue par l'ombrage, et la mortalité naturelle qui en découle limitent ainsi fortement la surface terrière de la régénération, processus parfois qualifié d'« autodépressement ».

Les connaissances concernant l'incidence d'un abri sur l'acquisition et le maintien des différentes essences sont également fragmentaires et peu de données quantitatives existent. Néanmoins une compilation d'études sur les régénérations mélangées feuillues, effectuées en France et dans d'autres pays européens, fait ressortir les observations suivantes : le hêtre, le charme, l'érable sycomore, le tilleul et l'orme sont les espèces les plus tolérantes à l'ombrage, avec des valeurs d'éclaircissement relatif seuil de 1 à 5 % pour la survie et de l'ordre de 10 % pour la croissance ; l'érable plane, l'érable champêtre et le frêne tolèrent des ombrages denses, avec des seuils pour la survie et la croissance légèrement plus élevés que les espèces du premier groupe ; le merisier et les alisiers sont des espèces semi-tolérantes ; le chêne sessile, le chêne pédonculé, et le bouleau sont considérés comme des essences de lumière avec des seuils de plus de

15 % pour la survie et de plus de 30 % pour la croissance.

Ces différences de tolérance à l'ombrage entre essences peuvent être utilement valorisées en fonction des objectifs sylvicoles (ONF, 2001). Par exemple, un allongement de la durée de régénération est ainsi préconisé pour la maîtrise du frêne en mélange avec le hêtre sur les stations de plateau calcaire où le frêne n'est pas bien adapté (E. Kiefer, com. pers.). À l'inverse, une mise en lumière rapide peut aider à l'affirmation du chêne dans les mélanges avec le hêtre où ce dernier n'est pas l'objectif principal.

Comportement du hêtre lors d'une mise en lumière

Une forte réactivité de la croissance

Quand le peuplement est ouvert, accidentellement ou suite à une éclaircie, les semis en situation d'attente sous couvert montrent une grande capacité à profiter de la mise en lumière. Ainsi, des semis ayant passé de nombreuses années sous un couvert très dense présentent une réaction rapide, dès l'année de l'ouverture pour la croissance en diamètre, et dès l'année suivante pour la croissance en hauteur (figure 3b). Cette réaction se révèle peu dépendante de l'âge et de la hauteur des semis (Peltier et al, 1997 ; Collet et al, 2001). L'intensité de cette réaction est favorisée par l'importance de la mise en lumière, mais dépend aussi de l'état des semis avant ouverture : des semis ayant épuisé leurs réserves après plusieurs années sous ombrage trop dense réagissent plus progressivement. Ainsi, des semis qui se sont développés sous un abri léger montreront une réaction immédiate, avec des taux de croissance proches de semis ayant toujours été en plein découvert. Les taches de semis observées sous couvert constituent donc des « réservoirs fonctionnels » pour l'avenir du peuplement, à condition toutefois que leur forme soit satisfaisante.

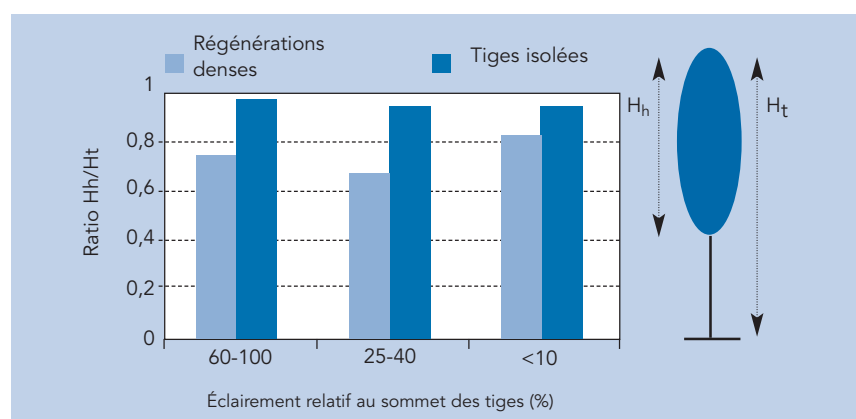


Fig. 6 : effet de l'abri et de la concurrence latérale sur le niveau d'élagage des tiges (d'après Vinkler, 2005)

Valeurs moyennes établies sur des tiges dominantes et codominantes issues de régénérations naturelles denses et sur des tiges isolées (aucun contact avec houppiers voisins)
Effet abri non significatif ; effet concurrence latérale hautement significatif

Une période de risque pour l'évolution de la forme

Nous venons de voir que les semis qui se sont développés sous couvert très fermé présentent souvent d'importants défauts de forme (perte de verticalité, présence de fourches susceptibles de se maintenir). Une étude réalisée en FD St Amond (54) sur de jeunes tiges mises en lumière après une phase d'attente prolongée montre néanmoins que la plupart des fourches apparues avant l'ouverture évoluent favorablement et régressent (de Boutray, 2004). La présence de fourche sous couvert n'est donc pas un critère d'élimination systématique des tiges.

En revanche, la mise en lumière peut induire l'apparition de nouveaux défauts de forme : elle va mettre le jeune hêtre dans des conditions propices à l'apparition de fourches et au ralentissement de l'élagage naturel des branches. Dans les cas où la végétation d'accompagnement est peu développée en raison de l'ombrage passé, elle n'assurera pas le gainage des hêtres nécessaire au contrôle de l'apparition de ces défauts de forme. On observe alors un développement de fourches et de grosses branches horizontales qui naturellement auraient du voir leur croissance se ralentir, avec pour conséquence la formation d'un houppier ayant tendance à s'étaler en largeur. Les résultats établis en FC Montbéliard, dans une plantation où l'abri a été enlevé rapidement après 9 ans, illustrent ces risques (ONF, 2005). Quelques années après enlèvement complet de l'abri, c'est dans l'ancien abri vertical le plus dense, où la végétation d'accompagnement était peu présente initialement du fait de l'ombrage, que la qualité des tiges est la plus défavorable. L'élagage naturel y est moins avancé, le diamètre des branches et la fréquence des fourches y sont plus élevés.

Il faut donc garder à l'esprit que le couvert doit être maintenu d'autant plus longtemps, et doit être enlevé

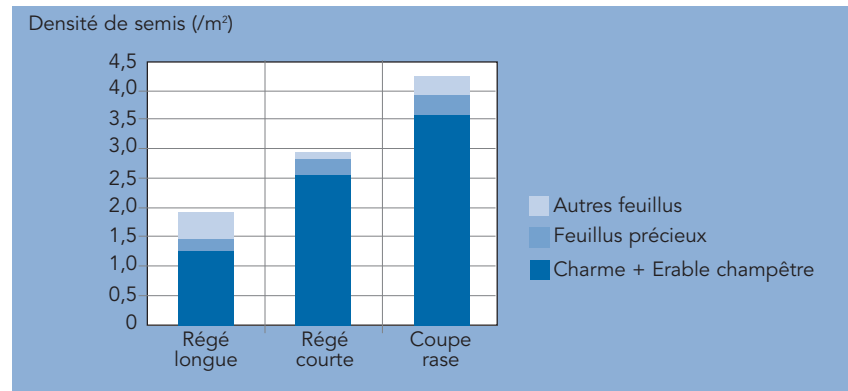


Fig. 7 : densité de semis autres que le hêtre observée 8 ans après la faînée dans différents scénarios de régénération en FD Auberive (Essai ONF-STIR Est 1999)

Scénarios de régénération d'un TSF à dominante hêtre (faînée 1990) ; coupe rase, régé courte, régé longue : voir commentaire figure 2A

de façon d'autant plus progressive que les conditions de croissance sont peu favorables et que la végétation accompagnatrice est peu abondante. Cette analyse préalable du contexte sylvicole doit permettre de limiter les risques de dégradation de la qualité associés à l'enlèvement du couvert.

Les intérêts d'un abri léger

Ces éléments, confortés par d'autres études (Kürth, 1946 ; Nicolini et Caraglio, 1994, Ningre et Colin 2003), **plaident en faveur d'un abri léger, caractérisé par un éclaircissement compris entre 25 et 50 % du plein découvert** (voir figure 8). **Cet abri léger offre en effet un très bon compromis entre croissance (faiblement réduite, voire parfois améliorée les toutes premières années) et forme (très nettement améliorée).**

Afin de tenir compte de l'augmentation des besoins en lumière des tiges avec l'âge, on peut considérer que 20 % du plein découvert est suffisant dans les tout premiers temps d'une régénération (moins de 1 mètre), alors qu'il faut souhaiter un niveau d'éclaircissement nettement plus important (40 à 50 % du plein éclaircissement) pour des tiges de 8 à 10 mètres de haut.

Bien que l'incidence d'un abri sur la structure de la régénération (den-

sité, mélange) soit encore mal connue, il est très probable qu'un abri léger soit parfaitement compatible avec le maintien d'essences héliophiles en mélange, ce qui en revanche sera beaucoup plus difficile sous couvert dense. En outre, la limitation de la végétation concurrente et de la densité du recru ligneux peut laisser espérer une réduction des investissements en dégagement et dépressage.

Le choix d'un itinéraire sylvicole avec maintien du couvert n'est cependant pas exempt de contraintes, la principale d'entre elles étant d'éviter la dérive progressive vers un couvert dense à très dense : des tiges maintenues de façon prolongée dans ces conditions sont peu vigoureuses et très grêles (H/D élevé), et elles sont vraisemblablement plus sensibles aux aléas climatiques (givre, neige lourde) et aux risques sanitaires (chancre). Par ailleurs, un très fort niveau d'ombrage s'accompagne souvent d'une densité de tige réduite et d'une très faible végétation d'accompagnement, facteurs défavorables sur le plan de la forme.

Perspectives sylvicoles

La plantation sous abri... une alternative à réfléchir

Lorsqu'on choisit d'effectuer une plantation avec abri, on privilégiera si possible la plantation avec abri

latéral constituée de bandes et d'interbandes de largeur équivalente à la hauteur de l'abri (20 à 25 m en général) et d'orientation nord-ouest/sud-est : on constitue ainsi un abri suffisamment léger (ER proche de 50 %) favorable sur le plan de la croissance des plants et du développement du recrû ligneux. Sa gestion (éclaircie, puis enlèvement) est relativement aisée dès lors que des cloisonnements suffisamment larges (3 m) sont prévus de part et d'autre de l'abri. L'abri sera enlevé de façon progressive, au minimum en 2 fois. Généralement, un délai d'une dizaine d'années est insuffisant pour espérer une nette amélioration des tiges sur le plan de la forme. Il est préférable d'attendre que les tiges aient 6 à 8 m de haut pour procéder à l'enlèvement très progressif du couvert. Dans tous les cas, cette mise en lumière ne doit intervenir que lorsque la concurrence latérale est assurée autour des plants (entre tiges de hêtre ou grâce à la végétation d'accompagnement). Enfin l'amélioration obtenue sur la forme va permettre de réduire la fréquence et l'intensité des tailles de formation et de l'élagage mais ne dispense pas entièrement de ces travaux.

Dans les plantations réalisées dans des contextes stationnels difficiles (sols calcaires superficiels ou exposés sud, faible pluviosité par rapport aux besoins du hêtre...), il est fortement recommandé d'avoir un abri pour limiter la mortalité et faciliter l'installation du hêtre. Néanmoins, compte tenu des faibles potentialités de ces sols, le renouvellement par voie artificielle ne doit être décidé que si les possibilités d'ensemencement naturel sont trop limitées ou si le peuplement précédent est de qualité médiocre. On notera également que la technique de plantation avec abri latéral est à exclure lorsque les contraintes paysagères sont très fortes comme en montagne.

Lorsque les conditions stationnelles et climatiques sont au contraire favo-

rables, la plantation sous abri n'est pas la seule perspective et la plantation à découvert peut être une solution techniquement satisfaisante (ONF, 2005, Armand et Ningre in IDF 2002). Néanmoins, compte tenu des faibles densités de plantation actuellement préconisées, cette alternative ne doit être recommandée que lorsque les conditions stationnelles permettent l'installation rapide d'un recrû ligneux dense. L'idéal est d'attendre quelques années la mise en place de ce recrû avant plantation (voir par exemple la valorisation d'un recrû naturel à base de bouleau, Kiss *et al*, 2002). À défaut, il est possible de planter rapidement dans la souille, après des travaux de préparation ayant conservé au maximum la végétation d'accompagnement. On évite ainsi le développement d'un tapis herbacé tout en apportant aux plants une légère protection contre le gibier. Lorsque ce recrû fait défaut, et qu'aucun abri « supérieur » n'est possible, il est également possible de créer l'abri, par exemple par une plantation de mélèze. Dans tous les cas, les dégagements ultérieurs devront préserver au maximum le recrû ligneux, en permettant simplement l'accès à la lumière de la tête des plants.

Régénérations naturelles post-tempête, ou comment faire le deuil de l'abri ?

Les régénérations naturelles post-tempêtes représentent des situations de plein découvert forcé, qui peuvent à moyen terme poser d'importantes difficultés sur le plan de la qualité des tiges. Si une densité de tiges proche de 2000/ha peut paraître à première vue suffisante en regard de la densité de tiges objectif finale, elle peut se révéler fortement préjudiciable si la répartition spatiale est particulièrement irrégulière, ainsi (surtout) qu'en l'absence d'une végétation d'accompagnement ligneuse dense. Tout comme en plantation avec abri, un suivi attentif des régénérations est nécessaire, avec en perspective l'identifi-

cation des plus belles tiges au profit desquelles il faudra réaliser tailles de formation et élagage.

Gestion du couvert : quelques éléments de réflexion

Le traitement en futaie irrégulière par bouquet, l'allongement des durées de régénération en futaie régulière offrent la perspective d'une valorisation du couvert pour l'éducation de la régénération. La constitution et le maintien d'un abri léger semblent en effet dans ces conditions techniquement réalistes. La gestion du couvert permet d'espérer une réduction des investissements en travaux, tout en profitant de la croissance simultanée du peuplement restant sur pied et de la régénération. Elle pose malgré tout des contraintes qu'il convient de mentionner. En cas de problème sanitaire généralisé (chancre) dans le peuplement adulte, la superposition des générations doit être évitée car elle augmente fortement le risque de transmission de la maladie aux jeunes tiges, vraisemblablement d'autant plus que les semis sont peu vigoureux. Sur le plan de la conduite des coupes, une organisation et une vigilance particulière sont nécessaires pour éviter les dommages à la régénération. D'autre part, compte tenu de la fragilité de l'écorce du hêtre, les risques de coups de soleil au peuplement laissé sur pied peuvent être nettement accrus. Enfin, une attention particulière est nécessaire dans la gestion du couvert, à la fois pour éviter le risque d'une fermeture excessive du couvert, et d'autre part pour réaliser une transition aussi progressive que possible vers le plein éclaircissement.

Malgré tout, le dosage de l'éclaircissement reste particulièrement délicat en pratique, et largement affaire d'empirisme. Dans les situations de trouée, on peut conseiller, pour respecter la fourchette d'éclaircissement recommandée (25 à 50 % du plein découvert), de faire en sorte que le rapport du diamètre moyen de la trouée à la hauteur du peuplement alentour soit compris entre 0,75

(début de la régénération) et 1,5 (stade perches). Cela conduit par exemple, dans un peuplement de hauteur égale à 30 m, à des trouées de surface comprise entre 4 et 16 ares. Dans les premiers temps de la régénération, et surtout en l'absence de sous-étage, il est préférable d'éviter un trop fort ensoleillement direct en visant le bas de la fourchette, et en donnant à la trouée une forme elliptique dont le petit axe sera orienté selon un axe sud-sud-ouest/nord-nord-est. Mais dans la situation la plus générale d'un abri diffus, on ne dispose pas de traduction simple du niveau d'éclairement recommandé en variables dendrométriques simples, accessibles au forestier. En effet, l'unité de surface terrière correspond à un couvert très différent selon la nature des essences en présence (hêtre et frêne n'ont pas le même pouvoir ombrageant !), mais également en fonction du diamètre des tiges et de l'historique sylvicole de la parcelle. Une difficulté particulière consiste en outre à pouvoir apprécier l'impact du sous-étage. En attendant des indications plus précises, il faudra donc garder à l'esprit que la fourchette d'éclairement recommandée correspond à une ouverture importante du couvert, résultant d'un faible matériel sur pied (figure 8).

En futaie irrégulière, des processus supplémentaires interviennent, qu'il faut nécessairement prendre en compte avant de pouvoir conclure sur les avantages et inconvénients des différentes modalités de gestion de l'abri. Ces processus sont principalement liés au maintien d'un couvert adulte pendant une durée qui va bien au-delà de celle pratiquée dans les systèmes réguliers. Les connaissances présentées ici sont bien sûr totalement applicables aux systèmes irréguliers. Mais elles doivent être complétées par des connaissances sur le maintien sous couvert et sur la réaction à une mise en lumière des gaules et des perches, et sur l'incidence d'un couvert prolongé sur la structuration du

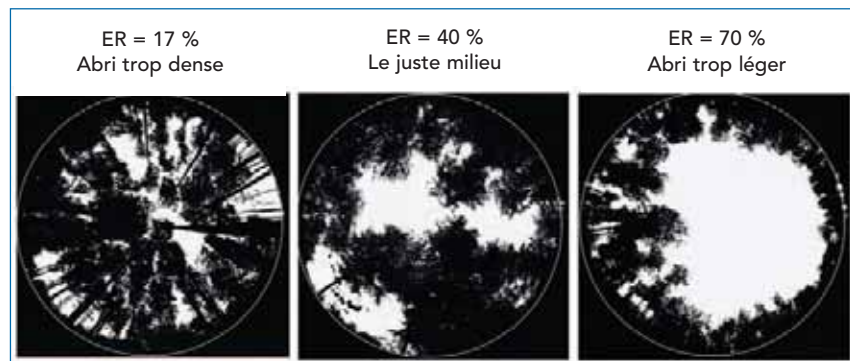


Fig. 8 : Exemples de photographies hémisphériques illustrant le niveau d'éclairement recommandé (ER = 100 % : plein découvert)

sous-étage, dont le rôle peut être prédominant en système irrégulier (Ningre et al, 2005).

Isabelle VINKLER

François NINGRE

Catherine COLLET

LERFOB, UMR INRA-ENGREF

Équipe Croissance-Production

BIBLIOGRAPHIE

AGESTAM E., EKÖ P.M., NILSSON U., WELANDER N.T., 2003. The effects of shelterwood density and site preparation on natural regeneration of *Fagus sylvatica* in southern Sweden. *Forest Ecology and Management*, vol. 176, pp. 61-73

ARMAND G., NINGRE F., 2002. Itinéraires sylvicoles en futaie régulière. In : *Le hêtre autrement*, ARMAND G. (coord), Paris : IDF, pp. 61-138

ARMAND G., 2000. Un itinéraire de taille et élagage du hêtre. *Forêt Entreprise*, n° 132, pp. 39-41

AUSSENAC G., 1973. Etude des gelées tardives en relation avec les problèmes de reboisement. *Annales des Sciences Forestières*, vol. 30, pp. 141-144

BALANDIER P., PAUWELS D., 2002. La lumière, outil sylvicole pour favoriser la diversité végétale ou la gestion cynégétique des peuplements de

mélèze (*Larix* sp). *Forêt Wallone*, n° 61, pp. 9-13

BURSCHEL P., SCHMALTZ J., 1965. Die bedeutung des liches für die entwicklung junger buchen. *Allgemeine Forst- und Jadgezeitung*, n° 136, pp. 193-210

COLLET C., LANTERO., PARDOS M., 2001. Effects of canopy opening on height and diameter growth in naturally regenerated beech seedlings. *Annals of Forest Science*, vol. 58, pp. 127-134

DE BOUTRAY A., 2004. Effets de la mise en lumière sur la croissance et la forme de semis préexistants de hêtre (*Fagus sylvatica* L.). *Mémoire de 3e année FIF*. Nancy : ENGREF. 94 p. + annexes

DUPRE S., THIEBAUT B., TEISSIER DU CROSE., 1986. Morphologie et architecture des jeunes hêtres (*Fagus sylvatica* L.) : influence du milieu, variabilité génétique. *Annales des Sciences Forestières*, vol. 43, n°1, pp. 85-102

GEMMEL P., NILSSON U., WELANDER T., 1996. Development of oak and beech seedlings planted under varying shelterwood densities and with different site preparation methods in southern Sweden. *New Forests*, vol. 12, pp. 141-161

HARLEY J.L., 1939. The early growth of beech seedlings under natural and experimental conditions. *Journal of Ecology*, vol. 27, pp. 384-400

KISS S., FOURBISSEUR A., CLAESSENS H., 2002. La conduite de l'accompagnement de bouleau dans les jeunes plantations de hêtre. Forêt wallonne, n°57, pp 10-13.

KURTH A., 1946. Untersuchungen über Aufbau und Qualität von Buchendickungen. Annales de l'Institut fédéral suisse de Recherches forestières, vol. 24, n°2, pp. 581-658

LE TACON F., MALPHETTES C.B., 1974. Germination et comportement des semis de hêtre sur 6 stations de la FD Villers-Cotterêts. Revue Forestière Française, vol. 26, pp. 111-123

LÖF M., PAULSSON R., RYDBERG D., WELANDER N.T., 2005. The influence of different overstory removal on planted spruce and several broadleaved tree species: survival, growth and pine weevil damage during three years. Annals of Forest Science, vol. 62, pp. 237-244

MADSEN P., LARSEN J.B., 1997. Natural regeneration of beech (*Fagus sylvatica*) with respect to canopy density, soil moisture and soil carbon content. Forest Ecology and Management, vol. 97, pp. 95-105

MOREL P.J., PLANCHAIS I., 1999. Plantation de hêtre sous abri : une technique à préconiser. Exemple d'une plantation expérimentale en forêt communale de Montbéliard (Doubs). Bulletin technique, n° 39, pp. 7-18

NICOLINIE., CARAGLIO Y., 1994. L'influence de divers caractères architecturaux sur l'apparition de la fourche chez *Fagus sylvatica* L., en fonction de l'absence ou de la présence d'un couvert. Canadian Journal of Botany, vol. 72, pp. 1723-1733

NINGRE F., 1997. Une définition raisonnée de la fourche du hêtre. Revue Forestière Française, vol. 49, n° 1, pp. 32-40

NINGRE F., MENORET G., BERNIER F., 1997. Le gel de mai 1995, une occa-

sion pour en savoir plus sur le comportement du Hêtre en plantation. Forêt Entreprise, n° 117, pp. 57-63

NINGRE F., ARMAND G., BRUCIACMACCHIE M., TOMASINI J., 2005. Un traitement en futaie irrégulière en Haute-Saône (Nord-Est de la France). Forêt wallonne, n° 76, pp. 3-15

NINGRE F., COLIN F., 2006. Frost damage on the terminal shoot as a risk factor of fork incidence on common Beech (*Fagus sylvatica* L.). Accepté pour publication par Annals of Forest Science

NINGRE F., COLIN F., 2003. La fourchaison du Hêtre. Communication aux Journées Scientifiques et Techniques « Le hêtre aujourd'hui et demain », INRA Champenoux, 17-19 juin 2003.

ONF, 1999. Conduite des coupes de régénération sur des semis de hêtre : essai en Forêt Domaniale d'Auberive, compte-rendu de mesures. Document ONF Section Technique Interrégionale Est.

ONF, 2001. Contribution à l'organisation de la gestion en futaie irrégulière pied à pied dans les peuplements feuillus de plaine. Document ONF-Langres.

ONF, 2005. Influence de l'abri et de la densité de plantation sur le développement d'une régénération artificielle de hêtre (essai FC Montbéliard), compte-rendu de mesures. Document ONF Service Aménagement, Recherche et Technique.

OOSTERBAAN A., VAN HEES A.F.M., 1989. Resultaten van een lichtingsproef in een Beuken-Wintereikenbos. Rapport n° 551. Wageningen : De Dorschkamp.

PELTIER A., TOUZET M.C., ARMENGAUD C., PONGE J.F., 1997. Establishment of *Fagus sylvatica* and *Fraxinus excelsior* in an old-growth beech forest. Journal of Vegetation Science, vol. 8, pp. 13-20

SÜNER A., RÖHRIG E., 1980. Die Entwicklung der Buchennaturverjüngung in Abhängigkeit von der Auflichtung des Altbestandes. Forstarchiv, vol. 51, pp. 145-149

SZWAGRZYK J., SZEWCZYK J., BODZIARCZYK J., 2001. Dynamics of seedling banks in beech forest: results of 10-year study on germination, growth and survival. Forest Ecology and Management, vol. 141, pp. 237-250

VERA F.W.M., 2000. Grazing ecology and forest history. Wallingford : CAB International. 505 p.

VINKLER I., 2005. Gestion du couvert et régénération de la hêtraie : les intérêts d'un abri léger. Revue Forestière Française, vol. 57, n° 2 spécial « L'avenir du hêtre dans la forêt française », pp. 159-174

VINKLER I., MULLER C., GAMA A., 2004. Germination de la clématite (*Clematis vitalba* L.) et perspectives de maîtrise préventive en forêt. Revue Forestière Française, vol. 56, n° 4, pp. 275-286

VON LÜPKE B.V., 1982. Versuche zur Einbringung von Lärche und Eiche in Buchenbestände. Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, vol. 74, pp. 1-123

VON LÜPKE B., 2005. Canopy management, plant quality and harvesting regime. In : OLESKOG G., LÖF M. (eds), The ecological and silvicultural bases for underplanting beech (*Fagus sylvatica* L.) below Norway spruce shelterwood (*Picea abies* Karst.) Schritten aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, Band 139. Frankfurt am Main : Saurländer's Verlag. 94 p.

Sylviculture juvénile du hêtre : compromis entre élagage naturel et croissance radiale

La sylviculture juvénile du hêtre suscite toujours autant de controverses et fait encore l'objet d'interrogations de nombreux forestiers, en France comme au-delà de nos frontières. Malgré cet intérêt et en dépit de l'importance des surfaces concernées, il n'existe pas de synthèse récente sur le sujet. L'article présenté ici fait le point sur quelques questions structurant la problématique en exploitant des résultats issus de l'expérimentation. Les auteurs espèrent ce faisant ouvrir un espace de débats objectif sur la question des itinéraires sylvicoles en phase juvénile.

La sylviculture juvénile : de quoi s'agit-il ?

La phase juvénile, qui débute à une hauteur dominante de 3 m pour se terminer en général à la première éclaircie commercialisable, représente une étape fondamentale et délicate de la sylviculture du hêtre. L'objectif principal d'une telle phase, dite de qualification, est de pouvoir désigner entre 50 et 90¹ tiges objectifs par hectare, vigoureuses et de belle qualité, au moment de la première éclaircie (éventuellement de la deuxième). Sur le plan de l'élagage, on s'accorde aujourd'hui sur un objectif de bille de pied finale égal au quart de la hauteur dominante finale du peuplement (6 m, 7 m ou 8/10 m selon la fertilité). Il s'agit donc d'opter pour des interventions favorisant la croissance de tiges d'avenir² tout en garantissant un élagage naturel suffisant. Il faut ajouter à cela une hauteur dominante limite à partir de laquelle il ne paraît plus raisonnable de retarder l'entrée en phase de croissance active sous peine de s'installer dans une situation de rattrapage. Les avis diffèrent, certes, mais la limite de 18 m semble constituer un terrain d'entente. Si les avis divergent également sur les interventions à réaliser au cours de cette phase de qua-

lification, la nécessité de passer par une phase dite de compression caractérisée par une forte concurrence entre tiges semble actée. Seule une telle phase autorise en effet le processus d'élagage naturel.

En fonction de leur objectif, les interventions en phase juvénile peuvent être divisées de manière simpliste en trois catégories : diminution significative de la densité (dépressage), diminution significative de la concurrence au seul voisinage de tiges d'avenir (dépressage ciblé), dosage des essences et enlèvement de quelques tiges de type loup (nettoiements). Ces trois types d'interventions peuvent être menés de manière simultanée et d'autres interventions, plus ciblées, être envisagées (taillies de formation, élagages etc.). Le contexte économique actuellement difficile et l'engouement pour les sylvicultures proches de la nature incitent à opter aujourd'hui pour des interventions plutôt modérées en phase juvénile, éventuellement sans dépressage. Ce choix, outre les raisons financières, trouve sa justification dans l'hypothèse d'une différenciation « sociale » naturelle au sein des peuplements juvéniles de hêtre permettant la sélection d'arbres vigoureux et parfois bien élagués. À cela il faut

également ajouter les différents types d'interventions en éclaircie à l'issue de la phase juvénile : éclaircie en plein, éclaircie au profit des seuls arbres objectifs (détourage), éclaircie mixte.

La figure 1 illustre les différents éléments structurant ainsi la problématique de la sylviculture juvénile du hêtre : interventions (nombre, intensité), phase de compression (début, durée), sortie de phase de qualification (hauteur élaguée, vigueur des arbres objectifs). La difficulté essentielle de la phase juvénile réside dans la recherche d'un bon équilibre entre, d'une part, la phase de compression qui favorise l'élagage naturel et, d'autre part, les interventions qui favorisent le maintien d'une bonne vigueur. Cela revient à se demander comment optimiser l'agencement dans le temps de deux processus antagonistes pour aboutir au meilleur compromis. Ce qui nous amène à proposer le questionnement suivant :

■ quelle est l'influence des interventions (types dépressages et nettoiements) à court terme et long terme sur la croissance radiale et l'élagage naturel ?

■ À quel stade de hauteur dominante la phase de compression est-elle le plus efficace ? Quand doit-

¹ Densité variable selon la fertilité et le type d'intervention.

² Il s'agit des tiges de bonne vigueur et de bonne qualité, parmi les dominants et codominants.

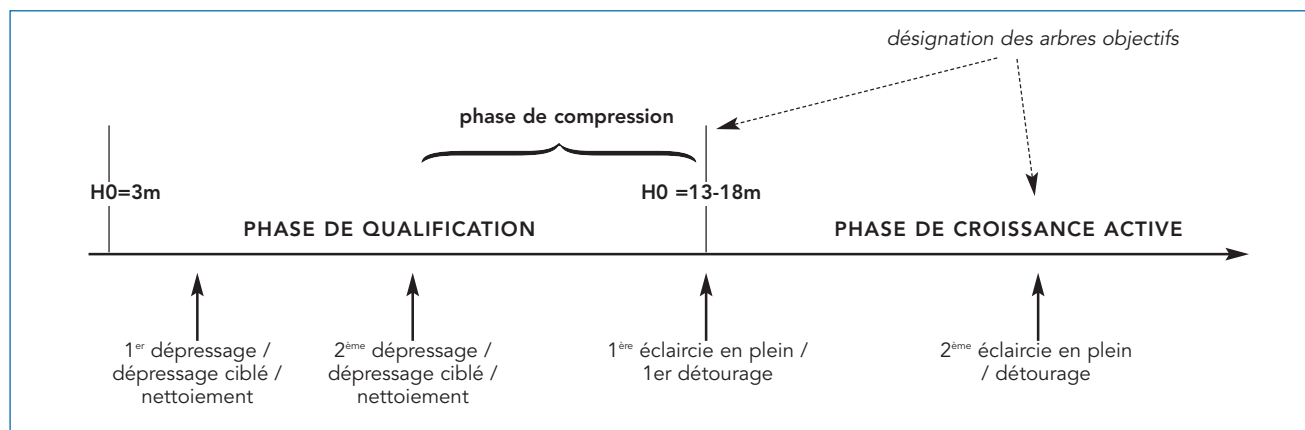


Fig. 1 : schéma des éléments structurant la problématique de la sylviculture juvénile du hêtre

La phase de qualification consiste à augmenter l'accroissement en diamètre des tiges d'avenir sans compromettre l'élégage naturel afin de favoriser la commercialisation de la première éclaircie et de désigner des tiges de qualité en nombre suffisant lors de la phase de croissance active. La phase de compression doit promouvoir l'élégage naturel et les interventions favoriser la croissance en diamètre.

elle commencer ? Quelle doit être sa durée ?

■ Existe-t-il une différenciation sociale entre tiges en l'absence d'interventions en dépressage ? Sans dépressage, peut-on désigner suffisamment de tiges objectifs vigoureuses et de qualité au moment de la phase de croissance active ?

■ L'élégage naturel se poursuit-t-il en début de phase de croissance active dans le cadre d'une sylviculture dynamique ? Peut-on ainsi anticiper sur l'acquisition de la bille de pied pour sortir de la phase de compression plus tôt et engager plus tôt la phase de croissance radiale active (expansion) ?

■ Enfin, à quel stade de hauteur dominante peut-on envisager une sortie de phase de compression, avec quel type d'intervention, et avec quel type de produits et quel volume global pour la première éclaircie ?

Les dispositifs expérimentaux de l'ONF

La méthode expérimentale constitue une approche intéressante pour traiter l'ensemble de ces questions. Elle permet en effet de révéler et de quantifier les liens de cause à effet entre deux phénomènes et de s'affranchir des effets de facteurs (ex. pente), parfois intéressants dans un contexte de gestion, mais sources de

confusion dans un contexte d'amélioration des connaissances.

Les dispositifs sur la sylviculture des jeunes peuplements de hêtre de l'ONF, installés avec l'appui du Département Recherche et Développement, peuvent être scindés en deux grands ensembles :

■ les dispositifs de la fin des années 1980 (10 dispositifs). Les sylvicultures testées et les problématiques envisagées sont variables d'un dispositif à l'autre (tableau 1). Les hauteurs moyennes des tiges échantillons sur les placettes en début d'expérimentation varient, par exemple, de 7 m à 13 m. Quatre dispositifs concernent des plantations. Il n'est pas du tout exclu que des interventions en dépressage aient eu lieu sur les parcelles avant l'installation des expérimentations (ex. Beaumont).

■ Les dispositifs multisites du réseau d'expérimentations sur la sylviculture juvénile du hêtre. Ce réseau compte à ce jour 9 sites en plaine et 2 sites en montagne (tableau 2) avec un total de 55 placettes dont 9 en montagne et 31 en bonne fertilité (3 fertilités sont testées). Cinq nouveaux sites sont prévus dans les deux années à venir dont 2 en montagne soit un minimum de 15 placettes supplémentaires. Chaque placette se voit affecter un itinéraire sylvicole (stratégie) particulier choisi parmi 8 scénarios

(tableau 3). L'intérêt de ce réseau réside dans l'homogénéité des itinéraires sylvicoles testés sur les différents sites et dans le suivi de l'ensemble de la phase juvénile. La diversité des modalités envisagées, parfois extrêmes, permet de couvrir l'ensemble des sylvicultures possibles en phase juvénile. L'approche multisite permet également de mieux appréhender la portée générale des résultats.

Nous présentons ici des résultats issus de ces expérimentations qui fournissent des éléments pour avancer sur les questions posées. Les coûts de dépressages et éclaircies ne sont pas abordés, les essais expérimentaux n'étant pas adaptés aux calculs des coûts d'interventions. Ces résultats, purement dendrométriques, doivent donc être replacés dans les contextes sylvicoles, sociaux et économiques locaux. Nous restreignons également notre analyse au cas des hêtraies de plaines et ne traitons pas ici de la gestion du mélange qui constitue par ailleurs une problématique importante.

Les résultats acquis depuis maintenant 15 années indiquent qu'une intervention précoce et dynamique (type BT-31 à $H_0 = 6-8$ m) pourrait conduire à un compromis intéressant entre élégage naturel et crois-

Dispositifs	H _i	C _i	Hb _i	N _i	Placettes	pop.	Modalités
Arc les Gray ^a 1987	10.2	37.9 ⁺²	3.0	2250	3	200	classique, dynamique très dynamique
Aubenton ^a 1988	9.2	25.3	2.8 ⁺² 3.2 ⁺² 5.1 ⁺²	4590	3*3*3	400	témoin, moyen, fort aucun soin, défourchage, élagage
Ban d'Harol 1989	7.0	14.9	2.9	11870	4	250	2*2, détourage, témoin
Beaumont 1989	12.6	43.7 ⁺¹	5.2	1530	5	250	dynamique, locale, N4 continue, N4 discontinue, témoin
Chenerailles ^a 1990	8.0	14.0	0.4	6630	5	400	témoin, nettoiemts, dynamique, très dynamique, dépressage ciblé
Faye de Montrond 1988	13.1	34.8	5.4	4630	2	250	Compression, N4
Mont de l'Échelle 1989	9.5	22.8	4.5	6500	4	250	BT-31, compression, locale, témoin
Saverne 1987	9.9	31.8	4.2	12180	5	83-70	2*2, 3*3, 4*4, locale, témoin
Liesle 1989	8.2	21.0	2.6	6240	4	250	classique, compression tardive, hyperdynamique, compression précoce
Retz ^a 1989	12.2	32.9	3.4	2380	3*3	200-100	faible, moyen, fort élagage artificiel des tiges

Tab. 1 : description succincte des dispositifs installés en plaine à la fin des années 1980

H_i = hauteur moyenne initiale, C_i = circonférence moyenne initiale, Hb_i = hauteur moyenne initiale de première branche verte, N_i = densité initiale. La taille de l'échantillon est également fournie (pop.). Pour Aubenton, la hauteur de première branche verte indiquée concerne les placettes sans élagage. Pour Chenerailles, la hauteur initiale mentionnée est indicative.

^a dispositif sur plantation ; ^{+1/+2} mesures effectuées un an/deux ans après installation de l'essai.

Site	Année	Domaine	Fertilité	Substrat	nb. Placettes	Stratégies
Ban d'Uxegney	1999	Plaine	2	Acide	4	1-3-3bis-4
Chatillon	1995	Plaine	2	Calcaire	6	1-2-3-4-5-6
Gobessart	1997	Plaine	2	Calcaire	5	1-2-3-4-5
Eu	1995	Plaine	1	Acide	10	1-2-3-4-5-6
Halatte	1999	Plaine	1	Calcaire	2	2-3bis
Luxeuil	1999	Plaine	1	Acide	6	1-2-3bis-4-5-7
Montagne noire	1995	Montagne	2	Acide	6	1-2-6
Moyeuvre	1996	Plaine	1	Calcaire	3	1-6-3
Oisellemont	2005	Plaine	1	Calcaire	4	1-3-3bis-7
St Larry	1997	Montagne	3	Calcaire	3	1-3-5
Valdahon	2005	Plaine	1	Calcaire	6	1-3bis-5-7

Tab. 2 : sites actuels faisant partie du réseau d'expérimentations sur la sylviculture juvénile du hêtre

Ho	4m	8m	12m	16m	17 m	18m	dépressages avant 16-17m
Stratégie							
1	← auto-éclaircie →			1400		615	0
2	5400	299	1555		715		3
3	5400	2900			715		2
3bis	8100	4350		1400		615	2
4	1800				715		1
5		1800			715		1
6	500				350		1
7	détourage de 210 t/ha à 8 m			1400		615	0

Tab. 3 : quantification des stratégies testées sur le réseau d'expérimentations pour la classe de fertilité 1

Pour les fertilités 2 et 3, les densités objectifs après intervention varient ainsi que la hauteur d'intervention en première éclaircie.

sance radiale. L'application de simples nettoiemts semble également pouvoir constituer un itinéraire pertinent. Le réseau sur la sylviculture juvénile du hêtre devrait pouvoir donner des éléments plus probants sur cette question dans les prochaines années.

Réactions des peuplements aux dépressages : résultats sur la croissance radiale

Les dépressages ont pour principale vocation d'améliorer la vigueur des tiges restantes, garantissant ainsi une bonne réactivité des arbres aux futures éclaircies. Il faut ajouter également un objectif de sélection phénotypique et des objectifs sanitaires via la suppression de tiges mal conformées ou de tiges atteintes par divers pathogènes (notamment le chancre du hêtre). Il peut paraître aujourd'hui superflu de s'intéresser à l'effet des dépressages sur la croissance en diamètre. Il est en effet connu de longue date que les peuplements dépressés présentent des accroissements plus élevés que les peuplements subissant de simples nettoiemts. En revanche, il semble intéressant de s'attarder un peu sur la forme à court et moyen terme de la relation entre croissance radiale et intensité d'intervention et sur la réactivité des peuplements aux éclaircies après une phase de compression. De meilleures connaissances sur ces deux points devraient en effet permettre d'aider au choix du type (nettoiemnt/dépressage, densités à rechercher après intervention...), du nombre et du stade optimal pour les interventions sylvicoles au profit du hêtre dans ces jeunes peuplements, et enfin, de déterminer le stade opportun de sortie de phase de compression.

Relation entre accroissement radial et intensité d'intervention

La figure 2 présente la réponse des peuplements (accroissement moyen relatif en circonférence) après dépressage sur une période variant de 3 à 7 ans selon l'expérimentation.

Réactions des peuplements aux dépressages : présentation des résultats et explications communes aux figures 2 à 6

Les figures 2 à 6 présentent la réponse des peuplements après dépressage, en accroissement relatif de la circonférence (figures 2 et 3), de la hauteur (figure 6) et de la hauteur d'insertion de 1ère branche verte (figures 4 et 5). L'accroissement indiqué est relatif en ce sens qu'il est rapporté, pour une même expérimentation, à l'accroissement du témoin sur la même période (Duplat et Démarcq 2000) ; s'il n'y avait aucune différence par rapport au témoin, l'accroissement relatif aurait la valeur 1 (trait tireté).

Pour caractériser la densité des peuplements nous utilisons l'indice de densité de Reineke (RDI, voir Simon et al. dans ce volume). Cet indice possède le grand avantage d'être indépendant de l'âge des peuplements et de la station, facilitant par conséquent les comparaisons entre expérimentations (Duplat et Démarcq, 2000). Cet indice est également employé de manière relative, sa valeur dans les placettes avec intervention étant divisée par la valeur obtenue dans la placette témoin correspondante. Pour donner un repère, une valeur de 0,4 de cet indice (représentée en trait pointillé) indique une intervention proche de la norme du BT-31 (bulletin technique de l'ONF n° 31, octobre 1996). Enfin, nous distinguons les résultats obtenus pour les peuplements de moins de 7 m (réseau sylviculture juvénile du hêtre, points ronds) de ceux obtenus pour les peuplements de plus de 7 m (expérimentations de la fin des années 80, points triangulaires). Le résultat des régressions non-linéaires pour les deux types de peuplements est donné (figures 2, 4 et 6) respectivement par les courbes en continu et en pointillés.

Ce graphique illustre le fait que les peuplements de plus de 7 m réagissent fortement aux dépressages (RDI relatif < 0,8), permettant d'obtenir des accroissements radiaux sur les tiges d'avenir jusqu'à plus de 2 fois supérieurs à ceux obtenus dans des peuplements subissant de simples nettoyements. Les peuplements de moins de 7 m présentent une réactivité plus faible, en partie expliquée par des peuplements

moins complets (RDI plus faibles) au moment des interventions. On obtient par exemple des accroissements de 1,2 (H < 7 m) et de 1,6 (H > 7 m) fois ceux obtenus dans les peuplements témoins pour un indice relatif de Reineke égal à 0,4.

Durée d'influence d'un dépressage sur la croissance radiale :

Pour un nombre restreint de placettes, il nous a été possible de

déterminer l'accroissement en circonférence sur deux périodes successives de 4 à 6 ans après intervention (figure 3). La première période représente la réponse instantanée des peuplements au dépressage et la deuxième période la réponse à plus long terme. Il apparaît une nette diminution de l'accroissement entre les deux périodes pour les peuplements de plus de 7 m ; cependant cet accroissement reste, pour la plupart des placettes, toujours supérieur à celui observé dans les témoins. Cette diminution ne touche pas les peuplements de moins de 7 m ayant subi de très fortes interventions (pas de données pour les interventions plus modérées). Au vu du faible nombre de placettes disponibles il faut prendre ces résultats avec précaution. Ils révèlent en tout cas que des dépressages dynamiques (type BT-31) ont une influence sur l'accroissement en diamètre sur une période d'une durée supérieure à 5 ans.

Réactions des peuplements aux dépressages : résultats sur l'élagage naturel et la croissance en hauteur

Relation entre élagage naturel et intensité d'intervention

Si les dépressages favorisent l'accroissement en diamètre sur une période d'une durée supérieure à 5 ans, il est

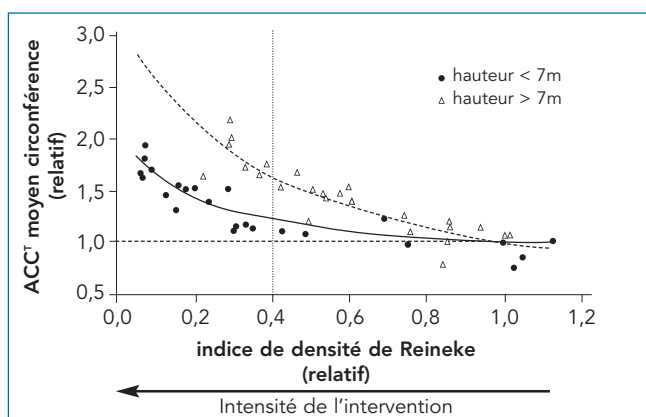


Fig. 2 : relation entre l'accroissement moyen relatif (par rapport au témoin) en circonférence et l'indice de densité relatif de Reineke, après dépressage

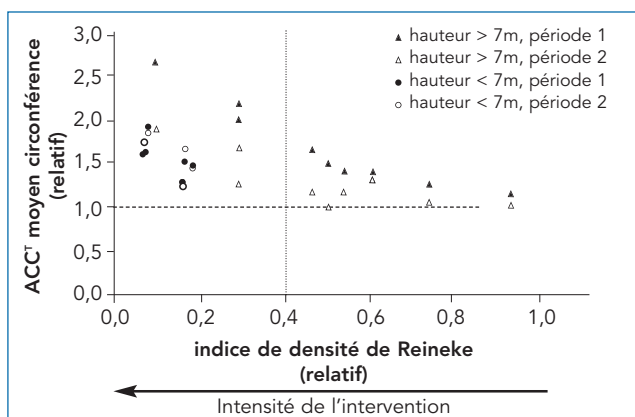


Fig. 3 : relation entre l'accroissement moyen relatif (par rapport au témoin) en circonférence et l'indice de densité relatif de Reineke pour deux périodes successives de 4 à 6 ans après dépressage

La période 1 indique la réponse immédiate et la période 2 la réponse à plus long terme.

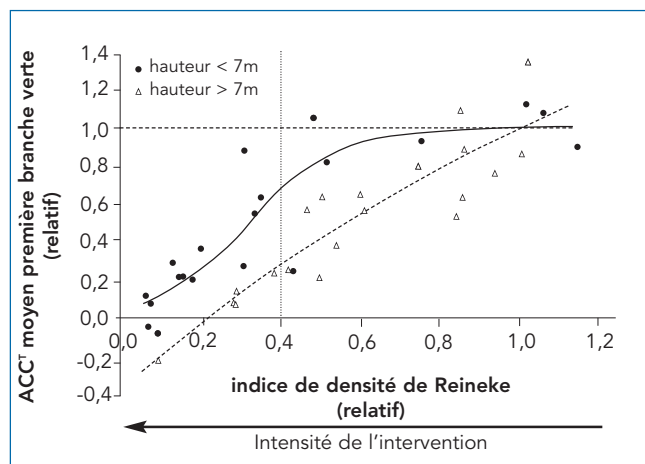


Fig. 4 : relation entre l'accroissement moyen relatif (par rapport au témoin) en hauteur de première branche verte et l'indice de densité relatif de Reineke, après dépressage

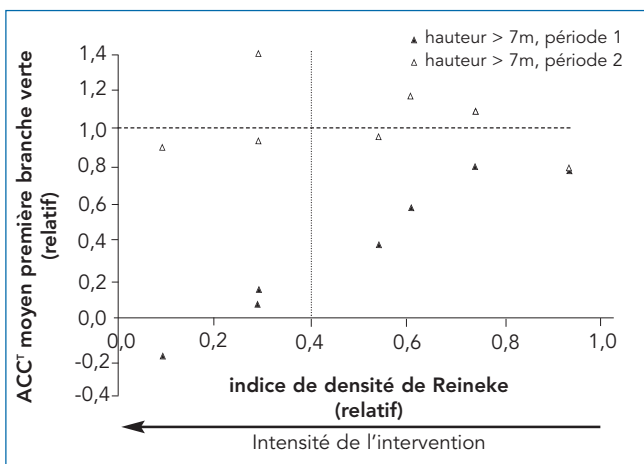


Fig. 5 : relation entre l'accroissement moyen relatif (par rapport au témoin) en hauteur de première branche verte et l'indice de densité relatif de Reineke pour deux périodes successives de 4 à 6 ans après dépressage

La période 1 indique la réponse immédiate et la période 2 la réponse à plus long terme.

nécessaire de s'interroger simultanément sur les effets de ces dépressages sur le processus d'élégage naturel. La figure 4 illustre les résultats obtenus sur l'accroissement relatif de la hauteur d'insertion de la première branche vivante (bon indicateur du processus d'élégage naturel). D'une manière générale, la réaction est un accroissement de la hauteur de la première branche vivante sensiblement réduit par rapport au témoin. Mais tout comme pour l'accroissement en circonférence, les peuplements de moins de 7 m de hauteur semblent réagir plus faiblement que les peuplements plus âgés. Il est d'ailleurs intéressant de noter, pour ces derniers, que les dépressages les plus forts (extrêmes pour la gestion), entraînent, au moins temporairement, un arrêt de l'élégage naturel (accroissement relatif ≤ 0) et même l'apparition de gourmands qui se développent rapidement en branches gourmandes (gourmands de plus de 75 cm de long). Le hêtre différerait en cela des chênes sessile et pédonculé qui semblent pouvoir s'élager naturellement même dans des situations de forte ouverture du peuplement (Duplat et Démarcq 2000). Pour fixer les idées, on obtient en moyenne un accroissement de hauteur d'insertion de première branche verte égal

à 0,7 fois ($H < 7$ m) et 0,3 fois ($H > 7$ m) ceux obtenus dans les témoins (simples nettoiemnts) pour une valeur d'indice de densité relatif de Reineke de 0,4 (intervention type BT-31).

Durée d'influence d'une intervention sur l'élégage naturel

Nous ne disposons malheureusement que de peu de données pour aborder cette problématique (voir figure 5 : résultats sur deux périodes successives de 4 à 6 ans). Nous observons cependant, pour les huit placettes disponibles, que la vitesse de remontée de la première branche verte rattrape celle des témoins dès la deuxième période considérée, soit au plus tard au bout de 6 années. La confirmation d'un tel phénomène serait intéressante car elle révélerait une différence importante de réponse au dépressage entre accroissement radial et élégage naturel, le premier processus étant affecté plus durablement. Pour certaines placettes, l'élégage semble même reprendre plus activement encore en deuxième période, permettant de rattraper le temps perdu. Ce phénomène ne semble cependant pas pouvoir être généralisé. Ces résultats apparaissent d'ailleurs logiques si l'on considère que l'élégage naturel est plutôt sensible

à la fermeture du couvert et que l'accroissement radial est lié à la dynamique du houppier (voir figure 7). À noter que nous ne disposons pas de résultats pour le moment sur les peuplements de moins de 7 m.

Relation entre accroissement en hauteur et intensité d'intervention

Les effets des dépressages sur la hauteur sont marginaux. En effet, nous n'avons trouvé aucun effet significatif pour les peuplements de plus de 7 m et une diminution de l'ordre de 20 % par rapport au témoin pour les interventions les plus dynamiques, extrêmes pour la gestion, dans le cas des peuplements de moins de 7 m (figure 6). Dans le cadre d'une gestion courante, il n'est donc pas attendu d'effet significatif des interventions sur la croissance en hauteur. Un tel résultat avait également été obtenu dans le cas des chênes sessile et pédonculé (Duplat et Démarcq 2000).

Compromis entre interventions et élégage naturel

Nous venons de voir que la réponse des peuplements aux dépressages dépend de leur stade de développement. Cependant, il est fondamental

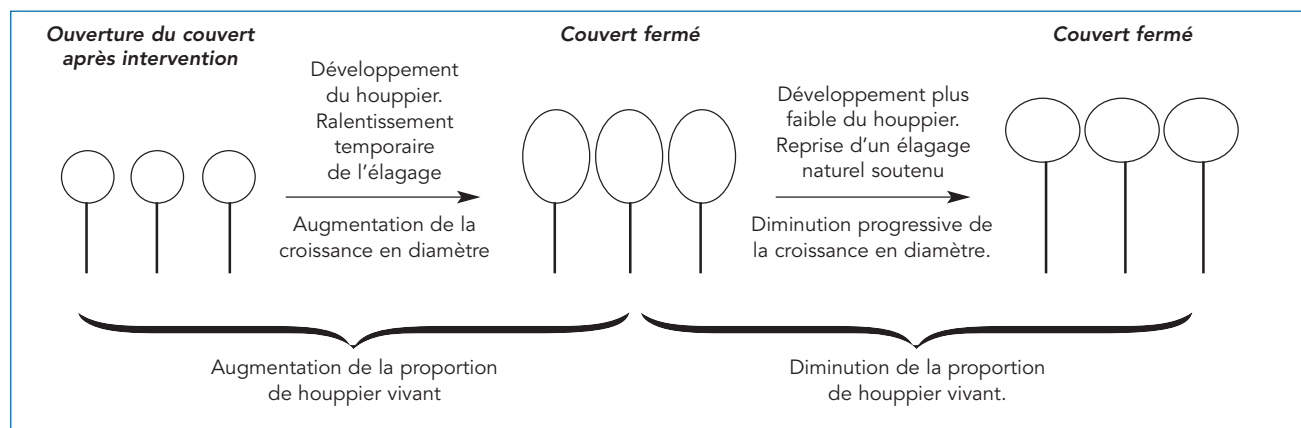


Fig. 7 : hypothèse sur la relation entre fermeture du couvert après intervention, développement du houppier, élégage naturel et accroissement en diamètre

Le développement important des houppiers après une intervention dynamique conduirait à une augmentation de la croissance en diamètre et à une fermeture relativement rapide (4-5 ans) du couvert. La reprise soutenue de l'élégage naturel, concomitante avec une diminution du développement du houppier, entraînerait par la suite une diminution progressive de la croissance en diamètre. Ce fonctionnement expliquerait les différences de cinétique observées entre élégage naturel et croissance en diamètre suite à une intervention en dépressage.

de déterminer s'il existe un réel compromis entre élégage naturel et croissance radiale qui permette de gagner sur les deux plans. Certes, nos résultats sur la réaction à court terme des peuplements tendent à montrer que toute intervention favorisant la croissance radiale ralentit le processus d'élégage naturel au cours des 5 à 7 années suivant l'intervention. Il est probable en revanche que cette relation change à plus long terme (cf. nos résultats sur la durée d'influence des interventions) et ce au bénéfice de la croissance radiale. Une telle hypothèse, essentielle pour la sylviculture juvénile du hêtre, devra faire l'objet d'une analyse plus poussée dans l'avenir à partir des mesures acquises sur le réseau sylviculture juvénile du hêtre. Elle militerait en tout cas en faveur d'une intervention unique en dépressage plutôt que plusieurs interventions rapprochées.

Réactivité des arbres à une éclaircie après une phase de compression

La figure 8 indique, pour deux exemples, que la réactivité en croissance radiale du hêtre suite à une éclaircie dynamique peut être tout à fait satisfaisante : +53 % pour le dispositif de Mont de l'Échelle (intervention dans une logique de rattrapage de la norme du BT-31 en deux

éclaircies espacées de 4 ans), +95 % pour le dispositif de Beaumont (première éclaircie calée sur la norme N4 d'Oswald). Il faut noter que l'excellente réactivité du hêtre aux éclaircies pour des arbres de moins de 80 ans avait déjà été soulignée en 1989 par Bouchon et al. Le problème ne réside donc pas, en première analyse³, dans la capacité de réaction du hêtre mais dans les conséquences pour la qualité (apparitions de gourmands, contraintes de croissance). Sur trois sites (Faye de Montrond, Beaumont, Mont-Échelle) on observe également une poursuite de l'élégage naturel, de l'ordre de 10 cm par an en moyenne sur une période de 4 à 6 ans après éclaircie. Cet élégage résiduel, dont la durée et l'intensité semblent dépendre de l'âge des peuplements, va dans le sens d'une possible anticipation de la sortie de phase de compression par rapport aux objectifs de hauteur élaguée en fin de cycle sylvicole : 7-8 m en bonne fertilité, 6-7 m en fertilité moyenne et 5-6 m en faible fertilité. Il reste cependant à préciser le rôle de la méthode de sortie de phase de compression (détourage, intervention en plein), le détourage étant susceptible de réduire plus fortement cet élégage naturel résiduel. En outre, cet élégage affecterait les tiges de manière très différente

selon leur branchaison, les fourches ayant apparemment un rôle important dans la stabilisation des houppiers (Ningre, communication personnelle). Ces différentes questions sont actuellement abordées au travers de la mise en place d'expérimentations comparant un itinéraire en détourage et un itinéraire en plein à deux stades de hauteur dominante (Chopard et al. 2006).

Quels itinéraires sylvicoles en phase juvénile ?

Réponse positive de l'accroissement radial aux dépressages, réponse négative de l'élégage au dépressage, compromis à court terme inévitable, compromis à long terme à l'avantage de la croissance en diamètre et bonne réactivité en croissance radiale des arbres après compression : comment tirer parti de tous ces résultats ? Quelles conséquences sylvicoles immédiates ? Quelles pistes ou lignes directrices ? Comment gérer les nombreuses incertitudes ? Nous présentons ici quelques réflexions issues des résultats nos essais :

■ si l'on observe la relation hauteur totale/diamètre et la relation hauteur totale/hauteur de première branche verte (non figuré) pour l'ensemble des placettes témoins (sans dépressage) de nos dispositifs, l'ob-

³ L'objectif d'une croissance radiale supérieure ou égale à 3mm par an après une phase de compression plus ou moins longue mériterait sans doute une analyse plus approfondie.

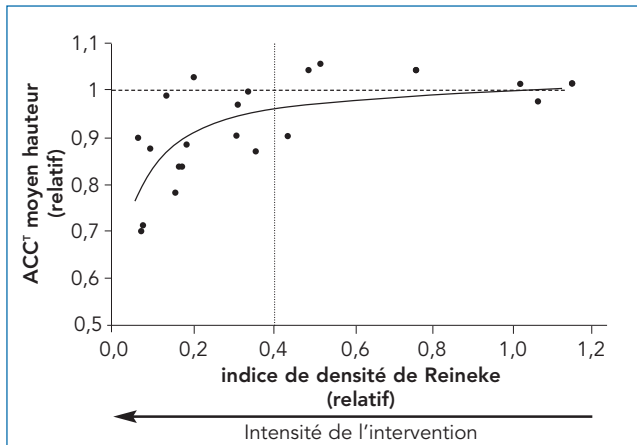


Fig. 6 : relation entre l'accroissement moyen relatif (par rapport au témoin) en hauteur et l'indice de densité de Reineke, après dépressage

Seuls les résultats obtenus pour les peuplements de moins de 7 m de haut (hauteur moyenne des arbres échantillons) sont présentés (résultats non significatifs pour les peuplements de plus de 7 m)

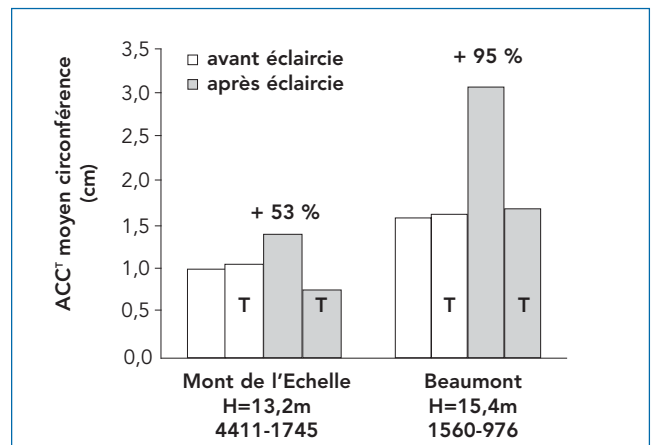


Fig. 8 : réactivité de la croissance en diamètre pour deux peuplements (placettes) de moins de 50 ans suite à une intervention dynamique en éclaircie

Les arbres suivis sont les arbres d'avenir (250 t/ha). Les hauteurs moyennes des tiges échantillons au moment de l'intervention ainsi que les variations de densité sont indiquées pour chaque placette. T : placette témoin.

jectif général d'une hauteur élaguée de 7 m semble pouvoir être envisagé vers 15 m de hauteur moyenne⁴ avec un diamètre moyen de l'ordre de 13 cm. La même démarche effectuée sur les placettes ayant subi des interventions dynamiques (proche des normes du BT-31), aboutit à une hauteur moyenne de 18 m pour un diamètre moyen de l'ordre de 20 cm.

■ Étant donné les caractéristiques des interventions menées dans nos dispositifs et de leur histoire (des dépressages ont pu être effectués avant l'installation des dispositifs), il nous semble raisonnable de proposer une sortie de phase de compression pour des hauteurs dominantes de 13-15 m (selon fertilité) pour de simples nettoisements et à des hauteurs dominantes de 15-17 m (selon fertilité) pour une seule intervention en dépressage. Pour cet itinéraire avec un dépressage, une sortie de phase de qualification plus précoce peut être envisagée ($H_o = 12-15$ m) à condition de prévoir un éventuel élagage artificiel des tiges désignées. L'utilité de l'application de deux dépressages à 4 et 8 m (Duplat et al. 1996) nécessite de plus amples investigations.

■ Nos résultats sur le compromis à court terme entre accroissement en

diamètre et élagage naturel, bien que partiels, associés à des considérations pratiques militent en faveur d'un dépressage ramenant la densité à 3000 - 4000 tiges/ha à une hauteur dominante avoisinant les 7 m dans les régénérations denses. Lorsque les peuplements sont de densité plus modeste (de l'ordre de 1,5 fois à deux fois cette densité objectif), le dépressage ne semble pas indispensable.

Ces éléments ne doivent pas être pris comme des directives mais susciter des débats constructifs autour de l'utilité ou non des dépressages en phase juvénile. Ces débats doivent être alimentés par un processus continu de recueil de données via des dispositifs d'observations et expérimentaux, couplés à des placettes de références permettant d'appréhender les coûts. Il est utile de remarquer que nos réflexions vont dans le sens des orientations données par Duplat et al. (1996) aux nuances près des hauteurs envisagées pour la sortie de phase de compression et du nombre de dépressages préconisés. Comme le rappellent ces auteurs, un diagnostic des peuplements au cours de la phase de compression est indispensable pour planifier au

mieux les interventions de sortie de phase de compression.

Conclusions et perspectives

Les résultats obtenus à partir des expérimentations sur la sylviculture juvénile du hêtre apportent des éléments de discussion intéressants sur les itinéraires envisageables pour atteindre nos objectifs en fin de phase de qualification (vigueur, hauteur élaguée) : itinéraires à un seul dépressage (intervention type BT-31) à $H_o = 6-8$ m suivi d'une phase de compression, ou bien itinéraire privilégiant de simples nettoisements. Ces analyses ont permis de pointer les principales questions sur lesquelles il est encore nécessaire de progresser : compromis à long terme entre accroissement radial et élagage naturel, réactivité (en croissance, qualité) des arbres en sortie de phase de compression selon le type d'éclaircie (détourage, éclaircie en plein), l'historique des interventions en phase juvénile, et l'effet comparé des interventions en plein ou localisées au stade des dépressages. Le réseau d'expérimentation sur la sylviculture juvénile du hêtre et celui en cours sur la comparaison détourage/intervention en

⁴ Il s'agit des hauteurs moyennes des arbres échantillons, représentatifs d'une population de tiges d'avenir (en général de l'ordre de 250 t/ha).

P. Georges, ONF



Gobessart : modalité dépressage fort à 8m.

P. Georges, ONF



Gobessart : modalité témoin.

plein devraient bientôt apporter des résultats supplémentaires permettant de lever de nombreuses incertitudes. Nous avons délibérément restreint notre étude aux variables circonférence et hauteur de première branche verte. De nombreuses autres variables sont mesurées dans nos dispositifs : hauteur de première branche morte, diamètre de la première branche verte, écart à la verticalité, proportion d'arbres fourchus, notation du chancre, gourmands. Elles feront l'objet d'une analyse complémentaire dans les prochaines années.

Thomas CORDONNIER

Chargé de recherche
ONF, DTEC-Recherche

Brigitte PILARD-LANDEAU

Responsable du service technique
territorial
ONF, DT Ile-de-France — Nord-Ouest

Bruno CHOPARD

Responsable du pôle recherche et
progrès technique
ONF, DT Bourgogne —
Champagne-Ardenne

Remerciements

Nos remerciements vont ici à tous ceux qui ont, peu ou prou, participé à l'installation et au suivi des dispositifs expérimentaux sur la sylviculture juvénile du hêtre. Nous voudrions saluer les membres du groupe de travail *sylviculture juvénile du hêtre et associés*, plus particulièrement : Jérôme Bock, Eva Simon, Jérôme Piat, François Conrard, Didier François, Françoise Plancheron, Éric Alger et Ariane Angelier.

Bibliographie

BOUCHON J., DHOTE J.F., LANIER L., 1989. Note sur la réaction individuelle du hêtre à différentes intensités d'éclaircie et à différents âges. *Revue Forestière Française*, vol. 41, n° 1, pp. 39-50

CHOPARD B., BOCK J., CORDONNIER T., 2006. Protocole sur le détourage du hêtre en sortie de phase de compression. ONF Département recherche.

DUPLAT P., ROMANT-AMAT B., CHOLLET F., DEMOLIS C., KIEFER E., 1996. Sylviculture du hêtre. *Bulletin technique*, n° 31, pp. 29-33

DUPLAT P., DEMARCO P., 2000. Oak key project: response to early thinning. Program EU FAIR CT95-0823 « New silvicultural alternatives in young oak high forests : consequences on high quality timber production ».

LE GOFF N., OTTORINI J.M., 1999. Effets des éclaircies sur la croissance du hêtre : interaction avec les facteurs climatiques. *Revue Forestière Française*, vol. 51, n° 2 spécial « Fonctionnement des arbres et écosystèmes forestiers : avancées récentes et conséquences sylvicoles », pp. 355-364

ONF Département recherche et développement, 1998. Sylviculture juvénile du hêtre en futaie régulière : cas des régénérations naturelles. Réseau expérimental : protocole avec son avenant n° 98-1.

Les interventions sylvicoles dans la hêtraie adulte : connaissances sur la croissance en grosseur

L'article précédent a mis l'accent sur le compromis entre élagage naturel et croissance radiale en phase juvénile. Cet article prend le relais en traitant la question fondamentale des effets des éclaircies sur la croissance radiale en phase adulte. La question des itinéraires de rattrapage pour les peuplements en surdensité est abordée en premier lieu pour en montrer l'intérêt et en révéler les limites. Les auteurs insistent sur les bénéfices d'une sylviculture dynamique dès la sortie de phase juvénile afin d'éviter « d'être confronté encore longtemps à ces problèmes de rattrapage ».

Issues d'une sylviculture passée peu dynamique, les hêtraies françaises en futaie régulière souffrent généralement de surdensité : les arbres très élancés de ces hêtraies pourraient être plus gros étant donné leurs âges. Cette situation conduit à des problèmes de stabilité, de détérioration de leur qualité (cœur rouge...). C'est pourquoi la question du rattrapage de sylviculture pour des hêtraies où cela est encore possible (peuplement de moins de 80 ans si la stabilité n'est pas déjà trop contraignante) est une préoccupation prégnante pour les gestionnaires de futaies régulières de hêtre. Les interventions sylvicoles dans la hêtraie adulte ont des effets sur la croissance en grosseur des arbres qui concernent toutes les classes sociales du peuplement (quoique de manière différente). Des simulations au moyen du modèle de croissance *Fagacées* ont mis ces effets en évidence de façon détaillée (première partie de l'article). Les données disponibles de l'expérience d'éclaircie de Souilly confirment ces effets, et ont permis, par ailleurs, de caractériser les variations annuelles de l'accroissement (seconde partie

de l'article). Avec ces données, il apparaît qu'en réponse à une éclaircie, l'accroissement courant, au cours d'une rotation, évolue d'une façon qui dépend à la fois de l'intensité de l'éclaircie et du matériel sur pied auquel elle s'applique. L'expérience de Souilly a également permis de montrer que les précipitations ont un effet notable sur la croissance des arbres.

Résultats acquis en utilisant le modèle *Fagacées*

Trois études récentes sur les hêtraies normandes (en 1997), lorraines (en 1999) et picardes (en 2000) ont permis de caractériser les types de peuplements de chacune de ces régions en s'appuyant sur l'inventaire d'une cinquantaine de placettes, illustrant de larges gammes d'âge, de fertilité et de niveau de capital sur pied. Le modèle de croissance *Fagacées* implémenté dans la plate-forme de simulation CAPSIS (voir encadré) a été utilisé pour tester sur ces peuplements inventoriés différents itinéraires sylvicoles, et comparer ainsi les peuplements finaux obtenus du point de vue de la dimension des produits. Ces

études sont à l'origine de nouveaux guides de sylviculture : celui de Lorraine et celui de la hêtraie nord-atlantique (voir les articles correspondants dans ce volume). C'est la démarche employée ici pour illustrer la réaction des peuplements de hêtre aux éclaircies en fonction de l'âge et de l'intensité des prélèvements. L'idée est de comparer les performances d'un peuplement qui suit un itinéraire dynamique depuis le début (placette CO10 dans l'exemple qui suit) à celles d'un peuplement qui rattrape ce même itinéraire seulement vers 60 ans (placette R32 dans l'exemple). L'itinéraire choisi pour cette illustration est la norme N4, proposée à l'origine par Oswald (1981) à titre expérimental et qui depuis 20 ans est connue par les gestionnaires de hêtraies pour être un itinéraire dynamique, excepté le cas des fortes fertilités qui exigent des prélèvements plus forts.

Réaction aux éclaircies en fonction de l'histoire du peuplement

Le tableau 1 présente deux jeunes peuplements picards : l'un (CO10) issu de plantation en forêt doma-

Le modèle de croissance *Fagacées* dans la plate-forme de simulation CAPSIS

Fagacées est un modèle de croissance dédié aux peuplements purs et réguliers de hêtre ou de chêne sessile (Dhôte, 1995). Il permet de simuler la production des peuplements (hauteur dominante, surface terrière et volume), la croissance individuelle des arbres (hauteur et diamètre) ainsi que leur évolution morphologique (structure interne des arbres en cernes annuels, remontée du houppier, volumes). Les entrées contrôlées par l'utilisateur sont d'une part les caractéristiques écologiques de la station (région de production, indice de fertilité), d'autre part la sylviculture (série de coupes d'éclaircie programmées en manipulant la distribution en classes de diamètre). Le modèle est conçu pour fournir des prévisions à l'échelle du peuplement et sur le long terme (100 à 200 ans). Son pas de temps est de 3 ans, et la surface simulée est 1 hectare. *Fagacées* exécute ses simulations à partir d'un peuplement initial : celui-ci peut être soit fourni par l'utilisateur (inventaire en classes de diamètre, âge, hauteur dominante et date), soit créé par le simulateur selon différentes options (régénération naturelle ou plantation).

Fonctionnalités : *Fagacées* appartient à la famille des modèles d'arbre indépendants des distances : on connaît la taille de chaque arbre, ce qui permet d'estimer l'intensité moyenne de la compétition (indices de densité du peuplement) ainsi que le rang social de chaque arbre (position relative de l'arbre au sein de l'histogramme en classes de diamètre). Avec ce type de modèles, on peut explorer de manière assez souple des stratégies d'éclaircie variées, quant au niveau général de matériel sur pied (intensité et rotation des coupes) et quant à la nature des éclaircies (par le haut, par le bas). Par contre, on ignore la position des arbres dans l'espace et par conséquent l'intensité locale de la compétition, par exemple au voisinage d'arbres objectifs. De ce fait, le modèle est plutôt adapté aux itinéraires d'éclaircies en plein. Pour les itinéraires de type détournement, les prévisions fournies par le modèle sous-estiment vraisemblablement la croissance radiale des arbres détournés.

Calibration et domaine de validité : *Fagacées* a été calibré à partir de réseaux de placettes permanentes observées pendant 50 à 120 ans, couvrant la gamme complète des âges au-delà du stade bas perchis (de 30 à 250 ans) et largement dispersées sur toute la moitié Nord de la France. Du point de vue sylvicole, le réseau est constitué d'essais d'éclaircies, les coupes étant en plein et laissant sur pied entre 0,5 et 1 fois le matériel biologique maximal permis par la station. Sur le plan écologique, les stations représentées ont des indices de fertilité répartis dans la moitié supérieure des valeurs possibles. Pour les hêtraies, la calibration de la hauteur dominante tient compte des résultats les plus récents sur les variations entre régions pour l'allure des courbes de croissance, ainsi que de résultats et hypothèses provisoires en ce qui concerne les changements de productivité à long terme (Bontemps et al., 2006, ce volume).

Réalisation informatique : afin de faciliter son utilisation, *Fagacées* a été programmé sous la forme d'un module spécifique au sein de la plate-forme de simulation CAPSIS 4.1.5, écrite en langage java (de Coligny et al., 2004 ; Vallet & Dhôte, 2003). Ce logiciel, créé et administré par l'INRA (François de Coligny, UMR AMAP, Montpellier ; <http://coligny.free.fr/>), rassemble dans un même environnement informatique une trentaine de modèles différents.

J.F. Dhôte

niale de Compiègne âgé de 28 ans et l'autre (R32) en forêt domaniale de Retz âgé de 53 ans, inventoriés pour l'étude picarde en début de l'année 2000. Très proches en termes de fertilité, ces deux peuplements se différencient par un petit retard (surdensité) du peuplement de 53 ans qui s'est écarté de la norme N4 d'Oswald¹ (cf. positionnement de départ par rapport à la norme N4 sur la figure 1). Comparé au peuplement CO10 qui suit toujours l'itinéraire N4, le peuplement R32 représente une situation dite de rattrapage.

La simulation effectuée sous CAPSIS a consisté à suivre (peuplement CO10) ou à rattraper (peuplement R32) la norme N4 d'Oswald. L'hypothèse de départ était que le rattrapage de la norme N4 avant 60 ans pour R32 permettrait de combler le retard pris. La conservation privilégiée des plus gros arbres lors des éclaircies devait en effet permettre de compenser le handicap initial d'un plus faible diamètre dominant. En fait, le retard de croissance pris par le peuplement de 53 ans n'a pas pu être rattrapé (figure 2) : le peuplement R32 met 10 ans de plus que CO10 pour atteindre la classe de diamètre 60 cm (diamètre dominant²) !

Cet exemple est représentatif de l'effet significatif de l'histoire sylvicole sur la dynamique d'un peuplement. Les arbres dominants eux-mêmes sont affectés dans leur croissance radiale, comme cela a déjà pu être démontré (cf. Dhôte RFF 1997-6). D'où l'importance de travailler les peuplements de hêtre précocement et intensément.

Placette	Âge	Hauteur dominante	Fertilité : Ho à ans	Densité N/ha	Surface terrière (m ² /ha)	Diamètre dominant (cm)
CO10	28 ans	14,9 m	36,0 m à 100 ans	1002	15,7 m ² /ha	23,8 cm
R32	53 ans	24,8 m	36,4 m à 100 ans	443	24,6 m ² /ha	36,3 cm

Tab. 1 : caractéristiques des jeunes peuplements picards CO10 et R32, illustrant respectivement une sylviculture dynamique et une situation « de rattrapage »

¹ Norme établie à titre expérimental par H. Oswald (cf. « Le hêtre », Monographie INRA)

² Diamètre moyen des 100 plus grosses tiges à l'hectare.

Réaction aux éclaircies en fonction de l'intensité de prélèvement

Pour illustrer l'effet des intensités de prélèvement sur le diamètre dominant, des simulations ont été effectuées depuis le jeune âge selon trois itinéraires sylvicoles contrastés (figure 3) : un itinéraire sans éclaircie à valeur de témoin sans sylviculture (courbe noire), un itinéraire suivant la norme N4 d'Oswald, itinéraire minimum pour mener une sylviculture dynamique sur stations fertiles (courbe jaune) et un itinéraire suivant la norme « IT2 » actuellement préconisée dans le guide de sylviculture de la hêtraie nord-atlantique en cours de diffusion (courbe verte). Ces trois simulations concernent des stations de bonne fertilité ($H_0 = 35$ m à 100 ans).

Les points figurés représentent quant à eux des peuplements réels inventoriés en Normandie (en 1996) et en Picardie (en 2000). À partir de la lecture de ce graphique, deux constats peuvent être faits :

- les peuplements âgés (plus de 80 ans) présentent une gamme de diamètre dominant comprise entre l'itinéraire sans intervention et celui correspondant au suivi de la norme N4.
- à l'inverse, les jeunes peuplements inventoriés (surtout en dessous de 60 ans ; peuplements pour l'essentiel issus de plantations) révèlent un potentiel suffisant pour suivre l'évolution simulée avec l'itinéraire préconisé dans le guide de la hêtraie nord-atlantique.

Actuellement, le diamètre dominant à 100 ans est de l'ordre de 55 cm alors que la sylviculture préconisée permettrait d'obtenir 70 cm.

L'ensemble de ces résultats milite en faveur d'une sylviculture dynamique dès les premières éclaircies, puis tout au long de la vie du peuplement. Le rattrapage ne permet en aucun cas de compenser la perte de diamètre dominant liée à une sylviculture trop timorée. Une telle situation doit donc être évitée autant que possible. Cependant,

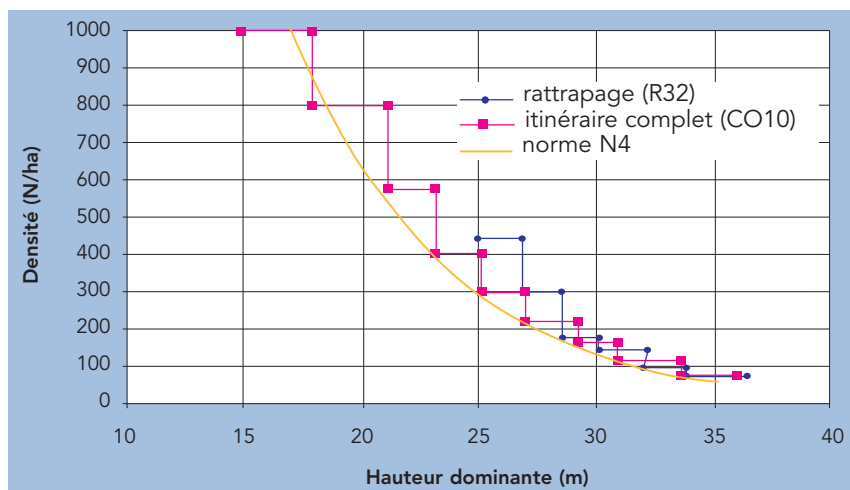


Fig. 1 : norme de densité N4 (Oswald) et itinéraires sylvicoles suivis pour les simulations de l'évolution de R32 et CO10

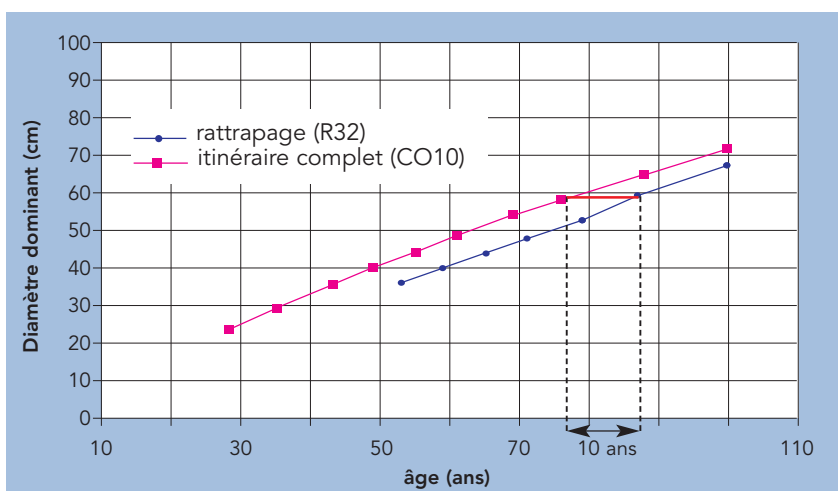


Fig. 2 : évolution du diamètre dominant pour les itinéraires suivis par R32 et CO10 résultant des simulations

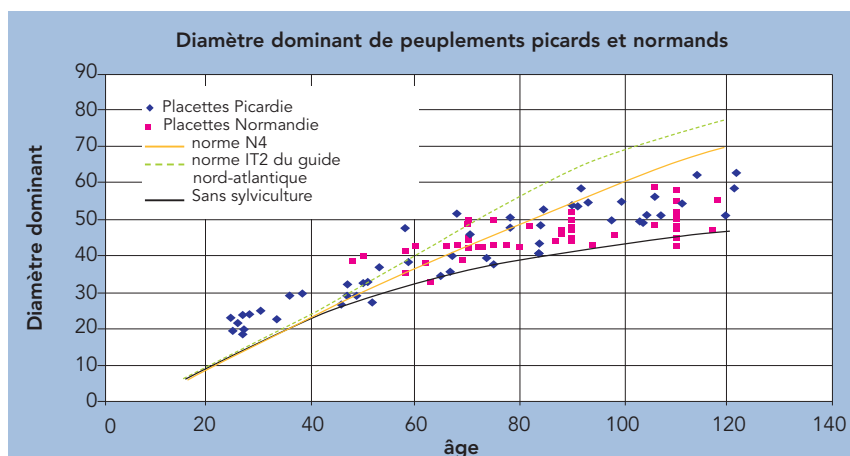


Fig. 3 : évolution du diamètre dominant pour les 3 itinéraires sylvicoles simulés (sans éclaircie, norme N4 et guide nord-atlantique) et valeurs observées pour les peuplements inventoriés en Normandie et en Picardie

appliqué aujourd'hui à des peuplements trop denses, un itinéraire de rattrapage permet de ne pas accentuer le retard pris sur le diamètre dominant. Les jeunes peuplements à haut potentiel de croissance devraient pleinement profiter, dans l'avenir, des éclaircies dynamiques réalisées au profit des arbres dominants, vigoureux et de qualité. L'expérimentation présentée en seconde partie fournit des éléments plus précis sur l'effet de l'intensité des éclaircies en fonction de la densité initiale des peuplements et des précipitations.

Résultats d'un dispositif expérimental : effets des éclaircies et des précipitations sur l'accroissement individuel

L'expérience d'éclaircie du hêtre en carré latin de Souilly, installée en 1963 (voir encadré), a donné lieu à un programme d'étude de l'accroissement courant annuel des tiges en fonction des caractéristiques de peuplement. L'éclaircie de l'hiver 1987-1988 a permis de recueillir et de mesurer les sections transversales de tiges prélevées à la hauteur de 1,30 m, sur un échantillon de 19 arbres par traitement, représentatif des peuplements soumis aux deux traitements d'éclaircie suivants (figure 4) : intensités « forte » (traitement C, norme N2) et « ultra-forte » (traitement A, norme N4).

NDLR : les notions d'éclaircies « forte » et « ultra-forte » de ce dispositif déjà ancien sont toutes relatives : rappelons que la norme N4 reste en deçà de la sylviculture dynamique préconisée pour la hêtraie nord-atlantique en station fertile.

Portant de 1964 à 1987, période au cours de laquelle 4 éclaircies ont été appliquées tous les 6 ans, l'étude a permis d'établir l'évolution de l'accroissement courant en surface terrière des arbres, pour chaque traitement et chaque période comprise entre deux éclaircies (Tableau 2).

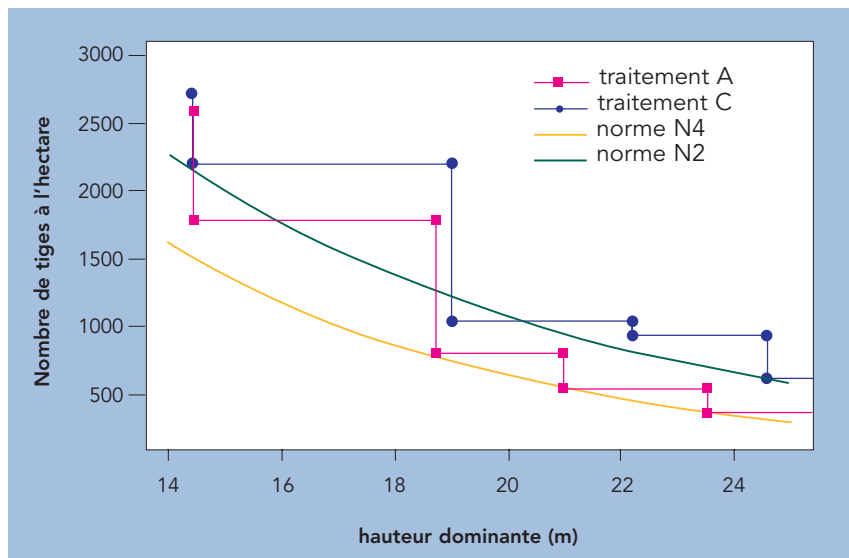


Fig. 4 : évolution du nombre de tiges dans le carré latin de Souilly pour les traitements A et C qui suivent respectivement les normes N4 et N2 d'Oswald (1981)

Le Carré latin de Souilly

Dans la forêt domaniale de Souilly (Meuse), en voie de conversion avancée en 1963, existaient de nombreux perchis de hêtres âgés de 30 à 40 ans. Ces perchis, assez homogènes et représentatifs de la région Nord-Est, convenaient tout particulièrement à une étude expérimentale des effets de différentes éclaircies sur la croissance du hêtre. Ainsi, un dispositif « moderne » en « carré latin » fut installé dans cette forêt durant l'hiver 1963-1964. Ce dispositif comporte 16 placettes unitaires d'une superficie de 20 ares chacune (avec zones de protection de 10 m de large), et quatre traitements répétés quatre fois. Le protocole initial, appliqué jusqu'en 1970, distinguait les traitements suivants :

- A : Eclaircie « ultra-forte »
- B : Témoin
- C : Eclaircie « forte »
- D : Eclaircies « normales »

A partir de 1974, deux modifications ont été apportées au protocole initial : choix de 100 « arbres de place » à l'hectare par placette et choix de « normes de densité » pour rendre plus homogène et plus rigoureuse la définition de chaque traitement d'éclaircie et faciliter la désignation des éclaircies. Une norme a été établie pour chaque traitement (sauf pour le témoin) : elle fixe le nombre de tiges à l'hectare (N) en fonction de la hauteur dominante (Ho) du peuplement principal après éclaircie. Ces normes ont été quantifiées par la relation suivante, où le paramètre β_i varie avec la norme :

$$N = 10^4 \exp^{\beta_i(Ho-2)}$$

- Traitement A -> Norme N4 : $\beta_4 = -0.1528722$
- Traitement C -> Norme N2 : $\beta_2 = -0.1239613$
- Traitement D -> Norme N1 : $\beta_1 = -0.1057303$

Les éclaircies sont sélectives et mixtes, « par le haut » au profit des arbres de place et « par le bas » pour les coupes sanitaires. La rotation a été de 6 ans pour les quatre premières éclaircies considérées ici (période de 1963 à 1988).

Année	Âge	G (m ² ha ⁻¹)		N ha ⁻¹		Ho (m)		Rdi		Ie	
		A	C	A	C	A	C	A	C	A	C
1963	35	25,7	25,2	2 585	2 716	14,43	14,41	0,79	0,78	0,24	0,15
1969	41	24,3	27,1	1 782	2 199	18,72	19,01	0,71	0,80	0,39	0,42
1975	47	24,3	27,2	809	1 038	20,98	22,21	0,62	0,71	0,20	0,13
1981	53	25,5	29,8	546	936	23,54	24,59	0,60	0,74	0,19	0,20

Tab. 2 : caractéristiques avant éclaircie (G, N, Ho et Rdi) des placettes de l'étude et intensité (Ie) des éclaircies pratiquées à chaque rotation, pour les traitements A et C

Origine et intérêt de l'indice de densité Rdi

À un âge donné, ou mieux, pour une hauteur dominante donnée, le nombre de tiges à l'hectare est une mesure adéquate de densité pour des peuplements équiennes d'une espèce considérée. Les forestiers Hollandais Hart et Becking (Pardé et Bouchon 1988) ont été parmi les premiers à proposer une mesure de densité permettant de comparer les conditions de croissance, liées à la surface moyenne disponible par arbre, de peuplements de hauteurs différentes ou d'un peuplement donné au cours du temps. Cependant, leur facteur d'espacement normalise cet espace de façon arbitraire, donnant un espacement relatif moyen entre arbres en mètres par mètre de hauteur dominante. Reineke (1936) a remarqué qu'il y avait, pour une circonférence moyenne donnée, un nombre maximum d'arbres à l'hectare dépendant uniquement de l'espèce considérée (donc, ni de l'âge, ni de la hauteur de peuplement). Cette limite biologique constitue la base d'une mesure objective de densité, obtenue en rapportant à l'hectare le nombre de tiges d'un peuplement considéré au nombre maximum de tiges que l'espèce peut avoir pour une circonférence moyenne égale à celle du peuplement. Ainsi, la densité de valeur 1 est celle de peuplements en auto-éclaircie par mortalité naturelle, pour lesquels l'espace moyen disponible par arbre est le minimum possible. Sans éclaircie, la circonférence moyenne de tels peuplements augmentera avec la hauteur, et le nombre de tiges se réduira de façon déterminée, maintenant la densité à la valeur 1. Pour les peuplements de densité inférieure à 1, s'il n'y a pas d'éclaircie, la circonférence moyenne augmentera avec la hauteur, et le nombre de tiges se réduira suffisamment peu (peuplement fermé) ou restera à peu près constant (peuplement ouvert) jusqu'à ce que la densité se rapproche de 1.

La relation linéaire entre le logarithme du nombre de tiges et le logarithme de la circonférence moyenne, pour des peuplements de densité maximum influencés par la seule mortalité naturelle, appelée relation « Taille-densité » depuis les travaux de Reineke (1933), sert de base aux U.S.A. à la définition d'une mesure de densité de peuplement : c'est le Rdi. Les peuplements de densité maximale se caractérisent alors par un Rdi égal à 1, tandis que sur un graphe où l'on a porté le logarithme de la circonférence moyenne (Cg) en fonction du logarithme du nombre de tiges à l'hectare (N), les droites d'iso-densité se présentent comme des droites parallèles à la droite de densité maximum (Rdi = 1). Il est dès lors facile de contrôler la densité d'un peuplement, connaissant le nombre de tiges à l'hectare et la circonférence moyenne (obtenue à partir de la surface terrière et du nombre de tiges), en situant le point correspondant sur un graphe où on aura représenté dans un repère bi-logarithmique (Cg, N) les droites d'iso-densité pour des valeurs du Rdi échelonnées de 0,1 en 0,1 par exemple. De tels graphes sont couramment utilisés aux U.S.A. pour la gestion et le contrôle du développement des peuplements (Hibbs 1987). Ils permettent de définir à la fois le moment des interventions en fonction de la densité atteinte par le peuplement et leur intensité en fonction de la densité à atteindre après intervention : celle-ci dépendra non seulement du nombre de tiges prélevées mais également de leur dimension moyenne (facteur k d'éclaircie).

Ainsi, l'étude des placettes témoins (sans interventions) de hêtre du réseau expérimental fait apparaître la relation suivante entre le nombre de tiges N_T ($N_T = N_{\max}$) et la circonférence Cg de l'arbre de surface terrière moyenne de la placette :

$$\bullet \text{ Log } N_T = a + b \log Cg$$

donc :

$$\bullet N_T = e^a Cg^b \quad (1)$$

avec :

$$a = 14,0367 \quad b = -1,667$$

La densité d'une placette donnée de circonférence moyenne Cg est quantifiée par l'indice de densité relative Rdi égal au rapport de l'espace moyen par arbre dans une placette de densité maximum de même circonférence moyenne à l'espace moyen par arbre dans la placette. Si N est le nombre de tiges à l'hectare de la placette, le Rdi est donné par l'équation suivante :

$$\bullet Rdi = \frac{N}{e^a Cg^b} \quad (2)$$

On a donc $0 \leq Rdi \leq 1$.

Par analogie avec le Rdi, l'intensité d'une éclaircie (Ie) qui prélève Ne tiges/ha est donnée par l'équation suivante :

$$\bullet Ie = \frac{Ne}{e^a Cg^b} \quad (3)$$

Outre les effets des éclaircies, cette étude a fait apparaître un effet des conditions climatiques annuelles, essentiellement à travers l'importance des précipitations de la saison de végétation de l'année courante. Les grands traits de l'accroissement moyen des arbres dominants entre deux éclaircies apparaissaient en éliminant les sources de variation climatiques et résiduelles. La « densité » de peuplement, représentée par l'indice Rdi (voir encadré), est basée sur le nombre de tiges maximum (Nmax) d'un peuplement pour un diamètre moyen donné, limité par la mortalité naturelle. Cette relation, dite de « taille-densité » a été établie au moyen des placettes témoin non éclaircies gérées par l'INRA qui a hérité du réseau expérimental centenaire dont elles font partie. La valeur du Rdi est comprise entre 0 et 1.

On peut définir de même l'intensité d'éclaircie le qui prélève Ne tiges/ha (voir encadré). On a également $0 \leq l \leq 1$. La densité d'une placette de densité Rdi devient (Rdi - l) après une éclaircie d'intensité l pour un facteur d'éclaircie k égal à 1 ; elle est supérieure à (Rdi - l) si $k < 1$ et inférieure si $k > 1$. L'intensité de l'éclaircie ainsi calculée mesure donc la chute de densité subie par le peuplement.

Isoler les différents facteurs qui influencent la croissance

Pour pouvoir isoler l'effet des divers facteurs qui influencent la croissance, une relation a été obtenue, liant l'accroissement courant individuel des arbres à leur dimension ainsi qu'aux caractéristiques de peuplement et aux conditions climatiques. Le cumul des précipitations (GSP) enregistrées durant la saison de végétation (mois de juin à août) s'est avéré être la seule donnée climatique disponible rendant compte des effets du climat (Le Goff et Ottorini, 1993). Les effets additionnels de la température, de l'évapotranspiration potentielle ont

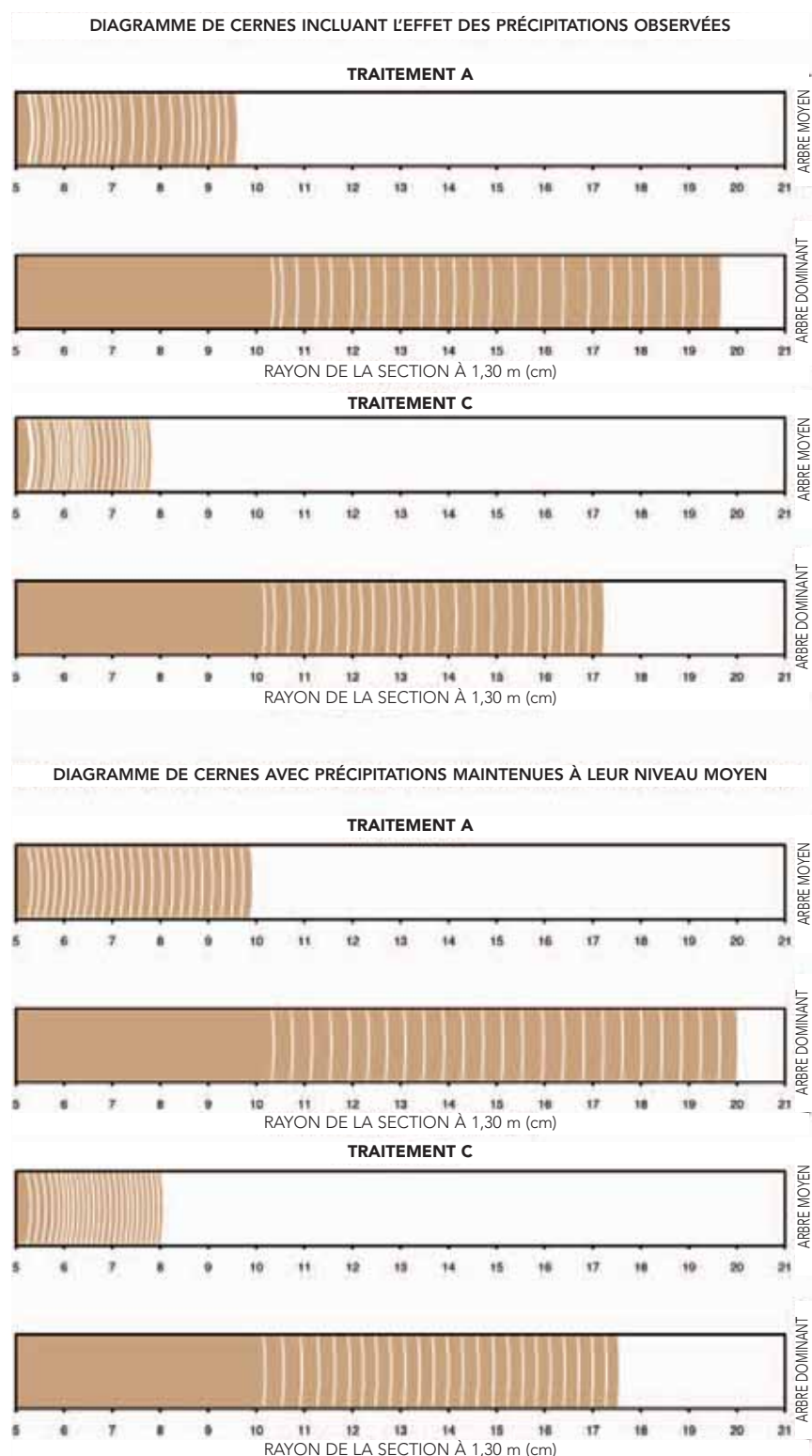


Fig. 5 : diagrammes de cernes des arbres moyen et dominant des placettes soumises à éclaircies « ultra-fortes » (A) et « fortes » (C), avec et sans effet des variations climatiques

Reconstitution de la section de la tige à 1,30 m, de 1964 à 1987

été considérés sous différentes formes, mais sans succès.

Effet global des traitements d'éclaircie sur la largeur de cerne

La croissance individuelle en surface terrière des arbres est apparue sous la forme d'une équation différentielle tenant compte du climat, de caractéristiques de peuplement et de la surface terrière initiale des arbres. Il était alors possible de reconstituer la croissance des arbres à partir de cette équation. En particulier, la succession des accroissements d'arbres de circonférences moyenne et dominante des placettes soumises aux traitements d'éclaircie A et C peut être illustrée par un diagramme de cernes (figure 5).

Si l'on reconstitue la croissance avec les précipitations observées, les effets climatiques sur l'accroissement apparaissent sur ce diagramme. L'appréciation de l'effet des traitements sylvicoles est, par contre, facilitée par la possibilité de faire abstraction des effets climatiques en fixant le niveau des précipitations (GSP) à la valeur médiane observée (244,8 mm). Il apparaît alors que le traitement (A) d'éclaircies fortes produit des cernes plus larges que le traitement (C) d'éclaircies modérées. En particulier, pour les arbres dominants, la largeur de cerne passe de 2 à 4 mm. De plus, pour les deux traitements, la largeur des cernes apparaît constante en l'absence de variations climatiques, et révèle la tendance de l'effet des traitements appliqués.

Réponse à l'éclaircie en fonction de son intensité et de la densité initiale

En observant l'évolution des accroissements courants (en surface terrière), une classification de la réponse des arbres à l'éclaircie a été tentée (figure 6). Dans la limite des densités initiales (densité avant éclaircie) des placettes étudiées aux

dates de passage considérées, au cours des 6 années d'une période d'éclaircie, l'accroissement courant en surface terrière croît pour les éclaircies d'intensité comprises entre 0,2 et 0,4 (c'est-à-dire, quand l'éclaircie fait chuter la densité de 0,2 à 0,4 unités). Pour les éclaircies d'intensité inférieure à 0,2 l'accroissement courant en surface terrière dépend de la densité initiale : il décroît si elle est supérieure à 0,7 et passe par un maximum si elle est inférieure à cette valeur.

Les schémas de réponse des arbres illustrés à la figure 6 résultent de différentes conditions d'évolution de la densité de peuplement après éclaircie, en fonction de la densité initiale et de l'intensité des éclaircies pratiquées. Pour fixer les idées, il est à noter que pour parvenir à une éclaircie d'intensité 0,2 il faut effectuer

des prélèvements en surface terrière de 4 à 10 m²/ha pour des circonférences moyennes variant de 10 à 120 cm pour une valeur de k de 1, la variation étant à peu près linéaire entre ces limites (une règle de trois permet donc le calcul des valeurs intermédiaires). Ces surfaces terrières sont réduites par un facteur de 0,64 pour k = 0,8 et augmentées par un facteur de 1,44 pour k = 1,2 (Tableau 2).

Ces schémas de réponse font abstraction des effets du climat qui peuvent plus ou moins moduler la réponse des arbres à l'éclaircie une année donnée.

Effets du climat

La relation de prédiction de l'accroissement courant individuel des arbres permet de calculer sa varia-

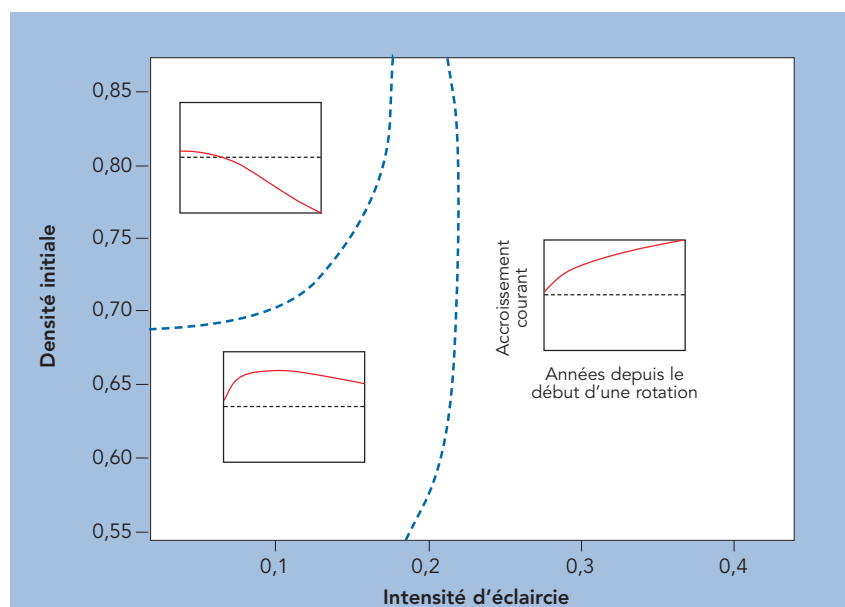


Fig. 6 : classification de la réponse des arbres à l'éclaircie

Evolution de l'accroissement courant en surface terrière pour une rotation de 6 ans, en fonction de la densité initiale (Rdi) avant éclaircie et de l'intensité (Ie) de l'éclaircie (voir le texte).

k	Circonférence moyenne (cm)				
	10	30	60	90	120
0,8	2,7	3,9	5,0	5,7	6,3
1	4,3	6,2	7,8	8,9	9,8
1,2	6,2	8,9	11,2	12,8	14,1

Tab. 2 : prélèvements en surface terrière (m²/ha) correspondant à une éclaircie d'intensité 0,2

en fonction de la circonférence moyenne du peuplement et du facteur d'éclaircie k.

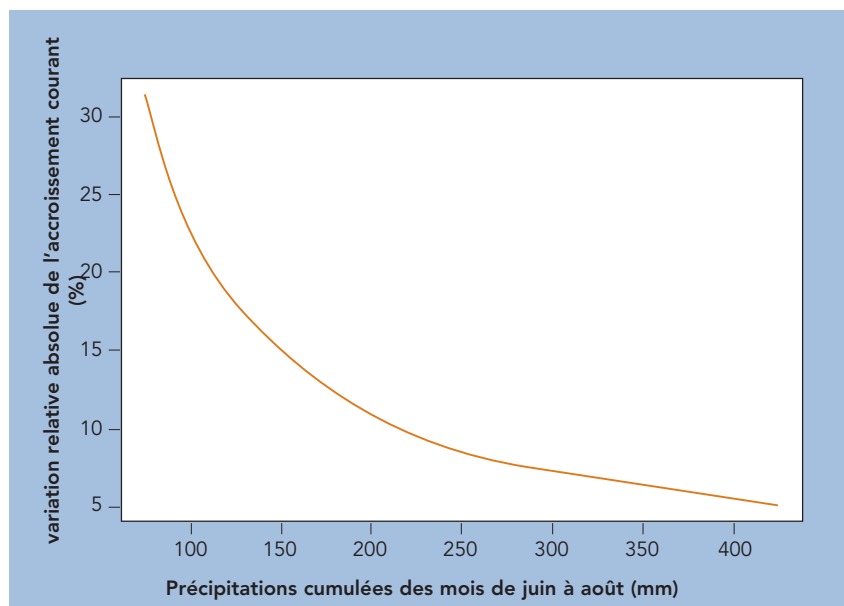


Fig. 7 : valeur absolue de la variation (en %) de l'accroissement en surface terrière en fonction des niveaux de précipitations estivales si on applique une variation de 50mm des précipitations.

tion relative pour une variation donnée des précipitations cumulées de la saison de végétation. Exprimée en valeur absolue et considérée en fonction du niveau des précipitations estivales, cette variation relative traduit la sensibilité de l'accroissement courant aux variations de précipitations. Il apparaît ainsi une sensibilité moindre de l'accroissement courant aux niveaux élevés des précipitations. En effet, cette variation relative peut aller de 5 % à 30 % pour une variation de 50 mm des précipitations prises en compte (figure 7). Cet effet peut être relié à l'importance du déficit hydrique estival qui s'accroît d'autant plus que le niveau des précipitations décroît pendant la période où le hêtre poursuit normalement sa croissance secondaire (La réserve utile en eau du sol du dispositif de Souilly, RU, peut être estimée approximativement à 150 mm).

Conclusions pratiques pour le gestionnaire

Les situations actuelles des hêtraies adultes en futaie régulière sont sérieuses entre, d'une part, les futaies cathédrales trop âgées pour faire

l'objet d'un rattrapage et, d'autre part, les futaies en surdensité mais d'un âge et d'une stabilité encore raisonnables pour envisager un rattrapage. Celui-ci doit être mis en œuvre tout en sachant que le retard pris sur la croissance en diamètre par un peuplement avant 60 ans est conservé jusqu'à la fin de sa révolution : plus les éclaircies fortes sont reculées, plus la révolution (jusqu'au diamètre d'exploitabilité) est allongée et donc plus le peuplement est exposé à des aléas (tempêtes, dégradations du bois notamment). Même si le gain de croissance obtenu par le rattrapage ne comble pas le retard pris par le peuplement, le rattrapage est indispensable pour éviter que la stabilité ne s'aggrave et que l'âge d'exploitabilité ne soit repoussé. Le stress occasionné par des coupes plus fortes pour réaliser un rattrapage est compensé par les bienfaits sur la croissance du peuplement après éclaircie.

Ensuite, il faut garder en mémoire que :

- la croissance des arbres dominants est nettement affectée par l'itinéraire sylvicole appliqué au peuplement. Ceci s'applique également

aux arbres objectifs qui sont choisis parmi les dominants et au profit desquels les éclaircies sont pratiquées.

- pour obtenir un effet prolongé de l'éclaircie (plus de 6 ans), il faut opérer des coupes assez fortes ; si on désire réaliser des prélèvements moins intenses tout en gardant l'effet de l'éclaircie, cela nécessite de prévoir des rotations plus courtes (moins de 6 ans).

- le niveau des précipitations estivales joue fortement sur la croissance radiale du hêtre, ce qui a été observé même avec une réserve en eau utile du sol élevée : une densité faible réduit probablement la concurrence pour l'eau entre arbres. Pour éviter d'être confronté encore longtemps à ces problèmes de rattrapage, le gestionnaire de jeunes hêtraies doit donc suivre la sylviculture la plus dynamique possible adaptée à leurs fertilités et ne pas se laisser dépasser par leurs croisances importantes.

Eva SIMON

ex chargée de recherche
ONF, STT Ile-de-France – Nord-Ouest
eva.simon@onf.fr

Jean-Marc OTTORINI

Noël LE GOFF

INRA, Champenoux (54)
Équipe « Croissance et Production »
ottori@nancy.inra.fr
le_goff@nancy.inra.fr



R. Canta, Inra

Dispositif d'éclaircie de Souilly. Grosseurs comparées en 2003 d'arbres de circonférence dominante pour des placeaux d'éclaircie « forte » (C, à gauche) et « ultra-forte » (A, à droite). Les photos ont été prises à même distance des arbres à comparer, situés au premier plan et de circonférences respectives 139 et 156 cm.

Bibliographie

- DHOTE J.F., 1995 Définition de scénarios d'éclaircie pour le hêtre et le chêne. *Revue Forestière Française*, vol. 47, n° « Modélisation de la croissance et de la qualité des bois », pp. 106-110
- COLIGNY F. de, ANCELIN P., CORNU G., COURBAUD B., DREYFUS P., GOREAUD F., GOURLET-FLEURY S., MEREDIEU C., ORAZIO C., SAINT-ANDRE L., 2004. Capsis : Computer-Aided Projection for Strategies In Silviculture : open architecture for a shared forest-modelling platform. *In : Proceedings of the IUFRO Working Party S5.01-04 conference (September 2002) Harrison, British Columbia, Canada*, pp. 371-380
- VALLET P., DHOTE J.F., 2003. Fagacées version 3 (module java sous CAPSIS).
- DHOTE J.F., 1997. Effets des éclaircies sur le diamètre dominant dans des futaies régulières de hêtre ou de chêne sessile. *Revue Forestière Française*, vol. 49, n° 6, pp. 557-577
- PARDE J., OSWALD H., TISSERAND A., 1979. Le « Carré Latin » de Souilly : dispositif expérimental d'éclaircie du hêtre. Document n° 79/02, Mai 1979, Station de Sylviculture et de Production, INRA-Nancy. 11 p.
- OSWALD H., 1981 Modèles de sylviculture et normes de densité. *In : Le hêtre*, TESSIER DU CROS E. (coord.) Paris: INRA, pp. 339-345
- HIBBS D., 1987. The Self-Thinning Rule and Red Alder Management. *Forest Ecology and Management*, vol. 18, pp. 273-281
- PARDE J., BOUCHON J., 1988. Dendrométrie. 2^{ème} édition. Nancy : ENGREF. 328 p.
- REINEKE L.H., 1993. Perfecting a stand density index for even-aged forests. *Journal of Agricultural Research*, vol. 46, n° 7, pp. 627-638
- ARNAL M., DROUINEAU S., 1997. Diagnostic et proposition de normes sylvicoles de rattrapage des peuplements réguliers en amélioration de hêtre et de chêne sessile en Normandie. Rouen : ONF DR Normandie. 113 p.
- SEYNAVE I., 1999. Proposition de scénarios sylvicoles pour les futaies régulières de hêtre en Lorraine. Nancy : ONF DR Lorraine. 29 p.
- CONTESSE E., 2000. Proposition d'itinéraires sylvicoles pour les futaies régulières de hêtre en Picardie. Compiègne : ONF STIR Nord-Ouest. 45 p.
- ONF DT Ile-de-France - Nord-Ouest. Guide des sylvicultures de la hêtraie nord-atlantique. À paraître.
- LE GOFF N., OTTORINI J.M., 1993. Thinning and climate effects on growth of beech (*Fagus sylvatica* L.) in experimental stands. *Forest Ecology and Management*, vol. 62, pp. 1-14
- LE GOFF N., OTTORINI J.M., 1998. Effets des éclaircies et du climat sur la croissance de la tige et le développement du houppier du hêtre (*Fagus sylvatica* L.) dans l'expérience de Souilly. Rapport scientifique final, Convention de recherche du GIP ECOFOR « Hêtraie de basse altitude - Volet 2 : Dynamique de la croissance individuelle et collective du Hêtre sous contrainte concurrentielle ». 36 p.
- LE GOFF N., OTTORINI J.M., 1999. Effets des éclaircies sur la croissance du hêtre : interaction avec les facteurs climatiques. *Revue Forestière Française*, vol. 51, n° 2 spécial « Fonctionnement des arbres et écosystèmes forestiers : avancées récentes et conséquences sylvicoles », pp. 355-364

Les contraintes de croissance et le hêtre : état des connaissances et perspectives

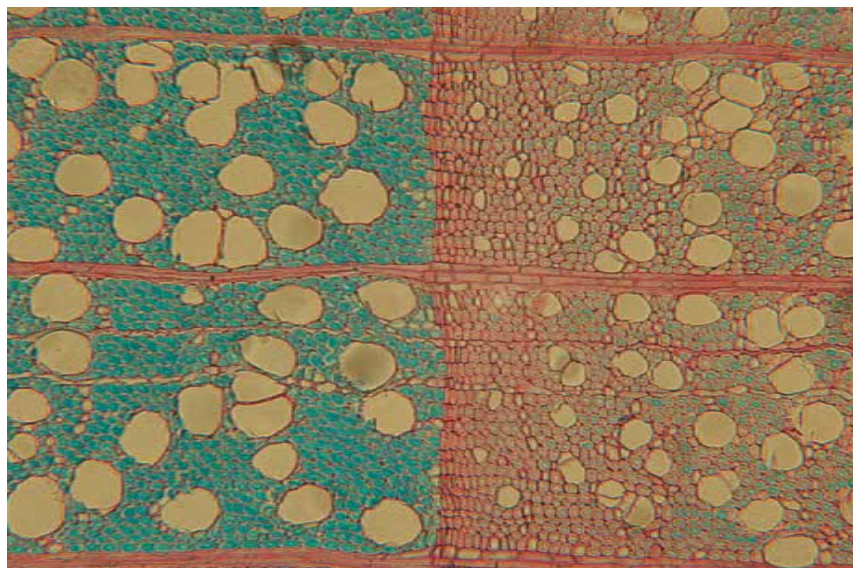
Mieux gérer la qualité du hêtre c'est aussi mieux comprendre les mécanismes à l'origine des contraintes de croissance des arbres en développement. Ces contraintes sont délicates à appréhender par le forestier. En l'état des connaissances actuelles, les auteurs de cet article conseillent de maintenir un faible niveau de concurrence entre les houppiers des arbres. Reste à traiter le cas des futaies irrégulières pour lesquelles les relations semblent plus complexes. Les travaux en cours devraient permettre une avancée importante sur ce sujet.

La notion de qualité d'un arbre sur pied intègre beaucoup de critères plus ou moins accessibles au forestier. Les plus visibles, dont on saisit immédiatement l'impact sur la transformation (rendement, altérations...) sont la forme de la tige et la branchaison, en particulier la fourchaison dans le cas du hêtre. D'autres sont liés ou pas à des problèmes phytosanitaires et/ou climatiques, et peuvent demander un examen plus attentif : blessure d'exploitation, coup de chalumeau, chancre, maladie du T... Ils sont parfois lourds de conséquences comme nous le rappelle l'épisode récent dans les Ardennes suite à un froid précoce en 1998. Cet article aborde plutôt la qualité « interne » du bois de hêtre selon des critères difficiles à apprécier de l'extérieur. Cette acception de la qualité du bois comporte différents aspects selon l'usage auquel il est destiné.

Malgré sa densité assez élevée (en moyenne 0,7 à 12 % de teneur en eau), le bois de hêtre est assez fragile d'où son emploi limité en charpente ou en bois de mine. Sa faible durabilité, dont témoigne sa conservation délicate une fois abattu, en interdit l'emploi en extérieur sans traitement. En revanche le bois de hêtre est un bois homogène à pores

diffus du fait de sa structure anatomique (figure 1), ce qui lui confère une bonne aptitude à la tournerie et à l'usinage en général. Actuellement la couleur claire est particulièrement recherchée pour les utilisations à forte valeur ajoutée où l'esthétique prime (placage, décoration, ameublement). Cela amène naturellement à considérer le cœur rouge du

hêtre comme un des premiers critères extérieurement invisibles de dépréciation de la qualité, en raison de son impact économique alors même qu'il ne modifie pas vraiment les propriétés du bois. Nous ne développerons pas plus avant ce point compte tenu de l'article qui lui est dédié dans ce volume.



P. Geldaye, INRA

Fig. 1: coupe microscopique de bois de hêtre colorée au bleu-astra et à la safranine

De droite à gauche on voit la fin d'un cerne et le début du suivant : noter la répartition assez homogène (diffuse) des vaisseaux et leur taille plus importante au début du cerne qu'à la fin. Dans le cerne de droite, les lumens des cellules sont de moins en moins occupés par la couche gélatineuse G, riche en cellulose (colorée en bleu) jusqu'à la fin de la saison de végétation ce qui peut signifier que les stimuli responsables de la création du bois de tension ont disparu progressivement. En revanche, dès le début du cerne suivant, toutes les cellules, hormis les rayons ligneux, sont caractéristiques du bois de tension, et cette apparition brutale évoquerait plutôt une réaction consécutive à un déchaussement pendant la période hivernale.

C'est à l'autre principal critère caché de dépréciation du bois de hêtre que nous nous intéressons ici : les contraintes de croissance qui se révèlent au moment de l'abattage par l'apparition de fentes en étoile partant du cœur.

L'analyse du développement des contraintes de croissance dans les arbres et de leurs conséquences technologiques est un champ de recherche qui a démarré dès le premier tiers du siècle dernier, et qui reste toujours d'actualité en dépit des progrès faits dans la connaissance du phénomène. Les essences feuillues à croissance rapide et cultivées en plantation à grand écartement, comme l'eucalyptus ou le peuplier, bénéficient toujours d'efforts assez soutenus du fait de leur poids économique mais aussi de leur mode de culture où le sylviculteur peut plus facilement maîtriser l'itinéraire qui va de la sélection des plants à la récolte, et mettre en application des techniques ayant fait leurs preuves.

Sans parler des essences tropicales de forêt naturelle qui se situent à un autre extrême, le contexte forestier du hêtre (*Fagus sylvatica* L.) qui nous intéresse ici, amène des questionnements de nature sensiblement différente. L'éclaircie est ici le

principal outil dont dispose le sylviculteur pour atteindre ses objectifs d'exploitabilité en volume et qualité ; au nombre de ses interrogations, et sans prétendre à l'exhaustivité, se trouvent donc celles-ci :

■ est-il possible de maîtriser par des actions ponctuelles dans le temps le développement excessif de contraintes de croissance ?

■ Comment identifier les tiges sur lesquelles faire porter les efforts de correction ?

■ Dans le cas d'un peuplement irrégulier, les niveaux de contraintes ne vont-ils pas avoir tendance à augmenter par rapport à un peuplement régulier ?

■ Jusqu'à quel degré peut-on espérer récupérer une tige mal conformée en agissant en sa faveur, sachant qu'elle sera susceptible de développer des contraintes importantes, et pour quel résultat final ?

Ces questions sont légitimes et pour tenter d'y répondre cet article se propose de faire le point sur les connaissances disponibles et les travaux en cours sur les contraintes de croissance dans le hêtre. Il se décompose en trois parties principales. Il expose d'abord des notions de base sur les problèmes engendrés par les contraintes de croissance, leurs origines et leur évaluation. Ensuite, il

présente une synthèse des connaissances sur la liaison avec la sylviculture. Et pour finir il donne un aperçu de la démarche entreprise dans notre laboratoire pour faire progresser ces connaissances.

Les contraintes de croissance : origines et conséquences

Définition

D'un point de vue mécanique, une contrainte est l'équivalent d'une pression soit une force, un poids par exemple, appliqué sur une certaine surface. L'unité usuelle est le MégaPascal (MPa). Pour fixer les idées, 1 MégaPascal correspond à la contrainte générée par une masse de 10 kg reposant sur 1 cm².

Les contraintes de croissance sont d'abord un atout pour l'arbre...

Les contraintes de croissance sont de nature tridimensionnelle (directions radiale, tangentielle et longitudinale), et expriment que tout point du bois d'un arbre est soumis à des efforts de tension ou de compression qui dépendent de sa position dans la tige comme on peut le voir sur la figure 2. C'est surtout dans la direction longitudinale que leur intensité est importante.

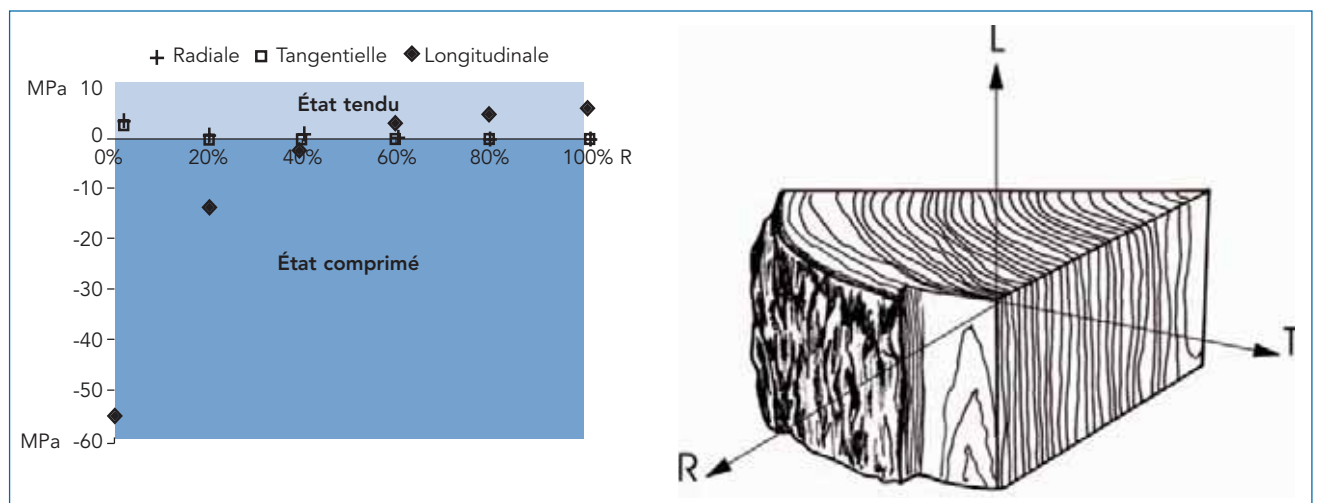


Fig. 2 : Distribution caractéristique des contraintes le long du rayon R d'un tronc en fonction de la direction selon laquelle s'exercent les contraintes

Les valeurs ont été obtenues par simulation d'après Fournier (1991b). On notera l'importance des valeurs de contraintes longitudinales (ou axiales) comparée à celles des directions radiale et tangentielle et comment les contraintes longitudinales passent d'un état de tension en périphérie du tronc à un état très marqué de compression à cœur.

Les contraintes de croissance résultent de deux origines :

- d'une part, la pesanteur : l'effet de la gravité sur la masse de l'arbre répartie dans l'espace engendre des contraintes de support d'une manière assez passive (Fournier et al. 1991a) ;

- d'autre part, la maturation cellulaire : ce mécanisme physiologique subi par les cellules nouvellement créées par le cambium génère, par un phénomène de rétraction, des contraintes dites « de maturation » qui sont le moteur principal utilisé par la plante pour faire évoluer la forme de sa tige ou de ses branches à travers des différences d'intensité de contraintes sur leur pourtour (Fournier et al. 1991b).

La distribution caractéristique des contraintes de croissance le long du rayon du tronc est présentée sur la figure 2. Les fortes valeurs de compression longitudinale au cœur de la tige s'expliquent par un effet de cumul précisé ci-après. Lorsqu'une nouvelle couche de cellules est formée, sa maturation produit une tension qui, du fait de l'adhérence de cette nouvelle couche aux plus anciennes, a tendance à comprimer ces dernières. Ainsi, petit à petit, le niveau de tension des couches périphériques diminue à mesure qu'elles deviennent plus internes avec l'accroissement en diamètre, jusqu'à s'annuler à un moment donné puis devenir un état de compression qui augmente progressivement vers le cœur.

Pour un hêtre vivant, comme pour



P. Geldaye, INRA

Fig. 3 : Fentes caractéristiques de la libération des contraintes de croissance à l'abattage dans une grume de hêtre

tout arbre, les contraintes de croissance ne sont pas un problème, mais plutôt un outil ou un atout, d'autant que les caractéristiques mécaniques de son bois lui permettent de supporter des niveaux de contraintes élevés à cœur le plus souvent sans dommage. De plus, ses propriétés étant meilleures en traction qu'en compression, l'état de tension mécanique en périphérie de la tige créé par la maturation des cellules permet à l'arbre de diminuer les efforts de compression provoqués par l'oscillation de la tige sous l'effet du vent.

...puis la cause de fentes à l'abattage pour le forestier...

Les problèmes commencent au moment de l'abattage : la coupe rompt l'équilibre mécanique établi au fil des ans, provoquant une redistribution brutale des efforts sur une longueur correspondant à 2 à 3 diamètres à partir de la culée, redistribution qui entraîne l'augmentation des efforts tangentiels à l'origine de l'apparition de fentes caractéristiques partant de la moelle (figure 3).

Cette évolution de la répartition des contraintes va se poursuivre tout au long des opérations de débit. Ainsi, purger la partie éclatée d'une grume occasionne un nouveau déséquilibre et a pour effet de faire progresser les fentes un peu plus loin. Seule la mise en place d'esses en bout de grume semble pouvoir endiguer cette propagation en tirant parti du comportement mécanique du matériau qui va permettre une relaxation partielle des efforts internes au cours du temps de stockage. Certaines techniques d'abattage permettent de limiter les dommages : elles reposent sur une libération progressive des contraintes par annelation simple ou double ou encore par mortaisage de la charnière d'abattage.

...et, pour le transformateur, sources de défauts de forme au sciage et au séchage

Tout en diminuant d'intensité, les contraintes se redistribuent au fur

et à mesure du sciage. Ainsi la courbure d'une dosse ou d'un plateau lors de son débit est provoquée par la différence d'intensité de la contrainte de croissance longitudinale dans l'épaisseur du sciage ; de même la partie de la grume restante, bien que maintenue par des griffes, tend à acquérir une courbure (moindre) symétrique par rapport au plan de coupe et le sciage suivant aura une épaisseur plus faible aux extrémités et plus forte au centre que celle définie par le réglage de la machine. Ce sont des causes similaires qui expliquent l'éclatement des plateaux diamétraux.

Cependant, les problèmes ne s'arrêtent pas là pour le transformateur. En effet, les contraintes de maturation élevées sont associées à la présence de bois de réaction (bois de tension pour les Angiospermes comme le hêtre), qui se rétracte longitudinalement jusqu'à 10 fois plus que le bois normal et qui, par sa présence localisée, va entraîner des déformations très importantes lors du séchage.

Vous avez dit nervosité ou... nervosité ?

Ce nom désigne deux phénomènes liés mais de nature différente. Quand il correspond à l'apparition de fentes à l'abattage ou encore à la déformation d'un plateau lors du sciage c'est la libération des contraintes de croissance par la coupe qui est responsable du phénomène. Lorsqu'il est utilisé pour désigner la déformation d'une pièce en bois séchée, il fait référence à des mécanismes de retrait ou de gonflement du bois en réponse aux variations de teneur en eau. Le bois de réaction, fabriqué par la plante pour produire de fortes contraintes de maturation de manière très localisée, présente un retrait longitudinal dix fois plus important que celui du bois normal et explique ces déformations importantes, lorsqu'il y a un changement de l'humidité dans l'air par exemple.

Comment évaluer les contraintes de croissance ?

Définitions

d'après le « Dictionnaire trilingue des bois ronds et des bois sciés » du CTBA

Bois de réaction : bois qui présente des caractères anatomiques distinctifs ; il se forme typiquement dans les portions de tige penchées ou courbées et dans les branches quand l'arbre s'efforce de reprendre la position d'origine, si celle-ci a été perturbée. Dans les feuillus, il en résulte du bois de tension et dans les résineux du bois de compression.

Bois de compression : bois de réaction typiquement formé à la partie inférieure des branches et des tiges penchées ou recourbées des conifères.

Bois de tension : bois de réaction typiquement formé à la partie supérieure des branches et des tiges penchées ou recourbées des feuillus

L'évaluation des contraintes de croissance reste essentiellement du domaine de la recherche et, à notre connaissance, la seule application pratique concerne l'utilisation des faciès de fentes en bout de grume

d'eucalyptus par un système d'optimisation du débit dans l'industrie du sciage (CIS-MADERA et al. 2001).

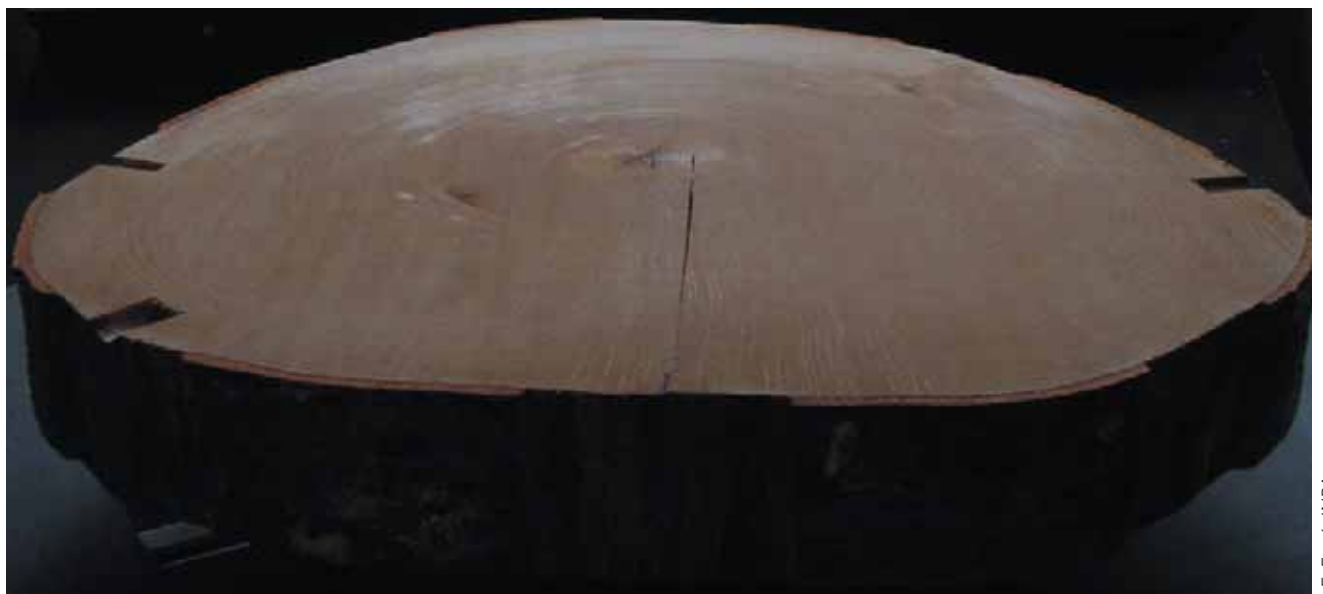
Au laboratoire

C'est à l'échelle cellulaire que prennent naissance les contraintes de croissance lors de la maturation. Les contraintes de maturation les plus fortes sont associées au bois de tension qui a pour caractéristique anatomique la présence d'une couche gélatineuse, très riche en cellulose, qui se substitue partiellement à une couche de la paroi cellulaire normalement plus lignifiée. Sur coupe anatomique (effectuée au microtome), cette particularité permet la reconnaissance des cellules de bois de tension par une double coloration au bleu-astra et safranine qui a pour effet de colorer en bleu la cellulose et en rouge la lignine (figure 1). On peut ainsi déceler la présence plus ou moins importante de fortes contraintes de maturation.

À l'atelier

À l'échelle macroscopique aussi, sur des rondelles, on utilise le bois de tension comme indicateur de niveaux élevés de contraintes de maturation. La coloration de

Herzberg (chloroiodure de zinc) est actuellement la méthode la plus utilisée pour le mettre en évidence, mais elle reste délicate à mettre en œuvre. Des travaux en cours dans notre laboratoire montrent que le bois de tension du hêtre peut être détecté visuellement. Il suffit pour cela de repérer les zones d'aspect nacré en observant sous une incidence rasante de la lumière naturelle, la surface d'un disque scié soigneusement et ressuyé (figure 4). La pertinence de cet indicateur est cependant à nuancer : le temps passant, du fait de la croissance en diamètre, la plage de bois de tension devient plus interne et le lien entre sa présence et le niveau de contraintes est modifié. En outre, l'observation de la répartition du bois de tension à l'intérieur d'un cerne de croissance révèle parfois des transitions un peu floues mais aussi des discontinuités qui indiqueraient que les *stimuli* responsables de sa mise en place peuvent disparaître au cours de la saison de végétation. Dans l'exemple de la figure 1, on voit dans le cerne de droite la disparition progressive des cellules de bois de tension avec l'avancée de la saison de végétation, puis dans le cerne suivant la réappari-



E. Farré, INRA

Fig. 4 : examen en lumière rasante d'une rondelle de hêtre, les plages de bois de tension sont révélées à l'arrière-plan par leur aspect brillant

On notera le pincement à la périphérie au niveau du trait de scie qui révèle l'état de compression dans la direction tangentielle aux cernes de croissance.

tion brutale et généralisée de ce type de cellules suite à une modification des *stimuli* inconnue, mais qui pourrait être associée à un déchaussement de l'arbre. Il reste que le bois de tension constitue la trace la plus visible du « passé biomécanique » de l'arbre. Une expérience facile à exécuter sur une rondelle de bois frais de quelques centimètres d'épaisseur consiste à réaliser un trait de scie radial de l'écorce à la moelle. La difficulté à sortir la lame exprime bien l'état de compression tangentielle présent dans la tige au voisinage de l'écorce même s'il est à peine visible sur la figure 2, du fait de sa valeur comprise entre 0 et -1MPa.

En forêt

Un autre indicateur des contraintes de croissance correspond à la mesure en périphérie du tronc de l'élongation d'une portion de xylème après avoir séparé cette portion du reste de la grume. Plusieurs techniques coexistent avec des niveaux destructifs variables qui limitent leur utilisation à des arbres destinés à l'abattage. Actuellement, la technique la plus répandue, du fait d'un bon compromis alliant qualité de la mesure et simplicité de mise en œuvre, a été promue par le Cirad-Forêt ; elle consiste à mesurer le déplacement de deux pointes espacées verticalement de 45 mm après le perçage entre elles d'un trou de diamètre 20 mm, et de profondeur équivalente, qui libère les contraintes (figure 5). Le déplacement mesuré peut être relié à une valeur de contrainte en tenant compte de la géométrie de l'essai et des propriétés mécaniques du bois vert. Cet indicateur est très utilisé par la communauté scientifique qui s'intéresse à la biomécanique dans les arbres à tel point qu'il est communément désigné par le terme « indicateur de contrainte de croissance » (ICC). Lorsque l'arbre est debout, cette technique de mesure est très utile pour évaluer la variation des contraintes en périphérie de l'arbre à une hauteur donnée, en se basant

sur 8 positions réparties sur la circonférence. Cette méthode est aussi applicable lorsque l'arbre est abattu bien que, de ce fait, les contraintes dues à la gravité soient modifiées. Pour une hauteur donnée, la variation de ces contraintes entre les différents points de mesure notés selon leur position angulaire donne une courbe d'allure sinusoïdale comme on peut le voir sur la figure 6. Lorsque la tige est inclinée, l'amplitude maximale correspond presque toujours à la position de la face supérieure de la tige (Position n° 5 dans la figure 6). Pour une longueur de référence de 45 mm, les déplacements mesurés vont de 20 microns pour les valeurs les plus faibles à plus de 200 microns pour les maximales.

On ne saurait parler des contraintes de croissance dans le hêtre sans évoquer une technique de mesure utilisée dans les années 80 et qui a été à l'origine de plusieurs travaux (Polge (1981), Ferrand (1982a, 1982b, 1983)). Celle-ci est basée sur l'utilisation de carottes de sondage extraites à la tarière de Pressler. Les auteurs ont montré la corrélation négative ($r = -0,67$) qui existait entre le diamètre mesuré dans la direction tangentielle de la carotte à l'état vert à proximité du cambium et les contraintes de croissance évaluées selon une méthode plus conventionnelle (Saurat et Gueneau (1976)). Malheureusement, le diamètre de la carotte dépendait également de la tarière ce qui rendait impossible la



T. Constant, INRA

Fig. 5 : capteur mis au point par le Cirad-Forêt pour mesurer les Indicateurs de Contraintes de Croissance

La vue est prise à la fin d'une série de 8 mesures à la périphérie d'un tronc. À gauche de l'image se trouve le gabarit qui permet de positionner les pointes et le centre du trou à percer pour libérer les contraintes de croissance. Au centre, les pointes, enfoncées au marteau, supportent le capteur.

comparaison de deux échantillons s'ils étaient sondés avec des tarières différentes. Insistons cependant sur le fait qu'en utilisant une tarière unique correctement affûtée, cette technique a permis d'évaluer à peu de frais et sur de larges échantillonnages les effets sylvicoles et stationnels sur les contraintes de croissance dans le hêtre et dans plusieurs autres essences.

Quels facteurs affectent la distribution des contraintes de croissance ?

Forme de l'arbre

Lors d'un nouveau cycle de croissance, l'incrément de masse dû au développement de l'arbre augmentera essentiellement les contraintes supportées par le bois déjà formé de manière assez passive. Indirectement, la gravité détermine aussi la réaction qui s'exprimera par le développement de contraintes de maturation. Ainsi la forme de la tige, par la courbure, l'inclinaison qu'elle présente, influe sur la localisation du moteur de cette réaction, le bois de tension, qui en se développant de préférence sur la partie supérieure d'une tige inclinée et en exerçant lors de sa maturation une contrainte plus intense que celle du bois normal crée un couple moteur

qui tend à redresser l'axe concerné. De manière associée, la réaction de l'arbre est également dépendante des signaux physiologiques qui, sans obligatoirement conduire à la mise en place de bois de réaction, vont entraîner une croissance radiale différente selon les directions et produire une certaine correction de la forme.

On comprend ainsi que la morphologie de l'arbre est un facteur important à prendre en compte pour appréhender les mécanismes de développement des contraintes de croissance. Ferrand (1982b) a mis en évidence une augmentation des valeurs d'ICC (indicateur de contraintes de croissance) avec l'inclinaison du hêtre mais sans parvenir à établir une relation liant leurs intensités.

De nombreux progrès ont été réalisés à partir des années 80 sur la connaissance des mécanismes de base. Du point de vue de la modélisation, ces mécanismes de base ont été couplés à un « moteur de croissance » reposant sur une approche architecturale dans le cadre des travaux menés par Fourcaud (2003a, 2003b) et les résultats acquis, bien que peu validés, laissent penser que le formalisme utilisé peut rendre compte du développement des contraintes de croissance dans une tige.

D'un point de vue plus forestier, dans le projet européen FAIR CT98-3606 *Stresses in Beech* (Becker et al. 2001) (cf. encadré), 500 arbres ont été échantillonnés dans 5 pays, et 10 peuplements au total. Les auteurs ont observé une corrélation négative significative entre le diamètre à 1,30 m et le niveau des ICC. En termes de hauteur dans l'arbre, la valeur moyenne des ICC était statistiquement plus élevée à 4,50 m qu'à 1,30 m sans que cette différence soit systématiquement perceptible au niveau de l'arbre individuel du fait de la grande dispersion des valeurs. Enfin, pour aborder l'impact du houppier sur les contraintes de croissance, les ICC sont corrélés significativement et de manière négative avec les caractéristiques de dimensions du houppier (volume et surface de projection). Ces résultats confirment ceux obtenus par Ferrand (1983).

Autrement dit, et en résumé :

les indicateurs de contraintes de croissance sont maximaux à la partie supérieure d'une tige inclinée de hêtre. Ils sont statistiquement plus faibles en bas qu'en haut, sans que cela se vérifie forcément au niveau individuel. De même, ils diminuent lorsque le diamètre des arbres augmente. Ce constat s'applique aussi aux ratios H_{tot}/D_{130} : ainsi des arbres élancés et fins, que l'on trouvera typiquement dans des futaies denses, auront des contraintes de croissance plus fortes que des arbres trapus et courts ressemblant à ceux des taillis-sous-futaie. De même des arbres ayant des surfaces ou des volumes de houppier importants sont moins sujets à des contraintes élevées.

Facteurs stationnels

Dans le projet européen *Stresses in Beech*, on observe en direction des vents dominants d'Ouest une valeur légèrement plus élevée des ICC sans que cette différence soit qualifiée de significative. La pente du terrain intervient de façon significative, mais pour expliquer moins de 3 % de la variabilité observée des ICC.

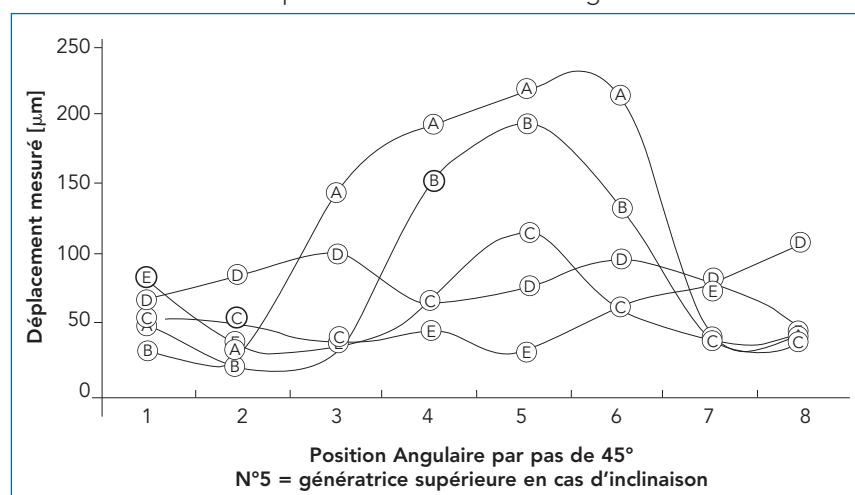


Fig. 6 : mesure des Indicateurs de Contraintes de Croissance

Représentation de 5 séries (A, B, C, D et E) typiques de 8 mesures de déplacement longitudinal équiréparties à la périphérie d'un tronc. Dans le protocole, la position 5 se situe à la partie supérieure des tiges lorsqu'elles sont inclinées, là où le bois de tension se forme préférentiellement. Les déplacements sont exprimés en micromètre.

Les auteurs soulignent que la très forte variabilité intra et interarbre des ICC au sein d'un même peuplement ne facilite pas la mise en évidence d'effet dû à la station.

Pour ce qui concerne l'impact du type de sol, seul Ferrand (1982) apporte quelques éléments sur l'effet positif que pourraient avoir les rendzines (éventuellement brunifiées) sur le niveau des contraintes. Mais il faudra certainement mieux mesurer les facteurs causals des contraintes de croissance au niveau de l'arbre individuel avant de se pencher efficacement sur l'impact de la station. Cependant, il est certain que la station joue un rôle par l'ancrage racinaire qu'elle permet pour maintenir la position de l'arbre et éviter des scénarios aboutissant ce que l'on observe sur la figure 1 : une forte production de bois de tension pour répondre à un probable déséquilibre.

Effet de la sylviculture

Guéneau et Saurat (1976) les premiers avaient mis en évidence une

différence entre les hêtres de futaie et de taillis-sous-futaie en échantillonnant dans les principales régions de production. Cela a ensuite été confirmé plusieurs fois et relié au rapport h/d qui reflète assez bien l'historique de compétition subi par l'arbre dans les situations sylvicoles étudiées. L'étude de 2001 (Becker et al. 2001), où les types de peuplement sont plus nombreux, précise que le rapport h/d expliquerait alors 10 % de la variabilité des contraintes de croissance. Dans le même esprit, une corrélation significative apparaît entre le niveau d'ICC moyen et différents indices de compétition, traduisant le fait que la compétition favorise des contraintes de croissance élevées. En se basant sur les diamètres de carottes de sondage prélevées dans le dispositif en Carré latin de Souilly (55) offrant des intensités d'éclaircie très contrastées, Polge (1981) a mis en évidence un effet (significatif au seuil de 1/100) du traitement : les contraintes de croissance dimi-

nuaient quand l'intensité des éclaircies, caractérisée par la surface terrière, augmentait.

Plus récemment, dans le projet Stresses in Beech, un sous-échantillon de 83 arbres a été étudié, ces arbres étant groupés selon leur profil de largeurs de cernes (régulier, décroissant, croissant) sur les 100 ans ayant précédé l'abattage : aucune différence significative du niveau moyen d'ICC n'est apparue entre les groupes. En revanche, sur une période de 10 ans précédant la coupe, les arbres présentant une tendance à l'augmentation de leurs accroissements avaient des niveaux de contraintes de croissance significativement plus faibles que ceux de tendance régulière ou décroissante. Ainsi le forestier en anticipant la coupe finale par une éclaircie diminuerait significativement le niveau des contraintes. Ce dernier constat est assez prometteur et apporte un intérêt supplémentaire à l'approche par modélisation envisagée (cf. encadré).

Stresses in Beech

Le projet Stresses in Beech a été conduit de 1998 à 2001 par un consortium de cinq pays dont la France, représentée par le Laboratoire de Mécanique et de Génie Civil de Montpellier, sous la coordination de l'Institut d'Utilisation des Forêts et des Sciences du Travail de l'Université Albert-Ludwig de Fribourg-en-Brisgau (Allemagne). Ce projet a recensé, par des enquêtes et des tests menés en laboratoire, les conséquences techniques et économiques des contraintes de croissance dans le hêtre et les moyens d'y remédier lors de la transformation des produits. Du point de vue sylvicole, l'étude a porté sur des peuplements, échantillonnés en deux temps : d'abord sur des substrats aussi similaires que possible (en l'occurrence du calcaire) pour tester des variables géographiques et climatiques, ensuite en choisissant des peuplements représentatifs du pays concerné en terme de conduite sylvicole (par exemple des taillis-sous-futaie en France, ou des peuplements sur de fortes pentes en Suisse et en Autriche). Des analyses statistiques ont été menées pour tenter de relier les valeurs des indicateurs de contraintes de croissance aux caractéristiques du peuplement (pente, exposition, historique de gestion etc.) et de l'arbre (diamètre, hauteur, architecture, projection de houppier, etc.). Bien que cette base de données unique en son genre puisse être encore exploitée, les résultats disponibles à ce jour confirment surtout des résultats déjà connus en les renforçant : ils apportent de nouvelles pistes comme le niveau significativement plus faible des contraintes pour des arbres libérés de la compétition pendant les 10 années précédant leur exploitation. Le faible caractère explicatif des variables testées par rapport aux indicateurs de contraintes de croissance (13 % au mieux de la variabilité expliquée) milite pour une approche sensiblement différente mais non contradictoire où seront plus ciblées les relations instantanées, à l'échelle de quelques années, entre le port de l'arbre et son développement, avec un regard particulier sur l'impact du houppier et de la croissance en diamètre sur la distribution du bois de tension.

Liaison entre contraintes de croissance et propriétés du bois.

Nous avons déjà évoqué l'association entre le bois de tension et les fortes contraintes de maturation et, en particulier, l'impact de son retrait longitudinal beaucoup plus élevé sur la déformation des produits.

Pour la densité du bois, très liée aux propriétés mécaniques, il est difficile de découpler l'effet des contraintes de croissance de celui du traitement sylvicole (Keller 1976). Ferrand (1982) rapporte que la densité a tendance, comme les contraintes, à diminuer avec le diamètre des arbres.

Ce dernier a également montré que le module d'élasticité longitudinal du bois (= rapport entre les contraintes et les déformations), qui peut se mesurer indépendamment des contraintes de croissance, avait une valeur plus élevée et traduisait donc un comportement plus rigide là où les déformations mesurées en périphérie des arbres (voir figure 5) étaient fortes. À des déformations de maturation importantes corres-

Modélisation

Depuis le début des années 1990 et l'essor de l'informatique, la modélisation a profondément modifié la nature des recherches forestières, notamment dans le domaine de la croissance et de la qualité. Si, au départ, les modèles de croissance d'arbre n'étaient qu'une version moderne des tables de production, leur conception a évolué et certains s'imbriquent pour rendre compte de situations de plus en plus complexes où les facteurs interagissent : les résultats de simulations ne restituent plus seulement une production en volume selon la sylviculture appliquée, mais également des indicateurs de gestion durable en termes de stock de carbone, d'impact sur l'emploi (Bucket et al. 2005), etc. Néanmoins, pour parvenir à greffer une problématique comme celle des contraintes de croissance sur un modèle existant, il faut pouvoir définir comment interagissent les différents mécanismes et comment en rendre compte à travers la description fournie par le modèle initial. Plus l'information est détaillée plus le modèle biomécanique pourra s'appuyer sur les mécanismes de fondamentaux même si cela entraîne des difficultés techniques liées au nombre de données à prendre en compte. Dans le cas du pin maritime (Programme AMAP du Cirad/LRBB), ce travail a été mené à bien par Fourcaud et ses coauteurs (2003a, 2003b) selon une approche architecturale détaillée de l'arbre.

Cependant la majorité des modèles de croissance disponibles actuellement font l'impasse sur la notion de forme du tronc, hormis le défilement, et la couronne y est au mieux une enveloppe convexe tridimensionnelle pour laquelle il n'existe que peu d'information sur la distribution spatiale des masses. Ainsi, un enjeu important réside dans l'établissement d'un lien entre la forme du houppier et les efforts mécaniques qu'il engendre sur le tronc. Cette information pourrait servir à quantifier la réaction qui se met en place dans le tronc compte tenu de sa forme et des efforts supplémentaires dus au développement du houppier. Cela nécessite également de mettre au point une relation définissant un seuil d'apparition des cellules de bois de tension. Dans l'hypothèse où nous pourrions résoudre ces différents problèmes, nous pourrions alors coupler de façon pertinente un modèle de croissance d'arbre à un modèle biomécanique.

précédente, nous avons vu que même en traitement régulier les informations à sa disposition étaient limitées, trop limitées en tout cas pour rendre compte des caractéristiques de croissance dont nous avons besoin pour appréhender le niveau de contraintes dans les arbres autrement que sur un plan statistique (déjà bien étudié par le passé).

D'un point de vue scientifique, c'est par le couplage d'un modèle biomécanique avec un modèle spatialisé de croissance d'arbre qu'un optimum dans le contrôle des contraintes de croissance par la sylviculture pourra être recherché ; il s'agira, en peuplements mélangés et/ou irréguliers, de rendre compte de la compétition subie par un individu à travers la forme de sa tige et le déséquilibre de son houppier, et d'en préciser l'impact en termes d'apparition des contraintes de maturation et de leur effet cumulatif sur les contraintes de croissance.

Dans ce domaine de modélisation, des travaux assez nombreux ont déjà ouvert la voie. Qu'ils s'adressent à la partie biomécanique ou à la partie modélisation de la croissance des arbres en se basant sur des approches soit architecturales, soit statistico-dendrométriques, leur principal inconvénient est de ne pas avoir eu le hêtre en point de mire. Cependant, l'évolution de ces outils ouvre des perspectives intéressantes d'aboutissement pour l'essence qui nous intéresse aujourd'hui.

Mais il faudra combler le déficit de connaissance sur la quantification des relations entre les stimuli identifiés, comme la gravité ou le phototropisme, et la réponse que l'arbre met en place dans sa tige, notamment par le développement de plages de bois de tension. C'est dans ce champ qu'une grande partie de nos efforts des prochaines années sera investie pour tenter d'établir des relations tenant compte des morphologies du houppier et de la tige en vue de leur intégration ultérieure dans un modèle.

pondraient ainsi des caractéristiques mécaniques plus rigides. Comme les contraintes de maturation s'évaluent en multipliant le module d'élasticité par les déformations mesurées, on conçoit aisément l'alliance de ces deux mécanismes pour renforcer la dissymétrie des contraintes.

Pour la fibre torse, Ferrand a mis en évidence, dans l'étude déjà citée, des déformations 30 % plus élevées dans des arbres à fil tors, et qui associées à des modules d'élasticité longitudinale plus élevés conduisent à un facteur multiplicatif des contraintes de 1,55. Accessoirement, on peut démontrer que, à contraintes égales dans le sens du fil du bois, la contrainte diminue dans la direction axiale du tronc en présence de fil tors. Par ailleurs, en marge de ses résultats, Ferrand a suggéré que, en plus de la forte héritabilité de ce caractère, la pré-

sence de la fibre torse pourrait être affectée par des facteurs environnementaux.

Conclusions

Qu'elle soit modulée ou non par des actions anthropiques, la compétition entre les arbres pour l'espace est le principal moteur à retenir pour expliquer le développement des contraintes de croissance. Les interrogations sur l'impact du traitement irrégulier sur le niveau des contraintes de croissance dans les tiges de hêtre sont donc bien des questions légitimes qui doivent être abordées sous l'angle des effets de ce type de traitement sur la dynamique de développement dans l'espace des tiges et des houppiers. Dans ces situations le forestier se trouve face à des cas complexes à apprécier du point de vue de l'historique de compétition subi par un individu. Dans la partie

D'un point de vue plus appliqué

à court terme, s'il est établi que la rectitude du fût ne garantit pas l'absence de contraintes néfastes, certains facteurs de forme comme l'inclinaison ou le rapport de la hauteur totale au diamètre à 1,30 m sont des informations significatives qui reflètent la compétition subie par l'arbre. Par le passé, les tentatives pour lier la forme de l'arbre à un niveau d'intensité des contraintes de croissance se sont avérées peu concluantes. Il apparaît pourtant intéressant de s'interroger sur l'information contenue dans la forme actuelle de l'arbre, en tenant d'abord compte de la forme du houppier car elle pourrait donner quelques clefs pour comprendre le déterminisme de mise en place du bois de tension dans la tige, permettre d'affiner des critères d'appréciation de la compétition subie par l'arbre et fournir ainsi des indications utiles au forestier.

Enfin, si le lien entre forme de l'arbre et contraintes de croissance est difficile à décrypter au stade de l'exploitabilité (arbre âgé), on peut considérer que, à un stade plus juvénile, la forme est à prendre en compte dans l'évaluation du potentiel de l'individu à réagir favorablement à l'action du forestier, en particulier pour une essence sciophile comme le hêtre. Des actions dans ce sens sont envisagées dans le cadre d'un projet d'étude de l'ONF, auquel le Lerfob est associé, sur la réactivité des perches en forêt irrégulière.

Thierry CONSTANT

Gérard NEPVEU

Lerfob, UMR INRA-ENGREF,
Champenoux (54)

Équipe « Qualité des Bois »

constant@nancy.inra.fr

nepveu@nancy.inra.fr

G. BECKER

Institut d'Utilisation des Forêts et
des Sciences du Travail Forestier
Université de Fribourg (Allemagne)
institut@fobawi.uni-freiburg.de

Bibliographie

BECKER G. et al., 2001. Occurrence and Relevance of Growth stresses in Beech (*Fagus sylvatica* L.) in central Europe. Final Report FAIR Project CT98-3606 "Stresses in Beech, G. Becker ed., Institut d'Utilisation des Forêts et des Sciences du Travail, Université Albert-Ludwig de Fribourg-en-Brisgau (Allemagne). 323 p.

BUCKET E., LE MOGUEDEC G., MOTHE F., NEPVEU G., 2005. Une modélisation des bilans "environnement" et "produits" de sylvicultures contrastées : cas du chêne sessile. *Revue Forestière Française*, vol. 57, n°3, pp. 311-330

FERRAND J.C., 1982a. Etude des contraintes de croissance. Première partie : méthode de mesure sur carottes de sondage. *Annales des Sciences Forestières*, vol. 39, n°2, pp. 109-142

FERRAND J.C., 1982b. Etude des contraintes de croissance Deuxième partie : variabilité en forêt des contraintes de croissance du Hêtre (*Fagus sylvatica* L.). *Annales des Sciences Forestières*, vol. 39, n°3, pp. 187-217

FERRAND J.C., 1983. Les contraintes de croissance et leurs conséquences en matière de sylviculture et de sciage. *Revue Forestière Française*, vol. 35, n°5, pp. 327-339

FOURCAUD T., LAC P., 2003a. Numerical modelling of shape regulation and growth stresses. I- An incremental static finite element formulation. *Trees - Structure and Functions*, vol. 17, n°1, pp. 23-30

FOURCAUD T., BLAISE F., LAC P., CASTERA P., DE REFFYE P., 2003b. Numerical modelling of shape regulation and growth stresses. II- Implementation in the AMAPpara software and simulation of tree growth. *Trees - Structure and Functions*, vol. 17, n°1, pp. 31-39

FOURNIER M., CHANSON B., GUITARD D., THIBAUT B., 1991a. Mécanique de l'arbre sur pied : modélisation d'une structure en croissance soumise à des chargements permanents et évolutifs. I- Analyse des contraintes de support. *Annales des Sciences Forestières*, vol. 48, n°5, pp. 513-525

FOURNIER M., CHANSON B., THIBAUT B., GUITARD D., 1991b. Mécanique de l'arbre sur pied : modélisation d'une structure en croissance soumise à des chargements permanents et évolutifs. II- Analyse tridimensionnelle des contraintes de maturation : cas du feuillu standard. *Annales des Sciences Forestières*, vol. 48, n°5, pp. 527-546

POLGE H., 1981. Influence des éclaircies sur les contraintes de croissance du hêtre. *Annales des Sciences Forestières*, vol. 38, n°4, pp. 407-423

SAURAT J., GUENEAU P., 1976. Growth Stresses in Beech. *Wood Science and Technology*, vol. 10, pp. 111-123

CIS-MADERA, CIRAD-FORET, HERMANOS SANCHEZ PENA, PARQUETS LORENZO, MADERAS BETANZOS, MÖHRINGER, SARDINHA, LEITE, 2001. RTD of sawmilling systems suitable for European *Eucalytus globulus* affected by growth stresses. Cooperative Research Project FAIR MA2B-CT98-9579 Final Technical report.

Le cœur rouge du hêtre est-il détectable sur pied ?

La présence de cœur rouge dans un lot de bois sur pied ou façonné de hêtre est une raison connue de mauvaise vente ou de déclassement des produits. Cet article précise et illustre les causes d'apparition du cœur rouge « normal », le plus répandu, à partir de l'étude de trois lots de grumes en Allemagne et en France (Haute Marne). Il montre le rôle déterminant de la dimension et de l'inclinaison des branches mortes ou des nœuds qui induisent des arrivées d'air provoquant l'oxydation du bois de cœur. Ces travaux, à compléter par des études en lien avec les stations, confirment la nécessité de maintenir les hêtres en croissance libre pour éviter la mort des branches basses du houppier ; ils laissent espérer une future clé de détermination du risque de cœur rouge.

Avec 11 % du volume total sur pied, le hêtre est la deuxième essence en France après les chênes sessile et pédonculé (un quart du volume total sur pied)¹. L'utilisation industrielle de cette ressource pour des produits de qualité supérieure (essentiellement, tranchage et sciage pour la menuiserie intérieure et la fabrication de meubles) se fait essentiellement à partir de bois uniformément clair (bois « blanc » ou légèrement rosé). Cependant, certains hêtres peuvent former un bois de cœur coloré, dont le type principal rencontré est le cœur rouge (les différents types de cœur coloré chez le hêtre seront présentés ci-dessous). Un cœur rouge de taille élevée affecte considérablement la valeur des grumes de hêtre, notamment lorsqu'elles sont destinées à des produits pour lesquels l'aspect est important. La norme européenne EN 1316-1 (CEN 1997) pour le classement des bois ronds fixe le seuil de cœur rouge à 20 % et 30 % maximum pour les meilleures classes de qualité A et B respectivement. En dépit de nombreuses initiatives (Ulrich 2004), la valorisation du cœur rouge pour ses qualités esthé-

tiques reste principalement réservée à la fabrication artisanale. En effet, la couleur et la forme du cœur rouge dans les directions longitudinale et radiale étant très variables, elles rendent difficiles les productions industrielles en série qui sont pourtant les seules capables d'absorber la grande quantité de bois à cœur rouge mise sur le marché chaque année. De plus, les propriétés d'imprégnation et de séchage du bois à cœur rouge sont affectées par la présence de thylls et des substances se trouvant dans ce type de bois (voir par exemple : Seeling 1998). Cependant, différents travaux de recherche appliquée sont engagés² pour développer des procédés permettant de transformer industriellement ce type de bois en

vue d'obtenir des produits à forte valeur ajoutée.

Le cœur rouge, de quoi s'agit-il ?...

En fonction des causes potentielles de formation d'un cœur coloré chez le hêtre, Sachsse (1991) distingue les quatre types suivants, illustrés dans la figure 1 : le cœur rouge (cœur rouge « normal »), le cœur traumatique, le cœur étoilé (ou cœur flammé) et le cœur anormal.

Sur une section transversale de bois rond, la limite entre le cœur rouge et le bois normal apparaît arrondie ; celle du cœur étoilé est dentelée. Le contour du cœur anormal peut être dentelé, lui aussi, mais il est

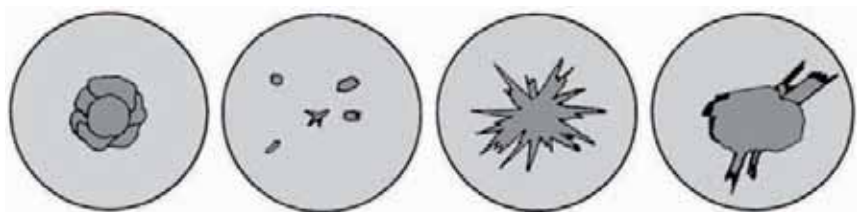


Fig. 1 : les quatre types de cœur coloré chez le hêtre d'après la classification de Sachsse (1991) — Illustrations extraites de Seeling (1998)

¹ Site Internet de l'Inventaire Forestier National IFN (<http://www.ifn.fr/>)

² Voir, par exemple, site Internet du projet « Innovation for Beech » (<http://www.innobeech.uni-freiburg.de/>)

caractérisé par une couleur noirâtre et une odeur souvent désagréable (odeur d'acide butyrique causée par l'activité bactérienne). Le cœur traumatique a une faible extension spatiale et peut être localisé dans une région du tronc éloignée de la moëlle ; les trois autres types peuvent s'étendre de la culée à la base du houppier et sont localisés dans la partie centrale du tronc. Globalement, la forme longitudinale du cœur rouge est souvent celle d'un fuseau ; le cœur anormal peut aussi épouser une telle forme ou alors présenter celle d'un cône (Seeling 1991). L'extension du cœur étoilé est souvent maximale à la culée (Walter et Kucera 1991).

La couleur rougeâtre à brune du cœur rouge résulte d'un processus d'oxydation (décrit plus en détail ci-après) accompagné de l'occlusion des vaisseaux par des thylls. La formation du cœur traumatique a pour origine une blessure du tronc, les processus cytologiques et biochimiques étant similaires à ceux du cœur rouge. Les développements des cœurs étoilé et anormal semblent être plus complexes et influencés par plusieurs facteurs qui ne sont pas bien connus jusqu'à présent. L'un de ces facteurs pourrait être la présence de champignons (Necesity 1960) et de bactéries (Sachsse 1991, Schmidt et Mehninger 1989) respectivement dans les cœurs étoilé et anormal. L'hypothèse selon laquelle la formation du cœur anormal serait liée à un stress environnemental, se manifestant par une vitalité réduite de l'arbre et des symptômes de dommage, n'a pas été vérifiée (Seeling 1991). Les cœurs étoilé et anormal peuvent se développer autour d'un cœur rouge probablement préexistant. Tandis que l'humidité du cœur rouge est inférieure à celle de l'aubier, celle du cœur anormal lui est supérieure (Seeling 1991). Parmi ces quatre types de cœur coloré, le type rencontré majoritairement est le cœur rouge. Par exemple, dans l'étude de von Büren

(2002), sur 1305 observations de cœurs colorés, 1017 (78 %) présentaient une forme arrondie ou « nuageuse » en section transversale et 201 (15 %) étaient décrites « étoilées ». Les premières correspondaient très probablement au type « cœur rouge » de la classification de Sachsse (1991) et les secondes aux types « cœur étoilé » ou « cœur anormal ». Les 87 observations restantes (7 %) apparaissaient irrégulières, ce qui les rend difficiles à classer.

... comment se forme-t-il ?...

Lors de la duraminisation, en général, la vitalité du parenchyme diminue et le système de transport en eau perd sa fonctionnalité. Dans le cas du hêtre, la théorie de la formation du cœur rouge se base sur les recherches de Zycha (1948). D'après cet auteur, la formation du cœur rouge est initiée par la pénétration d'air (par exemple au niveau des branches mortes) dans la partie centrale du tronc d'un arbre âgé, partie centrale où la vitalité du parenchyme est diminuée et la teneur en eau réduite et remplacée par du gaz. Dans les cellules parenchymateuses de cette partie centrale, de l'amidon et d'autres hydrates de carbone solubles sont transformés en substances phénoliques colorées (Bauch et Koch 2001). Contrairement aux essences qui, comme le chêne, forment obligatoirement un duramen coloré, la polymérisation de ces substances est rapide chez le hêtre, mais les cellules de parenchyme meurent lentement. Pour cette raison, les substances phénoliques n'imprègnent pas les parois ; par conséquent, la durabilité du bois à cœur rouge est faible comparée à celle des essences à duramen « obligatoire ». Le parenchyme de vitalité plus importante localisé au bord du cœur réagit à la pénétration d'air en fermant les vaisseaux par des thylls (Zycha 1948, 1953). Les cœurs rouges âgés présentent souvent une structure « nuageuse » (figure 1) suggérant qu'ils se forment en plusieurs

vagues. On sait toutefois peu de choses sur la cinétique et l'évolution de ce développement.

... et quels facteurs sont liés à sa formation ?

Pour tenir compte d'un déclenchement du cœur rouge par pénétration d'air, la présence de grosses cicatrices de branche et de blessures, ou encore le nombre de défauts (branches mortes, bosses, cicatrices de branche d'une taille minimale) ont été intégrés (en plus de la prise en compte de variables dendrométriques telles que le diamètre ou l'âge de l'arbre) respectivement dans les modèles de probabilité de présence du cœur rouge proposés par von Büren (2002) et par Knoke (2003). Le modèle de Knoke (2003) inclut aussi un effet de la présence d'une fourche, effet qui semble plus important pour des arbres relativement jeunes comparés à ceux qui sont plus âgés. Cependant, dans la pratique sylvicole, la présence ou le nombre de défauts par arbre ne paraissent pas être des critères suffisamment précis pour détecter si un hêtre sur pied a du cœur rouge ou pas. Il s'agit d'un des points principaux qu'a cherché à élucider notre étude, présentée ci-après.

Des effets significatifs de l'âge et du diamètre sur la formation du cœur rouge ont été trouvés dans de nombreuses études (par exemple : Lanier et Le Tacon 1981) qui constatent une très faible présence du cœur rouge en dessous d'un âge de 80 à 100 ans et une augmentation considérable entre 100 et 150 ans. Il semble que, à diamètre égal, les hêtres ayant eu une croissance soutenue présentent moins fréquemment un cœur rouge, ou bien contiennent un cœur rouge encore peu développé en dimension (Knoke et Schulz Wenderoth 2001, Seeling et Becker 2002, Knoke 2003). Les résultats sur un effet possible de la station sont moins clairs et parfois contradictoires ; les différents facteurs stationnels pouvant influencer la formation de cœur rouge ne sem-

blent pas être suffisamment caractérisés et leurs effets sont encore mal séparés.

Notre étude

Dans notre étude, nous avons choisi d'analyser exclusivement le cœur rouge (« normal »), car c'est le type de cœur coloré le plus fréquent (voir ci-dessus : 78 % des cœurs colorés observés dans l'étude de von Büren 2002) et dont la formation semble être la mieux connue jusqu'à présent.

Avec l'objectif ultime de prédire l'occurrence (présence/absence) et la répartition du cœur rouge dans l'arbre sur pied, il nous semblait d'abord nécessaire d'élucider le déclenchement de la formation du cœur rouge (entrée d'air, voir ci-dessus) et ceci à l'échelle dendrométrique (macroscopique). Les questions posées étaient les suivantes : Q1 : Quelles singularités visibles de l'arbre sont des points d'initiation probables du cœur rouge ?

Q2 : De quelle forme sont les relations entre ces singularités et le cœur rouge ?

Q3 : Comment peut-on utiliser ces relations pour prévoir si un hêtre sur pied contient du cœur rouge ou pas ? Afin de fournir des éléments de réponse à ces trois questions, nous avons étudié trois groupes d'arbres : le groupe 1 (4 hêtres avec cœur rouge) et le groupe 2 (31 hêtres dont 17 « rouges » et 14 « blancs ») provenaient de Hesse en Allemagne ; le groupe 3 avait été échantillonné par l'Office National des Forêts dans les forêts communales de Bay sur Aube, de Bourbonne-les-Bains et de Rochetaillé ainsi que dans la forêt domaniale du Corgebin, département de Haute-Marne (Morel 1999). Sur les 375 hêtres de ce troisième groupe, 242 arbres (200 « rouges » et 42 « blancs ») ont fait l'objet d'une première analyse, après exclusion des 133 individus présentant un cœur étoilé (anormal) ou dont certaines caractéristiques étaient indéterminées (par exemple l'âge à cause d'une pourriture empêchant

de compter le nombre de cernes à la culée). Par la suite, la seconde analyse a porté sur une sous-population de 137 arbres (111 « rouges » et 26 « blancs ») qui ne provenaient que des coupes de régénération secondaires (exclusion des arbres provenant de coupe d'amélioration).

Les questions Q1 et Q2 ont été analysées à partir du groupe 1 de quatre arbres ; la question Q3 a été étudiée en utilisant les groupes 2 et 3. Le groupe 2 a servi à développer un modèle de présence/absence du cœur rouge dans l'arbre sur pied. Afin d'ajuster un modèle du même type sur un échantillon indépendant et contenant un nombre d'arbres plus important, les données du groupe 3 ont été utilisées.

Quelles singularités visibles sont des points d'initiation probables du cœur rouge ?

Premièrement, nous avons cherché à identifier visuellement des liens entre les singularités extérieures du tronc, supposées être des entrées d'air possibles (branches mortes/cicatrices de branches, blessures, fentes, fourche), et la présence de cœur rouge à l'intérieur (Wernsdörfer et al. 2005a). Pour cela, nous avons réalisé une maquette en trois dimen-

sions des quatre arbres étudiés en détail. En réponse à la question Q1, il en est ressorti que le cœur rouge était connecté avec certaines branches mortes et cicatrices de branche/nœuds ainsi qu'avec l'entre-écorce présente dans la zone de fourchaison (figure 2). Aucune relation claire avec des blessures ou des fentes n'a été observée.

De quelle forme sont les relations entre ces singularités et le cœur rouge ?

Deuxièmement, afin de caractériser la connexion du cœur rouge avec les cicatrices de branche, nous avons estimé les dimensions des nœuds correspondants à partir de relations géométriques (figure 3).

Il est ressorti, en réponse à la question Q2, que les relations entre cœur rouge et branches mortes/nœuds pourraient dépendre de la géométrie de ces singularités, et que ce sont surtout les nœuds de taille et d'inclinaison élevées qui semblent liés au cœur rouge. Nous avons interprété cela en faisant l'hypothèse que la pénétration d'air par une branche morte est d'autant plus probable que la branche est grosse et inclinée, ce qui se traduit par une surface d'échange plus éle-

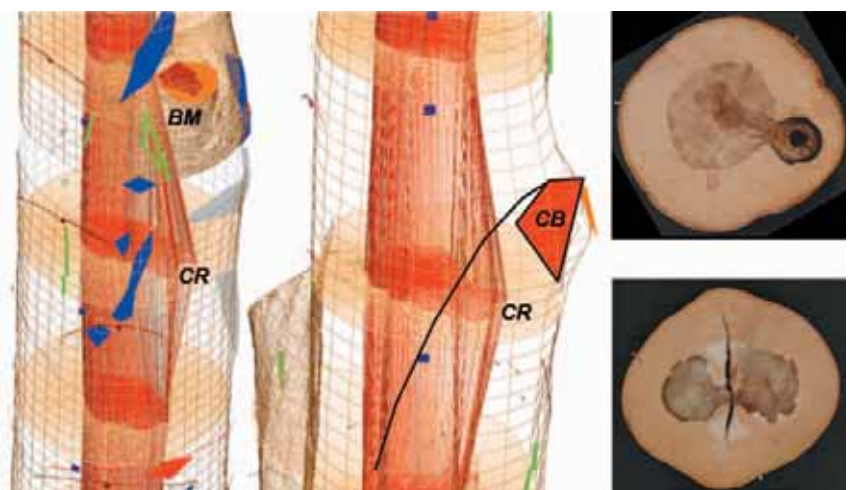


Fig. 2 : connexions du cœur rouge avec certaines singularités

À gauche, relation entre une branche morte (BM) et une déformation du cœur rouge (CR). Au milieu, relation similaire avec une cicatrice de branche (CB). En haut à droite, lien entre un nœud pourri et le cœur rouge. En bas à droite, le cœur rouge est en contact avec l'entre-écorce dans la zone de fourchaison.

vée et un temps de cicatrisation plus long. Ces branches sont de plus particulièrement sensibles à la pourriture car de l'eau peut s'accumuler à l'insertion de la branche (« nœud gouttière »).

Comment utiliser ces relations pour prévoir si un hêtre sur pied a le cœur rouge ?

Partant de l'hypothèse ci-dessus, comment peut-on utiliser les relations entre les branches mortes/cicatrices de branche et le cœur rouge pour prévoir si un hêtre sur pied contient du cœur rouge ou pas (Q3) ? Pour répondre à cette question (Wernsdörfer et al. 2005b), nous avons mesuré sur les arbres du groupe 2 le diamètre et l'inclinaison des branches mortes (N = 49) ainsi que les variables correspondant aux cicatrices de branche (N = 616) illustrées dans la figure 3, et ceci sur toute la longueur de la grume en dessous de la base du houppier. Pour limiter des effets possibles « âge », « diamètre » et « station », les hêtres sélectionnés provenaient d'un seul peuplement de futaie régulière. Cependant, le diamètre à 1,30 m et l'âge (à la souche) avaient été déterminés afin de tester si, dans ces conditions, ils n'avaient effectivement pas d'influence significative sur le phénomène « cœur rouge » (diamètre à 1,30 m : 40,5 à 57 cm ; diamètre à 1,30 m médian : 46,5 cm ; âge : 101 à 147 ans ; âge médian : 109 ans).

Le modèle pour estimer la présence du cœur rouge a été construit de la façon suivante : en partant de l'hypothèse que le déclenchement de la formation du cœur rouge dépend du diamètre et de l'inclinaison d'une branche morte/d'un nœud, la probabilité pour chacune des singularités mesurées d'avoir entraîné du cœur rouge a été estimée. Pour les nœuds, ces probabilités sont estimées à partir des cicatrices de branche (figure 3) en tenant compte de leur profondeur. Un hêtre est considéré comme « rouge », s'il présente au moins l'une des singularités

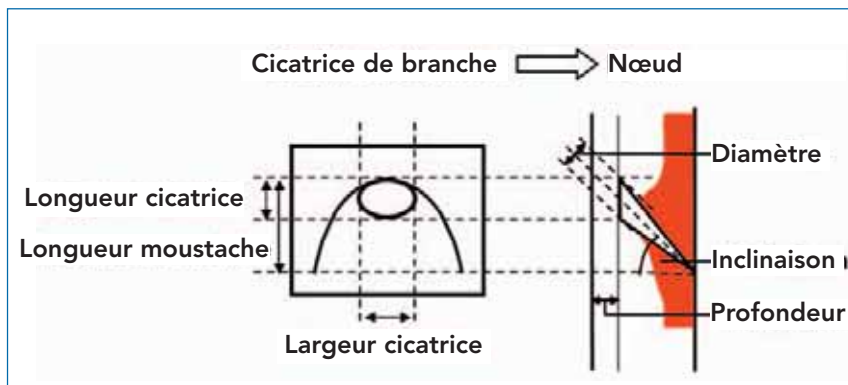


Fig. 3 : relations géométriques entre les variables d'une cicatrice de branche et celles du nœud correspondant

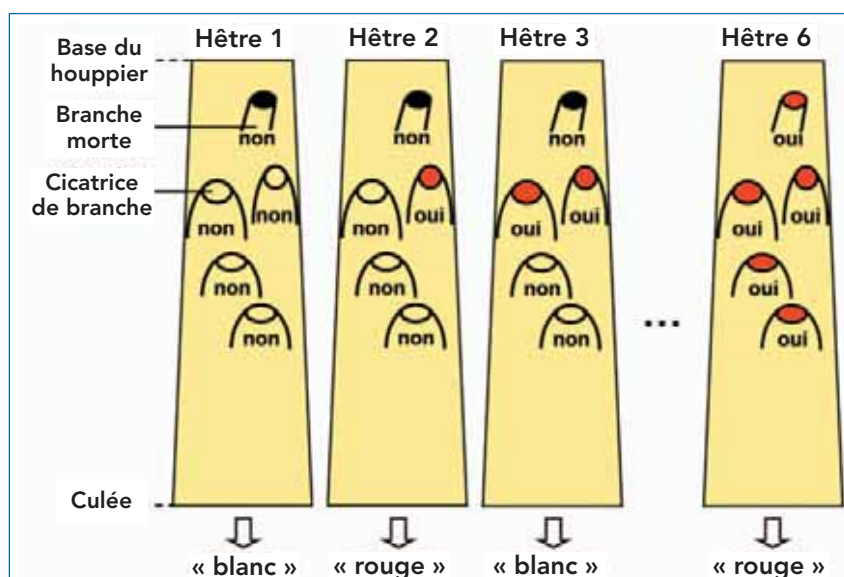


Fig. 4 : Constitution du modèle ajusté sur les arbres du groupe 2 en ce qui concerne l'effet des singularités

Pour chaque singularité (branche morte ou cicatrice de branche), on estime la probabilité qu'elle entraîne du cœur rouge (« oui ») ou pas (« non »). Le hêtre 1 est considéré comme « blanc » car aucune singularité n'entraîne du cœur rouge ; les hêtres 2 à 6 sont considérés comme « rouge » car au moins l'une des singularités entraîne du cœur rouge.

entraînant du cœur rouge. La figure 4 illustre ce raisonnement : dans le cas du hêtre 1, aucune singularité n'entraîne du cœur rouge ; il est donc considéré « blanc ». Dans les cas des hêtres 2 à 6, respectivement une, deux, jusqu'à toutes les singularités entraînent du cœur rouge (c'est-à-dire « au moins une » dans chaque cas). Ces arbres sont donc considérés « rouge ». De plus, une probabilité au niveau dendrométrique a été estimée à partir du diamètre à 1,30 m, de l'âge et/ou du ratio entre les deux. Sur la base de ces estimations de probabilités

aux niveaux des singularités et des caractéristiques dendrométriques, on obtient pour chaque hêtre la probabilité de présence/absence du cœur rouge. Par construction, dans ce modèle, de faibles probabilités indiquent un risque élevé de cœur rouge, de fortes valeurs un risque élevé de « cœur blanc » ; nous avons choisi de fixer arbitrairement à 0,5 le seuil entraînant un classement en « rouge » (probabilité $\leq 0,5$) ou en « blanc » (probabilité $> 0,5$). En réponse à la question Q3, le modèle donnant le meilleur classement en « rouge » ou en « blanc »

s'est avéré fondé sur les hypothèses que nous avons émises quant aux mécanismes pouvant relier la présence de cœur rouge, d'une part, et les cicatrices et les nœuds, d'autre part, ainsi que sur le diamètre à 1,30 m. Sur un total de 31 hêtres, 27 arbres (87 %) étaient classés correctement, les arbres « rouges » et « blancs » étant clairement séparés avec des probabilités en dessous de 0,25 pour les « rouges » et au-dessus de 0,85 pour les « blancs » (avec une exception, voir la figure 5).

Afin d'appliquer un modèle du même type au groupe 3 (données ONF), sa structure a été adaptée aux données disponibles :

- nombre de branches sèches dans les classes de diamètres < 5 cm (BS5), 5 à 10 cm (BS10), 10 à 15 cm (BS15), et > 15 cm (BS+);
- nombre de nœuds ouverts dans les classes de diamètres < 5 cm (NO5), 5 à 10 cm (NO10), 10 à 15 cm (NO15), et > 15 cm (NO+);
- nombre de nœuds recouverts très marqués (NR);
- présence/absence de fourche.

Au lieu de probabilité individuelle pour chaque singularité, on a estimé une seule probabilité par classe pour l'ensemble des singularités comprises dans chaque classe.

		Tous types de coupes (N = 242)		Coupes secondaires (N = 137)	
		Cœur estimé		Cœur estimé	
		blanc	rouge	blanc	rouge
Cœur observé	blanc	28	14	19	7
	rouge	51	149	25	86
Variables significatives		Diamètre à 1,30 m BS15, NO15, NO +		Diamètre à 1,30 m BS15, NO15, NO +	

BS15 : nombre de branches sèches dans la classe de diamètres 10 à 15 cm

NO15 : nombre de nœuds ouverts dans la classe de diamètres 10 à 15 cm

NO+ : nombre de nœuds ouverts dans la classe de diamètres supérieurs à 15 cm

Tab. 1 : estimation et observation de la présence du cœur rouge dans le groupe 3.

Pour l'ensemble des coupes, le modèle proposé estime bien le risque d'occurrence/non occurrence de cœur rouge pour 177 arbres (28 + 149) sur 242. Pour les coupes secondaires, 105 arbres (19 + 86) sur 142 sont bien classés.

Comme pour le groupe 2, nous avons aussi testé les effets possibles de l'âge (70 à 180 ans environ) et du diamètre à 1,30 m (30 à 85 cm pour tous les arbres (N = 242) et 40 à 85 cm pour ceux des coupes secondaires (N = 137)). Comme il y avait beaucoup plus de hêtres « rouges » que de « blancs » (200 « rouges » et 42 « blancs » pour tous les arbres, 111 « rouges » et 26 « blancs » pour ceux des coupes secondaires), un facteur, qui tient compte du nombre d'arbres « rouges » ou « blancs », a été introduit dans le modèle pour réduire ce déséquilibre. Les résultats sont présentés dans le tableau 1.

Le modèle finalement retenu à partir de l'ensemble des 242 arbres utilise les variables BS15, NO15 et NO+ ainsi que le diamètre à 1,30 m. Ce modèle permet de classer correctement 73 % des hêtres, soit 67 % des « blancs » et 75 % des « rouges ». Un second modèle a été ajusté sur les individus provenant des coupes secondaires seulement : les mêmes variables interviennent et 77 % des arbres sont bien classés, soit 73 % des « blancs » et 77 % des « rouges ». Pourtant, dans ce cas des coupes secondaires, on obtient un résultat très similaire avec le diamètre à 1,30 m comme seule variable explicative entrée dans le modèle (1 hêtre « rouge » de plus étant mal classé). En revanche, le même type de modèle ajusté sur l'ensemble des arbres ne permet de classer correctement que 65 % de tous les arbres (157 sur 242).

Conclusions

Concernant les hêtres du groupe 2 (31 individus d'une même parcelle), la présence du cœur rouge a été estimée avec une précision que nous considérons plutôt satisfaisante. Ceci semble confirmer les hypothèses sur l'initiation du cœur rouge en relation avec les dimensions des branches mortes/nœuds (diamètre, inclinaison, profondeur). Après occlusion ces relations ont été estimées à partir des cicatrices. Cependant, dans cette analyse pré-

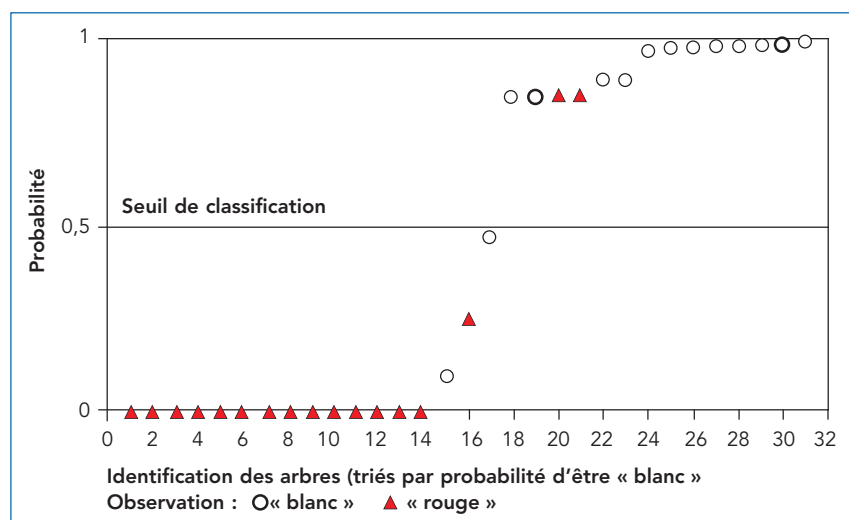


Fig. 5 : probabilité de présence d'un « cœur blanc » estimée pour chaque hêtre du groupe 2 (31 observations)

En fixant à 0,5 le seuil de probabilité, 27 arbres sur 31 sont classés correctement : 15 arbres à cœur rouge (triangles sous le seuil de classification de 0,5) et 12 arbres « blancs » (cercles au-dessus du seuil de 0,5).

liminaire portant sur peu d'arbres, tous issus du même peuplement, les relations cicatrice – nœud restent assez grossières et ne permettent pas encore de caractériser morphologiquement les cicatrices « à risque ». Comparé à cela, le groupe 3 contient un nombre d'individus beaucoup plus élevé (mais peu de hêtres avec un « cœur blanc ») qui proviennent de situations sylvicoles différentes. Un effet significatif des branches mortes et des nœuds a aussi été observé dans ce groupe 3. Cependant, le nombre de ces singularités par arbre (réparties par classes de diamètre) ne semble pas être un critère suffisant pour en déduire celles entraînant une formation du cœur rouge. Un effet significatif du diamètre à 1,30 m a été mis en évidence non seulement pour des individus provenant d'une gamme importante de diamètres et âges (groupe 3), mais aussi pour ceux issus d'un seul peuplement plutôt homogène (groupe 2). En revanche, les variables « âge » ou « accroissement moyen » (diamètre à 1,30 m divisé par l'âge), n'ont pas conduit à un meilleur classement. Même si l'effet significatif du diamètre à l'intérieur du peuplement resterait à confirmer, on peut imaginer atteindre une estimation satisfaisante de la présence du cœur rouge (à partir du diamètre à 1,30 m et des singularités) sans disposer d'une information précise sur l'âge de l'individu, caractéristique qui n'est pas évidente à déterminer dans le cas des arbres sur pied.

Les réponses que nous avons fournies aux trois questions de départ (Q1, Q2 et Q3) constituent des éléments originaux qui nous semblent être importants afin de pouvoir diagnostiquer le cœur rouge dans l'arbre sur pied : relations entre l'extérieur du tronc (cicatrices de branche) et son intérieur (nœuds et cœur rouge), hypothèses quant au mécanisme d'initiation du cœur rouge (effets du diamètre, de l'inclinaison et de la profondeur du nœud), développement d'un

modèle statistique (ajusté sur les arbres du groupe 2) prenant en compte l'effet individuel de chaque cicatrice de branche sur la présence du cœur rouge, ainsi qu'un effet au niveau dendrométrique (diamètre à 1,30 m). Pour aboutir à cela, des mesures intenses de la morphologie de l'arbre et du cœur rouge ont été nécessaires, qui n'ont pu porter, par conséquent, que sur un nombre limité d'arbres (35 au total ; groupes 1 et 2).

Conséquences et perspectives pour le sylviculteur

Afin de développer un outil de repérage des hêtres à risque de cœur rouge qui soit adapté à la pratique sylvicole c'est-à-dire valable pour la plupart des peuplements et ne nécessitant que des mesures simples, il faudrait dans un premier temps poursuivre ces travaux de recherche afin de faire évoluer le modèle en le testant sur un grand nombre d'individus représentant une variabilité importante de stations ainsi que des classes de diamètre et d'âge représentatifs de la ressource en hêtre. Cette évolution du modèle consisterait aussi à intégrer la fourchaison du tronc dans les relations entre la branchaison et le cœur rouge. Cet outil pourrait de plus être lié à un modèle de forme du cœur rouge (Wernsdörfer et al. 2006) qui serait susceptible de servir, par exemple, à une estimation de son volume lors du classement des bois ronds. Pour développer un outil vraiment performant, l'un des problèmes qui risque de se poser est lié à l'insuffisance des connaissances sur la formation du cœur rouge (par exemple : initiation possible à partir du système racinaire ou développement par vagues successives au cours du temps ?).

En ce qui concerne le traitement sylvicole, il faut souligner que les variables d'entrées (dimensions des cicatrices de branche/nœuds, dia-

mètre à 1,30 m) du modèle ajusté sur le groupe 2 (31 arbres) peuvent être contrôlées, jusqu'à un certain point, par l'intensité des interventions. Dans ce contexte, un risque élevé de cœur rouge a été évoqué particulièrement dans le cas de peuplements maintenus trop serrés à un âge élevé, situation se traduisant par une remontée du houppier qui se poursuit pour des arbres relativement vieux et donc par une mortalité de branches à la base du houppier (par exemple : Wilhelm et al. 1999). En revanche, pour des hêtres ayant eu une croissance soutenue avec des houppiers à grandes dimensions, le cœur rouge reste encore peu développé (en pourcentage du diamètre de la section d'une grume) en dessous d'un certain âge et d'un certain diamètre à 1,30 m (120 ans et 60 cm respectivement ; Klädtke 2002, Seeling et Becker 2002). Notre modèle de cœur rouge, ayant été développé comme indiqué ci-dessus, et couplé à un modèle de croissance et de branchaison, permettrait de confirmer ces relations et de les quantifier afin d'évaluer la fréquence du cœur rouge en fonction du traitement sylvicole.

Holger WERNSDÖRFER

Lerfob, UMR INRA-ENGREF,
Champenois (54)

Équipe « Qualité des Bois »

Institut d'Utilisation des Forêts et
des Sciences du Travail Forestier
Université de Fribourg (Allemagne)
Institut de l'Utilisation des Forêts et
de la Science du Travail Forestier,
Université de Fribourg (Allemagne)

Thierry CONSTANT

Gilles LE MOGUÉDEC

Frédéric MOTHE

Gérard NEPVEU

Lerfob, UMR INRA-ENGREF,
Champenois (54)

Équipe « Qualité des Bois »

Ute SEELING

Institut de l'Utilisation des Forêts et
de la Science du Travail Forestier,
Université de Fribourg (Allemagne)

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier H.-O. Denstorf, G. Weiß et K.H. Spisinger (Waldgesellschaft der Riedesel Freiherren zu Eisenbach GbR, Allemagne), E. Cornu, E. Farré, C. Houssement, A. Mercanti, A. Perrin et D. Rittié (LERFoB), E. Hummel, H. Lechner et R. Robert (Université de Fribourg) pour leur participation à la réalisation des échantillonnages des groupes 1 et 2, ainsi que les personnels de la direction territoriale ONF de Bourgogne – Champagne-Ardenne sous la conduite de Michel Alzingre pour les expertises de terrain et la mise à disposition des données du groupe 3.

Les recherches présentées ici ont été réalisées grâce au soutien financier de l'Union Européenne (bourse Marie Curie), du Ministère de Bade-Wurtemberg en Allemagne (bourse LGFG) et de l'Office National des Forêts (Convention de Recherche ONF/INRA 2004-2005 « Production & qualité des feuillus sociaux »).

Bibliographie

BAUCH J., KOCH G., 2001. Biologische und chemische Untersuchungen über Holzverfärbungen der Rotbuche (*Fagus sylvatica* [L.]) und Möglichkeiten vorbeugender Maßnahmen. Abschlussbericht, Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Universität Hamburg. 66 p.

BÜREN von S., 2002. Der Farbkern der Buche (*Fagus sylvatica* L.) in der Schweiz nördlich der Alpen. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, Supplément 86, 137 p.

CEN, 1997. Bois ronds feuillus, classement qualitatif. Partie 1 : chêne et hêtre. EN 1316-1. Comité Européen de Normalisation, Bruxelles, 5 p.

KLÄDTKE J., 2002. Wachstum großkroniger Buchen und waldbauliche Konsequenzen. Berichte Freiburger Forstliche Forschung, vol. 44, pp. 19-31

KNOKE T., 2003. Predicting red heartwood formation in beech trees (*Fagus sylvatica* L.). Ecological Modelling, vol. 169, pp. 295-312

KNOKE T., SCHULZ WENDEROTH S., 2001. Ein Ansatz zur Beschreibung von Wahrscheinlichkeit und Ausmaß der Farbkernbildung bei Buche (*Fagus sylvatica* L.). Forstwissenschaftliches Centralblatt, vol. 120, pp. 154-172

LANIER L., LE TACON F., 1981. cœur rouge. Dans : Le hêtre, TEISSIER DU CROS E. (Coord.), Paris : INRA, pp. 505-507

MOREL P.J., 1999. cœur rouge du hêtre : peut-on trouver des indicateurs externes de la coloration rouge du bois de hêtre ? ONF, Protocole expérimental, 2 p.

NECESANY V., 1960. Der Buchenkern - Struktur, Entstehung und Entwicklung. Vydavatelstvo Slovenskej, Akedemie Vied, Bratislava, pp. 206-222

SACHSSE H., 1991. Kerntypen der Rotbuche. Forstarchiv, vol. 62, pp. 238-242

SCHMIDT O., MEHRINGER H., 1989. Bakterien im Stammholz von Buchen aus Waldschadensgebieten und ihre Bedeutung für Holzverfärbungen. Holz als Roh- und Werkstoff, vol. 47, pp. 285-290

SEELING U., 1991. Abnorme Kernbildung bei Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) und ihr Einfluß auf holzbiologische und holztechnische Kenngrößen. Dissertation, Universität Göttingen. 167 p.

SEELING U., 1998. Kerntypen im Holz — Konsequenzen für die Verwertung am Beispiel der Buche (*Fagus sylvatica* L.). Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen vol. 149, pp. 991-1004

SEELING U., BECKER G., 2002. Holzqualität großkroniger Buchen unter besonderer Berücksichtigung des

Rotkerns. Berichte Freiburger Forstliche Forschung, vol. 44, pp. 45-60

ULRICH E., 2004. Le hêtre à cœur rouge : un produit très recherché. Revue Forestière Française, vol. 56, pp. 175-176

WALTER M., KUCERA L. J., 1991. Vorkommen und Bedeutung verschiedener Kernformen bei der Buche (*Fagus sylvatica* L.). Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, vol. 142, pp. 391-406

WERNSDÖRFER H., CONSTANT T., MOTHE F., BADIA M.A., NEPVEU G., SEELING U., 2005a. Detailed analysis of the geometric relationship between external traits and the shape of red heartwood in beech trees (*Fagus sylvatica* L.). Trees – Structure and Function, vol. 19, pp. 482-491

WERNSDÖRFER H., LE MOGUÉDEC G., CONSTANT T., MOTHE F., SEELING U., NEPVEU G., 2005b. Approach to the estimation of red heart occurrence in *Fagus sylvatica* based on geometric relationships between branch scar development and knot dimensions. Scandinavian Journal of Forest Research, vol. 20, pp. 448-455

WERNSDÖRFER H., LE MOGUÉDEC G., CONSTANT T., MOTHE F., NEPVEU G., SEELING U., 2006. Modelling of the shape of red heartwood in beech trees (*Fagus sylvatica* L.) based on external tree characteristics. Accepté dans Annals of Forest Science

WILHELM G. J., LETTER H.A., EDER W., 1999. Konzeption einer naturnahen Erzeugung von starkem Wertholz. Allgemeine Forst Zeitschrift/DerWald, vol. 54, pp. 232-240

ZYCHA H., 1948. Über die Kernbildung und verwandte Vorgänge im Holz der Rotbuche. Forstwissenschaftliches Centralblatt, vol. 67, pp. 80-109

ZYCHA H., 1953. Der rote Kern der Buche. Holz-Zentralblatt, vol. 79, pp. 973-974

Témoignage d'un gestionnaire : la gestion des peuplements de hêtre dans les forêts publiques de Moselle

« Observer la forêt pour la comprendre et mieux la gérer », tel fut le moteur de l'action d'Edgar Kieffer, ingénieur des travaux, qui consacra les 30 années de sa carrière de forestier (1972-2002) à la gestion des forêts publiques de la Moselle. Cette longue carrière et la volonté d'asseoir la sylviculture sur des démonstrations plutôt que sur des « évidences » ont forgé une solide expérience qu'il s'est attaché à transmettre par la formation professionnelle, l'animation technique, et enfin la rédaction d'un témoignage consacré aux chênes sessile et pédonculé et au hêtre, dont nous retenons ici l'essentiel de la partie consacrée au hêtre. Mais laissons-lui la parole !

t é m o i g n a g e

Un besoin viscéral de comprendre m'a conduit à observer l'évolution des peuplements, à m'interroger sur le bien fondé de certaines « évidences », à formuler quelques hypothèses et à tenter de les vérifier une à une.

Le véritable challenge dans le cas du hêtre consiste à trouver le bon compromis pour obtenir à la fois : 1) une tige bien conformée, saine et nette de picots, qui soit élaguée naturellement sur une hauteur suffisante tenant compte de la fertilité de la station, 2) une cime bien développée et équilibrée, 3) un accroissement en diamètre maximal, gage également d'un bois de qualité. Le tout avec un minimum d'interventions.

L'expérimentation de 1998-2002 : observations initiales

Une série de prises de mesures a été effectuée dans différents peuplements Mosellans à tous les stades de hauteur de 0 à 18 m.

Dans chaque parcelle visitée, plusieurs placettes ont été implantées afin de mesurer :

1) le nombre de tiges dominantes et codominantes, ainsi que le nombre de tiges dominées à l'hectare, 2) le diamètre de toutes les tiges inventoriées, 3) la hauteur et le diamètre de la tige dominante, avec la hauteur de sa première branche vivante et la hauteur de sa première branche morte.

Au vu des résultats obtenus, les parcelles ont été ventilées en deux groupes selon qu'elles ont été dépressées précocement (à 4 et 8 m) ou non (à 12 m ou pas du tout).

Les peuplements à dépressage précoce et élagués naturellement

On a constaté qu'amenés à 35/40 ans au stade de la désignation, ils présentent tous les caractéristiques suivantes : des fourches multiples et grosses branches dès les premiers mètres sur les dominants vigoureux qu'on souhaitait mettre en valeur et l'impossibilité de trouver 50 à 60 hêtres/ha bien conformés.

Le dépressage précoce n'a donc pas permis de qualifier un nombre de tiges correct (sauf pour les alisiers). De toute évidence une telle sylviculture n'est pas envisageable sans élagage artificiel et taille de formation en continu.

Les peuplements à dépressage plus tardif ou non dépressés

De l'observation de tels peuplements sont sorties les informations suivantes :

- Dans les peuplements jamais dépressés, le facteur d'espacement des dominants et codominants est quasi invariable et proche de 14 %.
- Les dominants sont ceux qui s'élaguent naturellement le plus mal ; la hauteur élaguée (jusqu'à la première branche vivante) ne dépasse pas 40 à 45 % de la hauteur totale, soit au mieux 6 m de grume élaguée à 14/15 m de hauteur, ou 8 m de grume élaguée à 18/20 m de hauteur, ou 10 m de grume élaguée à 22/25 m de hauteur.



Photo : J. Bock, ONF

- Dans de telles conditions de concurrence, le diamètre des dominants les plus vigoureux est compris entre 10 à 12 mm par mètre de hauteur totale, soit 12 à 15 cm de diamètre à 12 m de hauteur.
- En l'absence de dépressage il y a alors risque de flexuosité des tiges au-delà de 12 à 13 m de hauteur.
- Lorsque le peuplement est constitué de hêtre en mélange avec des feuillus plus héliophiles, les hêtres sont d'autant moins élagués que le mélange est plus riche en feuillus divers.

L'expérimentation de 1998 à 2002 : Résultats des mesures

Entre 1998 et 2002 plusieurs peuplements à l'histoire différente ont été analysés, tous sur des stations à bonne potentialité pour le hêtre : limon profond sur calcaire du Bajocien pour la forêt de Moyeuve, hêtraie-chênaie acidiphile des collines sous-vosgiennes pour celle de Lemberg.

Forêt-parcelle	Situation illustrée — Histoire succincte (avant l'opération de 1998)
Moyeuve-126	Rattrapage ordinaire. 1 ^{re} éclaircie, tardive, à 49 ans, puis éclaircies à 57, 62 et 68 ans (années 1976, 1984, 1989, et 1995).
Moyeuve-111	Parcours « idéal ». 1 ^{re} éclaircie à 12,5 m de hauteur (26 ans), 2 ^e éclaircie à 16 m (32 ans), soit en 1986 et 1992.
Moyeuve-84	Rattrapage. Aucune éclaircie avant 45 ans : les éclaircies souhaitables à 12 et 16 m de haut n'ont pas eu lieu.
Lemberg-50	Même situation que Moyeuve-84, sur un peuplement plus jeune et encore plus dense.

Après désignation d'arbres d'avenir et éclaircie au bénéfice des tiges désignées en 1998, les constats sont récapitulés au tableau suivant :

Forêt-parcelle	âge en 1998	Ho	mesures au printemps 1998 ^a , juste après désignation et éclaircie				situation en 2002		
			nombre de tiges ^b	surface terrière	volume total	diamètre moyen ^c	diamètre moyen ^c	surface terrière	accrois.c diamètre
MOYEUVE-126	71	30/32	112	14,9	200	42	46,5	20	1,14
MOYEUVE-111	38	20	203	11,3	136			20	1,25 ^d
MOYEUVE-84	45	22/23	419	11,6	142			18,9	0,83
LEMBERG-50	31	17	569	17	170			30 ^e	0,485

^a 1999 pour Moyeuve-111

^b dominantes et codominantes

^c diamètre moyen et accroissement ont été mesurés sur un échantillon d'arbres désignés

^d valeur en 2000, après 2 saisons de végétation ; en 2002, l'augmentation de G a entraîné une perte de 30 % sur la prise de diamètre par rapport à 2000

^e mesure locale autour des arbres n'ayant prospéré que de 2 mm sur le diamètre en 1 an

Des résultats des mesures on peut déduire que :

- (1) à la suite d'une sylviculture « prudente », des éclaircies fortes, même tardives, accélèrent la croissance en diamètre ;
- (2) des éclaircies régulières commencées précocement (à partir de 12 mètres de hauteur dominante dans les cas étudiés) favorisent la croissance en diamètre ; dans le cas Moyeuve-111, une nouvelle éclaircie au bénéfice des tiges désignées s'impose dès la 4^e année après la précédente ;
- (3) les éclaircies fortes sur un peuplement trop dense (G élevé) sont inefficaces.

Conclusion générale

Les résultats de ces séries de mesures, pour partielles qu'elles soient, viennent conforter une longue expérience d'observations de terrain. Elles m'amènent à formuler les recommandations suivantes :

- Pendant toute la phase la plus dynamique de croissance en hauteur, les densités élevées incitent les jeunes arbres à sacrifier leur prise de diamètre au profit de leur croissance en hauteur afin de se maintenir au niveau des plus dominants. Il en va de leur survie.
- La sylviculture des hêtres avec une première éclaircie à 12 m a l'avantage d'être aussi peu interventionniste que possible dans le jeune âge. De ce fait, ce sont bien les tiges les plus vigoureuses qui prennent le dessus.
- Des éclaircies à 12 et 16 m ciblées sur les tiges les plus vigoureuses, suivies à 20 m d'une désignation avec mise en croissance libre des tiges ainsi sélectionnées, donneront des résultats surprenants (+ de 80 cm de diamètre à 90 ans) si le gestionnaire prend garde de pas se laisser rattraper par la vigueur et le dynamisme dont le hêtre est capable dans la plupart des stations.
- Souvenons-nous que suite aux tests de dynamisme en matière d'éclaircie, sur le long terme, c'est toujours l'éclaircie « excessive par rapport à la norme en vigueur » qui s'est finalement avéré être la meilleure.

Edgar KIEFFER,

ONF, Ingénieur divisionnaire des travaux en retraite

Le hêtre en Lorraine

Contextes et orientations sylvicoles

La lorraine vient d'éditer son guide sur les sylvicultures du hêtre en futaie régulière. L'objet de cet article n'est pas de détailler les itinéraires sylvicoles de ce guide mais de montrer comment les scénarios envisagés répondent aux spécificités du contexte lorrain. Cibler les investissements au profit du mélange et proposer des itinéraires en détournement en sortie de phase juvénile constituent les éléments originaux de ces orientations.

En Lorraine, le hêtre est présent dans la plupart des forêts de l'Argonne aux Vosges, en passant par les plateaux calcaires. Dominant sur 30 % de la surface des forêts publiques, soit 175 000 ha environ, il est une composante essentielle des écosystèmes forestiers.

Contexte écologique de la région Lorraine

La Lorraine fait partie du domaine biogéographique continental, secteur baltico-rhénan, à l'exception de la petite partie de Champagne Humide, appartenant au domaine atlantique, secteur subatlantique.

Les plaines, collines et plateaux (moins de 400 m d'altitude en général) sont principalement constitués de calcaires, marnes et argiles avec, d'ouest en est, les Marges champenoises, l'Argonne, les Plateaux du Barrois et des Côtes de Meuse, la Woëvre, les Côtes de Moselle et le Plateau lorrain. Au sud se situe la Vôge assise sur des formations du Trias (essentiellement grès intermédiaires et bigarrés). C'est le domaine de la hêtraie – chênaie.

Le versant lorrain du massif vosgien (de 400 à 1300 m d'altitude) est majoritairement constitué de substrat gréseux avec les Collines sous Vosgiennes et les Basses Vosges, ou de substrat cristallin dans les Hautes Vosges. L'étage montagnard subdivisé en montagnard inférieur domaine de la hêtraie, moyen domaine de la sapinière - hêtraie et supérieur où l'on

retrouve la hêtraie d'altitude en climat climacique, et l'étage subalpin domaine des hautes chaumes et de la hêtraie sommitale.

Le « climat lorrain » est qualifié de semi continental à influences océaniques, caractérisé par :

- un nombre de jours de gelées important : 80 à 90 jours/an en plaine, avec des gelées tardives encore fréquentes en mai, et des gelées précoces dès fin septembre ;

- une saison de végétation limitée à 7 mois maximum, avec des températures moyennes annuelles de 9 °C à 10 °C en plaine ;

- une pluviométrie importante : de 700 à 2 100 mm par an selon les stations, bien répartie sur l'année. La synthèse climatique de Gaussen ne fait

pas apparaître de saison sèche. Cependant, le bilan hydrique P-ETP peut faire apparaître un déficit durant les mois de printemps, en fonction du type de sol et de sa réserve en eau.

Mais les facteurs environnementaux évoluent. Les changements globaux de ces facteurs, constatés au cours du 20^e siècle seraient en partie responsables de l'augmentation de la productivité de la hêtraie lorraine (Badeau et al. 1995, Bontemps et al. dans ce volume). En outre, les prévisions des caractéristiques climatiques pour 2100, issues des modèles Météo France, indiqueraient une probable diminution de l'aire de répartition potentielle du hêtre (Badeau et al. 2005, Landmann et al. dans ce volume).



A. Piboule, ONF

Scénario détournement : l'objectif est ici de permettre l'accroissement libre du houppier,

en supprimant toutes les tiges dont le houppier est en contact direct avec celui d'un arbre-objectif, plus celles susceptibles d'entrer en contact avant l'intervention suivante

Contexte historique de la région Lorraine

Dans les peuplements feuillus, le régime du taillis sous futaie (TSF) était, jusqu'au 19^e siècle, généralisé sur l'ensemble de la plaine lorraine. Sous l'impulsion de l'Ecole forestière royale de Nancy, inspirée notamment des principes de sylviculture allemande, les premières conversions en futaie régulière ont été initiées dans les forêts domaniales (dès 1826 pour la FD de Champenoux). Si bien qu'à la fin du 19^e siècle, la plupart des forêts domaniales bénéficiaient d'un aménagement de conversion en futaie régulière (Degron, 1998). En forêt communale les conversions ne prirent réellement leur essor qu'au lendemain de la seconde guerre mondiale. L'influence des deux guerres mondiales a été considérable sur la physiologie des hêtraies lorraines, avec d'une part l'appauvrissement, voire la destruction, des peuplements forestiers, l'exploitation des réserves en arrière des lignes ruinant ainsi les TSF, les boisements après guerre des zones rouges en résineux ; et d'autre part les dégâts aux arbres (éclats d'obus et de projectiles divers, fils de fer barbelés).

Caractéristiques déterminantes des peuplements forestiers

Les principales caractéristiques des peuplements forestiers lorrains sont les suivantes :

■ **Des anciens TSF** avec une faible densité de tiges de qualité. L'arrêt des coupes de taillis au milieu du 20^e siècle a eu pour conséquences la remontée du taillis dans le houppier des réserves, la mortalité des branches basses de ces réserves et une diminution de la qualité constatée par de nombreux scieurs (coloration des bois par le cœur rouge essentiellement).

■ **Des peuplements en zone rouge** présentant un volume important de bois mitrailés suite aux deux guerres mondiales. L'extraction de la mitraille, objectif légitime de la gestion depuis 50 ans, conduit à d'importants renouvellements de peuplements.

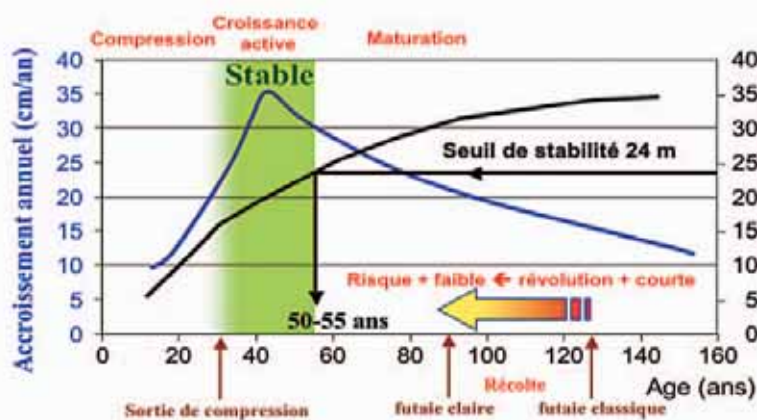


Fig. 1 : stratégie de gestion du risque (pour une futaie régulière de hêtre en station fertile).

Il s'agit de façonner des arbres plus vigoureux grâce à une sylviculture dynamique concentrant les interventions les plus intenses pendant la phase de stabilité des hêtraies et la phase de croissance active du houppier.

■ **Des hêtraies de montagne**, où la forte demande en bois de chauffe a fait régresser les feuillus au profit des résineux.

■ **Des hêtraies touchées par la tempête** de décembre 1999 : 20 000 ha de forêts domaniales et 50 000 ha de forêts communales rasés à plus de 50 %, auxquels se rajoutent les surfaces de peuplements plus ou moins mités (irrégularisés), où se développe une régénération souvent très diversifiée.

■ **Des futaies régulières** qui constituent l'essentiel de la surface forestière de production en forêt publique (60 % selon l'IFN, 2006). Conduites de manière très conservatrice jusque dans les années 1990, avec une phase de compression (Cordonnier et al., dans ce volume) prolongée suivie d'éclaircies très légères, les hêtraies lorraines consistaient en peuplements plutôt purs et denses. Ces futaies cathédrales produisaient en 140 ans des bois rectilignes, bien élagués, mais généralement nerveux ou avec du cœur rouge. C'est à partir des années 1990 que la dynamisation de la sylviculture a été engagée avec un objectif de production des hêtres en moins de 120 ans. Cela s'est aussi traduit dans les jeunes peuplements par de (coûteux) nettoiemens-dépressages en plein qui ont façonné des tiges certes plus vigoureuses, mais présentant souvent un déficit d'élagage naturel et une persistance des fourches plus élevée

(en particulier lorsque les interventions étaient trop intenses, trop nombreuses – Ningre com. pers.).

Fort de ces expériences sylvicoles et de ces constats, couplés à l'amélioration des connaissances sur les habitats et le comportement des essences (autécologie – synécologie), des évolutions sylvicoles sont préconisées dans le guide des sylvicultures du hêtre en Lorraine (ONF, 2005) et les typologies des peuplements (Lanter 2005 ; Bachelet 2004 ; Asaël 1999).

Orientations pour les anciens TSF et hêtraies d'altitude

Dans les anciens TSF, la tendance actuelle est de valoriser au maximum l'existant donc de recourir aux conversions directes souvent en futaie irrégulière par la prise en compte du potentiel de perches et petits bois d'avenir. La problématique essentielle de ces peuplements matures concerne d'une part la gestion de la qualité menacée (par exemple récolte des gros bois en cas de risque de cœur rouge), et d'autre part la gestion de la surface terrière, qui doit permettre de favoriser les conditions d'installation de la régénération. Pour la gestion des peuplements irréguliers, le forestier dispose d'outils adaptés à la plupart des contextes : typologie des peuplements de plateaux calcaires (Lanter 2005), des plateaux lorrains (Bachelet

2004), du massif vosgien (Asaël 1999). Par ailleurs, certains éléments du guide de sylviculture du hêtre – Lorraine (ONF, 2005) peuvent également s'adapter aux futaies irrégulières, bien que les itinéraires décrits soient plus spécifiquement dédiés aux peuplements réguliers. Un guide de sylviculture de futaie irrégulière est aussi en projet (Interreg).

Dans les hêtraies d'altitude, le rôle de production du hêtre est faible car le bois est souvent nerveux (fertilité médiocre, mais n'est-ce pas aussi le résultat d'une sylviculture peu dynamique ?). En revanche son rôle écologique est important : en mélange avec des résineux il améliore notamment le fonctionnement des humus.

Sylviculture des futaies régulières

Il s'agit de pratiquer une sylviculture dynamique et vigilante, avec comme objectif de production l'obtention rapide de gros bois blancs de haute qualité dans le cadre de peuplements clairs et mélangés (20 à 40 % en surface terrière d'essences autres que le hêtre). Trois grands axes structurent le guide :

1 - Favoriser le mélange à tous les stades du peuplement, pour se prémunir vis-à-vis des changements climatiques, pour se prémunir vis-à-vis des aléas économiques, pour des raisons écologiques (stabilité, biodiversité) et pour répondre à une demande sociale (paysage - ISO 14001 - PEFC).

2 - Cibler les investissements au profit du mélange : le hêtre en station est l'essence climacique, suffisamment compétitive pour faire sa place dans le cortège qui l'accompagne. En revanche, il est très « agressif » vis-à-vis des essences plus exigeantes en lumière. Il s'agira alors de cibler prioritairement les investissements en travaux au profit du mélange d'essences, en particulier sur les 70 000 ha en reconstitution. Le hêtre, quant à lui, bénéficiera avantageusement d'une forte compétition interspécifique favorable à la qualification de tiges d'avenir.

Objectifs

Diamètre moyen d'exploitabilité : 60 à 65 cm en fertilité moyenne et haute ; 50 à 60 cm en fertilité basse

Age d'exploitabilité : au maximum 90 ans (fertilité haute) à 110 ans (fertilité basse) (éclaircies en plein, y compris situations de rattrapage). On espère 10 à 15 ans de moins dans le cadre du scénario ultra-dynamique par détournement.

Objectif d'élagage (conditionnant la durée de la phase de compression) : 8 à 9 m en fertilité haute, 7 à 8 m en fertilité moyenne, 6 à 7 m en fertilité basse

Sortie de la phase de compression entre 14 et 18 m au plus tard.

3 - Dynamiser la sylviculture dès la sortie de phase de compression

■ pour profiter de la phase 15-25 m où le risque de chablis est faible (Bock et al., 2003) (voir figure 1) ;

■ pour limiter le « trou de production » consécutif à la tempête, en réduisant l'âge d'exploitabilité et en proposant des itinéraires de durées différentes : un scénario d'éclaircies vigoureuses en plein et un scénario « ultra-dynamique », par détournements successifs dès la sortie de phase de compression (voir photo) ;

■ pour tenir compte des changements de productivité ;

■ pour diminuer la durée d'exposition aux risques (voir figure 1)

Pour atteindre ces objectifs (voir encadré), les forestiers lorrains disposent d'un guide des sylvicultures du hêtre ouvert sur des itinéraires variés, susceptibles de s'adapter aux différents contextes de la hêtraie, proposant ainsi plusieurs options aux sylviculteurs et propriétaires. Pour plus de détails sur les itinéraires, on peut aller sur le site intranet ONF de la direction territoriale de Lorraine (sous la rubrique activité/sylviculture) :

http://intraforet.onf.fr/dtlor/activ/sylv/sommaire/les_guides_de_sylvic/IF0000009a86

Jérôme BOCK

Dominique MESSANT

Philippe DURAND

ONF, DT Lorraine
Service Patrimonial

Bibliographie

ASAËL S., 1999. Typologie et sylvicultures des peuplements forestiers du massif Vosgien. ONF-CRPF. 54 p.

BACHELET F., 2004. Typologie et sylvicultures des peuplements forestiers feuillus du Plateau Lorrain. ONF-CRPF. 46 p.

BADEAU V., BECKER M., BERT D., DUPOUEY J.L., LEBOURGEOIS F., Picard J.F., 1995. Long term growth trends of *Fagus sylvatica* L. in northern France: a comparison between high and low density stands. *Acta Oecologica*, vol. 16, n°5, pp. 571-583

BADEAU V., DUPOUEY J.L., CLUZEAU C., DRAPIER J., 2005. Aires potentielles de répartition des essences forestières d'ici 2100. In : Dossier « La forêt face aux changements climatiques ». *Forêt Entreprendre*, n°162, pp. 25-29

BOCK J., VINKLER I., DUPLAT P., RENAUD J.P., 2004. Stabilité au vent des hêtraies : les enseignements de la tempête de 1999 dans le nord-est de la France. *Rendez-vous techniques*, n° 3, pp. 29-34

BONTEMPS J.D., VALLET P., HERVE J.C., RITTIE D., DUPOUEY J.L., DHOTE J.F., 2005. Des hêtraies qui poussent de plus en plus vite : vers une forte diminution de leur âge d'exploitabilité ? *Revue Forestière Française*, vol. 57, n° 2, pp. 123-142

DEGRON R., 1998. La conversion des forêts domaniales feuillues françaises (1860-1888) : une grande vague brisée. *Revue Forestière Française*, vol. 50, n°1, pp. 71-84

LANTERO., 2004. Typologie et sylvicultures des peuplements forestiers feuillus du Plateau Calcaire. ONF-CRPF. 50 p.

ONF, 2005. Guide des sylvicultures : le hêtre en Lorraine. Nancy : ONF DT Lorraine. 88 p.

ONF, 2006. DRA et SRA. Nancy : ONF DT Lorraine.

Guide de la hêtraie nord-atlantique : des éléments clés qui intègrent les spécificités du Nord-Atlantique

Cet article résume les éléments fondamentaux qui forment l'ensemble des principes directeurs retenus dans le guide de la hêtraie nord-atlantique en cours de parution. Comme de nombreux guides de gestion sylvicole, il synthétise les travaux expérimentaux en cours et intègre les réflexions récentes sur la sylviculture du hêtre. Il est à destination des praticiens et adopte les objectifs en adéquation avec nos connaissances et le contexte ouest et nord-ouest de la France.

Le contexte biogéographique

Un contexte biogéographique relativement homogène : le grand quart nord-ouest de la France

L'enveloppe géographique est liée à un contexte pluviométrique relativement homogène d'assez faible amplitude de l'ordre de 650 mm à 800 mm annuels. Les variations mensuelles sont également faibles (entre 50 et 80 mm), l'humidité atmosphérique plutôt constante et supérieure 85 %, sauf particularités locales plus défavorables à prendre en compte dans les aménagements. L'ensemble comprend donc la Bretagne, les Pays-de-la-Loire (partie nord), la Picardie, l'Ile-de-France, le Nord – Pas-de-Calais et les Haute et Basse-Normandie. Les réflexions à l'origine du guide des sylvicultures de la hêtraie nord atlantique ont donc été menées conjointement par les personnels des deux directions territoriales Ile-de-France — Nord-Ouest et Centre-Ouest.

Un contexte favorable à la croissance du hêtre avec des fertilités supérieures à la moyenne nationale

Les conditions édaphiques (limons assez répandus) associées à des conditions climatiques favorables conduisent à des fortes fertilités en moyenne. Les peuplements de bonne fertilité sont les plus fréquents

et les cas de fertilité pouvant être considérées comme excellentes ne sont pas rares. Les itinéraires sylvicoles du guide sont calés sur trois niveaux d'indice de fertilité à 100 ans :

- fertilité *excellente* avec une hauteur dominante à 100 ans de 40 m
- fertilité *bonne* avec une hauteur dominante à 100 ans de 35 m
- fertilité *moyenne* avec une hauteur dominante à 100 ans de 30 m

Ce découpage en trois classes de fertilité tient compte des derniers travaux de l'INRA (cf. article de E. Simon *et al.* dans ce volume), ainsi que des conséquences des changements globaux sur la croissance du hêtre (cf. article de J.D. Bontemps *et al.* dans ce volume).

Une façade maritime venteuse, risque pris en compte pour bâtir les itinéraires

Les dégâts occasionnés par le vent sur les peuplements sont fréquents sur le Nord-Ouest (1984, 1987, 1990, 1999). Ce risque chablis est d'autant plus accentué que l'exposition au risque est longue, notamment si on laisse vieillir les peuplements trop longtemps et qu'ils atteignent des hauteurs très élevées. De plus, il est probable que l'élancement des peuplements (le rapport H/D, corrélé avec le partage entre houppier et bille de pied) joue un rôle dans la plus ou moins grande résistance au

vent. Aussi les itinéraires préconisés sont très dynamiques pour que les arbres soient mis en situation d'atteindre le diamètre d'exploitabilité recherché le plus rapidement possible, avec une bille de pied réduite et un houppier équilibré.

Un manque de mélange avec d'autres espèces dans les actuels peuplements de hêtre

Les peuplements adultes de hêtre sont le plus souvent monospécifiques dans le Nord-Ouest. Si les stations à tendance acidiphiles et le comportement de fort compétiteur du hêtre peuvent en partie l'expliquer, le contexte historique d'interventions très faibles a accentué ces tendances. Il est donc nécessaire d'aider l'installation et le maintien d'autres espèces avant leur disparition en phase juvénile.

Une sylviculture juvénile justifiée pour l'obtention d'une bille de pied de qualité

La sylviculture juvénile proposée pour la hêtraie nord-atlantique réduit les risques encourus en préconisant :

- l'obtention d'une bille de pied d'environ 6 à 7 m élaguée naturellement dans le jeune âge (si jugé nécessaire par un diagnostic préalable, possibilité d'effectuer un complément en artificiel dans certaines conditions),



J. Piat, ONF

Futaie adulte, claire et mélangée avec hêtre objectif en FD de Compiègne

■ le mélange des peuplements avec une sélection précoce d'autres espèces en accompagnement du hêtre.

Les cinq itinéraires de façonnage du guide, phase entre 3 m de hauteur et le début de mise en croissance rapide des tiges vers 15 m, s'appliquent en

fonction de la densité à l'hectare constatée et de la hauteur dominante atteinte par le peuplement.

Deux itinéraires (5HET1, 5HET2) préconisent des opérations ciblées sur un nombre réduit de tiges à l'hectare, ils prennent en compte le déficit d'élégage naturel, du fait de la

faible densité à l'hectare. Le premier, adapté aux peuplements avec une densité inférieure à 2000 t/ha pour une hauteur entre 3 et 6 m, propose, si un diagnostic préalable le juge utile, des tailles de formation sur un nombre limité de tiges. Cela concerne le plus souvent des régénérations artificielles. Ces deux itinéraires proposent une sortie de phase de qualification par un détournage de 80 tiges/ha.

Les deux itinéraires suivants (5HET3 et 5HET4) s'appliquent aux peuplements denses issus de régénération naturelle pour lesquels il est préconisé un nettoyage-dépressage sur l'ensemble du peuplement autour de 5 m de Ho (5HET3, densité visée de 5 000 t/ha) ou avant 9 m dans le cas où l'intervention à 5 m n'a pas eu lieu (5 HET4, densité visée de 3 000 t/ha). Dans les deux cas ces interventions dynamiques sont suivies d'une phase de compression jusque 14-15 m de hauteur afin que l'élégage naturel reprenne et forme la bille de pied souhaitée.

Le dernier itinéraire proposé (5HET5) est destiné aux peuplements déjà hauts avec une densité trop élevée et donc un facteur d'élancement défavorable à leur stabilité. Il préconise une sortie de phase de qualification à 14 m de Ho par détournage des arbres objectif.

Une sylviculture des peuplements adultes très dynamique

Pour les peuplements de moins de 60 ans, une sylviculture de peuplements adultes très dynamique

Les objectifs fixés (tableau 1) sont ambitieux en terme de diamètre et d'âge mais sont réalistes au vu des

Fertilité	Indice de fertilité	Diamètre d'exploitabilité	Âge moyen correspondant	Ho à cet âge	Densité finale	Longueur de bille de pied
1-excellente	40 m	70-75 cm	80-90 ans	39,0 m	60 t/ha	8 m
2-bonne	35 m	65-70 cm	90-100 ans	33,5 m	70 t/ha	7 m
3-moyenne	30 m	60-65 cm	100-120 ans	31,5 m	80 t/ha	7 m

Tab. 1 : objectifs fixés (critères d'exploitabilité), selon la fertilité

Le peuplement de fertilité	Il a un âge (avec un Ho) de	Il aura à terme un diamètre (à l'âge d'exploitabilité)	Il doit suivre la préconisation du guide
excellente	20-40 ans (14-27 m)	75 cm à 90 ans	Appliquer la norme « IT 1 » et viser la surface terrière cible
excellente	40-60 ans (27-35 m)	70 cm à 90 ans	Rattraper la norme « IT 1 » (surface terrière cible et nombre de tiges à vérifier)
excellente	60-100 ans (35-40 m)	70 cm à 110 ans	Gérer en priorité la stabilité
bonne	30-40 ans (13,5-18,5 m)	65 cm à 90 ans	Appliquer la norme « IT 2 » et viser la surface terrière cible
bonne	40-60 ans (18,5-27 m)	65 cm à 100-110 ans	Rattraper la norme « IT 2 » (surface terrière cible et nombre de tiges à vérifier)
bonne	60-80 ans (27-32 m)	65 cm à 110 ans	Rattraper la norme N 4 d'Oswald
bonne	80-100 ans (32-35 m)	65 cm à 120-130 ans, ou 70-80 cm à 150 ans	Gérer la stabilité en priorité, ou gérer la mise en régénération
moyenne	40-80 ans (13-26 m)	60-65 cm à 100-120 ans	Rattraper la norme « IT 3 »
moyenne	80-100 ans (26-30 m)	60 cm à 120-130 ans	Gérer la stabilité en priorité

Tab. 2 : extrait du guide : tableau synthétique des itinéraires conseillés en sylviculture adulte

modélisations réalisées et des mesures d'accroissements observées dans les placettes suivies actuellement. Ces objectifs sont en effet très loin des constats actuels de récolte (60-65 cm vers 140 ans).

Les simulations réalisées conduisent à distinguer dans les itinéraires proposés dans le guide les peuplements en fonction de leurs traitements sylvicoles passés, en tenant compte de leur fertilité, de leur âge et de leur origine naturelle et artificielle.

Les stratégies pour atteindre les objectifs énoncés sont données dans le guide de sylviculture en nombre de tiges et en surface terrière pour chaque fertilité et chaque famille de cas.

Pour les peuplements entre 60 et 100 ans, une sylviculture dite de rattrapage tenant compte du capital sur pied en surface terrière

Pour les peuplements de très bonne ou bonne fertilité ayant atteint les 60 ans, les scénarios tiennent compte du capital sur pied souvent fort et conseillent des éclaircies plus fréquentes afin de réduire ce capital (tableau 2).

Pour les peuplements de plus de 100 ans, une gestion du capital sur pied tenant compte du diamètre dominant atteint

Dynamiser est illusoire à ce stade, il convient alors d'éviter les sacrifices d'exploitabilité (il manque souvent une classe de diamètre à ces peuplements pour être récoltés), et effectuer le calcul du temps nécessaire pour atteindre le diamètre recherché (fonction de l'accroissement actuel en diamètre) pour établir un plan de prélèvement en densité ou en volume. Le peuplement est amené progressivement à la mise en régénération.

Pour des peuplements aux caractéristiques particulières, une sylviculture par détournage

Pour les peuplements issus des itinéraires de travaux où la sortie de phase de compression s'est faite par détournage (5HET1, 2 et 5), on conserve la même logique de concentrer les interventions uniquement au profit des arbres objectif. Il s'agit de peuplements où le nombre d'arbres de qualité est restreint et où aucune amélioration du reste du peuplement n'est attendue.

Dans le cas de peuplements présentant des hêtres disséminés (stations calcicoles, peuplements très mélangés) au sein d'une masse d'autres essences (par exemple des hêtres dans une charmaie), le principe de détournage des plus beaux hêtres (jusqu'à un maximum de 50 arbres/ha) est également mis en œuvre.

En conclusion

Le guide de la hêtraie nord-atlantique s'appuie sur les acquis généraux de l'espèce hêtre et tient compte des observations faites sur le territoire. Il fallait éviter de recréer de futurs peuplements trop denses et s'adapter aux actuels peuplements avec leurs caractéristiques propres (densité très variable, plantation ou régénération naturelle, élagage naturel satisfaisant ou quasi-absent...) : il en a été tenu compte dans les stratégies proposées, ce qui rend le guide riche en nuances.

Brigitte PILARD-LANDEAU

Responsable du service technique territorial
ONF, DT Ile-de-France — Nord-Ouest

Les hêtraies de la moitié sud de la France : caractéristiques et grands principes de gestion

Les hêtraies occupent une surface importante dans les montagnes du sud de la France et s'y présentent sous des aspects variés liés à la diversité des contextes (climat, exposition, substrat, pente...) et de l'histoire passée. Les enjeux aussi sont multiples : approvisionnement de la filière, fourniture de bois-énergie, protection contre les risques naturels, protection de la biodiversité, rôle paysager. Cette diversité se traduit dans les modes de traitements et les sylvicultures mis en œuvre, détaillés dans des guides de sylviculture par massif. Les diagnostics préalables sont, autant qu'en plaine, nécessaires aux décisions (ou pas) de coupes et travaux.

Présentation générale

Alors que dans la moitié nord de la France, le hêtre est surtout présent en plaine, il occupe préférentiellement la montagne au sud. Il y trouve les conditions climatiques qui lui sont favorables, notamment une pluviométrie suffisante (> 750 mm/an) et une humidité atmosphérique satisfaisante.

Les peuplements dont il est question dans le présent article sont ceux où le hêtre est prépondérant dans la strate principale. Le hêtre est présent bien entendu sur des surfaces beaucoup plus étendues, en mélange soit avec le sapin à l'étage montagnard, soit avec le chêne aux altitudes inférieures. Si les hêtraies sont des habitats climatiques par excellence (voir l'article de N. Drapier et al. dans ce volume), l'homme en a, en plaine, souvent réduit sa surface au profit des chênes via le traitement en taillis sous futaie. En zone de montagne, le hêtre a été au contraire plutôt favorisé aux dépens du sapin, notamment dans les Pyrénées et le Massif Central (voir plus loin les spécificités des

hêtraies du Sud). Le hêtre se rencontre également très largement en phase de recolonisation de pinède dans le sud du Massif des Alpes (voir l'article de J. Ladier dans ce volume).

Près de 30 % (222 000 ha) de la hêtraie publique française se trouvent dans les massifs du sud de la France que sont le Massif Central, les Alpes, Les Pyrénées et la Corse. Les trois départements les plus couverts par de la hêtraie se trouvent dans les Pyrénées (Pyrénées Atlantiques, Ariège et Haute Pyrénées) et représentent à eux seuls 40 % de la surface totale des hêtraies du sud de la France (cf. tableau 1, figures 1 et 2).

Si sur l'ensemble du territoire national, les hêtraies en forêt

domaniale représentent 40 % de la surface des hêtraies des forêts publiques, cette proportion n'est que de 33 % dans la moitié sud. Un quart de ces hêtraies domaniales se trouvent dans un seul département, l'Ariège.

Spécificités des hêtraies du Sud

Les hêtraies du sud se rencontrent en montagne, principalement à une altitude comprise entre 500 et 1 400 m. Pour les plus basses, celles situées sur les piémonts, leur maintien est possible grâce à des conditions météorologiques particulièrement favorables (pluviométrie élevée, cas du Pays Basque et du Limousin). En Auvergne les

Massif	Départements ⁽¹⁾	Toutes forêts publiques	Forêts Domaniales
Pyrénées	09-11-31-64-65-66	115 946 ha	32 742 ha (28 %)
Alpes	04-05-06-26-38-73-74	54 784 ha	16 072 ha (29 %)
Massif Central	07-12-15-19-23-30-34-43-48-63-81	41 123 ha	21 432 ha (52 %)
Corse	2A-2B	9 348 ha	3 700 ha ⁽²⁾ (40 %)
TOTAL	----	221 201 ha	73 946 ha (33 %)

⁽¹⁾ Les départements avec moins de 800 ha de hêtraies publiques n'ont pas été pris en compte ;

⁽²⁾ données 1996

Tab. 1 : surfaces à hêtre prépondérant dans la strate principale par grand massif (données IFN 2005)

hêtraies sont majoritairement en altitude, 60 % d'entre elles sont à plus de 1 100 m d'altitude.

Du fait de leur caractère principalement montagnard, les hêtraies sont plutôt installées sur des terrains à forte pente. La conséquence est une longueur de débardage souvent importante et, de manière générale, des difficultés d'exploitation. Mais il existe toutefois une forte variabilité au sein d'un même grand massif. C'est ainsi qu'en Auvergne les deux tiers des hêtraies publiques du Cantal ont une longueur de débardage supérieure à 500 m alors qu'elles ne sont que 13 % dans les Monts Dore – Cézallier. Ces contraintes, ainsi qu'une sylviculture orientée vers la production de bois d'œuvre de qualité depuis peu (à l'échelle des peuplements) fait que les revenus tirés de la commercialisation du hêtre en montagne sont bien moindres qu'en plaine.

L'histoire sylvicole des hêtraies du sud de la France montre que leurs implantations actuelles sont plus la conséquence de l'activité humaine que des conditions écologiques. Pendant longtemps elles ont été traitées en taillis pour la production du charbon de bois et du bois de chauffage, en association avec du pâturage, notamment dans les Pyrénées et le Massif Central. Les résineux, principalement le sapin, ont été alors éliminés par le type de traitement et la pression du bétail. Une bonne part des hêtraies pures d'altitude serait en fait des hêtraies sapinières. Le taillis a souvent fait l'objet d'un furetage, technique qui consiste à ne récolter sur une cépée que la ou les tiges les plus grosses. Ensuite, et ce dès la fin du 19^e siècle, le traitement du taillis fureté a été progressivement arrêté, soit volontairement par conversion en futaie, soit involontairement par abandon de toute sylviculture sur les secteurs les moins accessibles. Les peuplements à dominante de hêtre sont donc pour la plupart issus de souche.

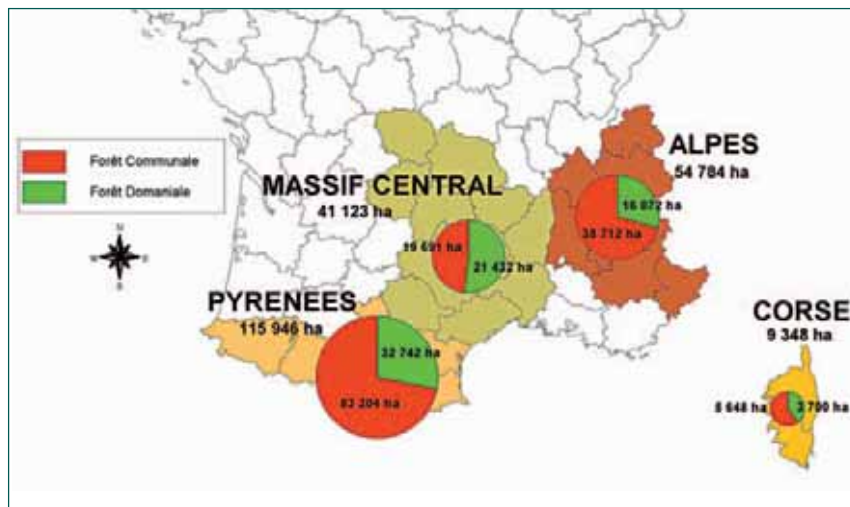


Fig. 1 : répartition des hêtraies de la moitié sud de la France en forêts publiques

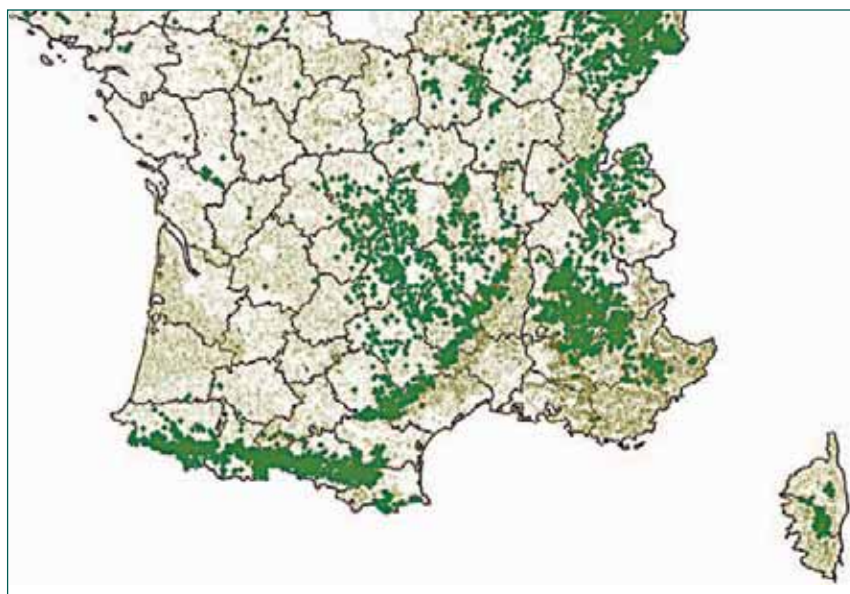


Fig. 2 : carte des points de sondage IFN où le hêtre est l'essence prépondérante de l'étage principal

Cette origine sylvicole explique bien entendu la répartition des structures actuelles (cf. tableau 2) où la futaie régulière, issue de souche, domine.

L'histoire sylvicole explique aussi, en partie seulement car la dynamique du hêtre en est aussi à l'origine, la pureté des peuplements actuels (cf. tableau 3). L'éradication des sapins à l'étage montagnard et l'absence d'intervention volontaire au profit d'essences d'accompagnement ont conduit à cette

pureté des peuplements. C'est sur le massif alpin que l'on trouve le plus de mélange. Mais les chiffres moyens sur ce massif cachent en fait un fort gradient nord sud ; toutes propriétés confondues, la pureté en surface terrière est de l'ordre de 80 % dans les Alpes du sud, donc semblable aux deux autres massifs, et de seulement 55 % dans les Alpes du nord. La présence d'un plus grand mélange dans les hêtraies des Alpes du nord est cohérente avec le fait que les

Propriété	Forêts Domaniales				Autres forêts publiques			
	F.R.	F.I.R.	F. et T.	T.	F.R.	F.I.R.	F. et T.	T.
Massif \ structure⁽¹⁾								
Pyrénées	76 %	8 %	6 %	11 %	59 %	28 %	8 %	5 %
Alpes	58 %	11 %	11 %	20 %	38 %	11 %	25 %	25 %
Massif Central	70 %	2 %	4 %	24 %	45 %	9 %	12 %	33 %

(1) F.R. = futaie régulière ; F.I.R. = futaie irrégulière ; F. et T. = mélange futaie et taillis ; T. = taillis

Tab. 2 : proportions des structures des peuplements à hêtre prépondérant dans la strate principale

	Pureté en surface terrière	Nombre moyen d'essences
	DO — AS ⁽¹⁾	DO — AS ⁽¹⁾
Pyrénées	87 % — 84 %	1,8 — 1,8
Alpes	67 % — 64 %	3,2 — 3,2
Massif Central	83 % — 80 %	1,9 — 2,2

(1) DO = Forêts Domaniales AS = Autres Forêts Publiques

Tab. 3 : pureté des peuplements à hêtre prépondérant dans la strate principale par grand massif

peuplements où le hêtre est présent sans être prépondérant dans l'étage principal sont très nombreux sur ce secteur et correspondent à des hêtraies – sapinières – pessières.

Comme pour beaucoup de contextes forestiers du sud de la France et plus particulièrement en montagne, des fertilités extrêmes peuvent être rencontrées dans les hêtraies. Certains peuplements du Pays Basque ont une fertilité nettement au-dessus de la meilleure fertilité telle que définie dans l'article sur le hêtre du *Bulletin Technique ONF* n° 31 (Ho à 100 ans > 35 m), et on trouve à haute altitude des peuplements très pauvres (Ho à 100 ans de 20 m).

Les guides de gestion en vigueur

Les premiers guides de sylvicultures pour les hêtraies du sud ont été publiés en 1996 dans les Alpes du nord et en 1997 dans le Sud-Ouest (applicable sur l'ensemble de la chaîne des Pyrénées ainsi que dans les hêtraies du sud du Massif Central des régions Languedoc-Roussillon et Midi-Pyrénées). Le premier a été modifié en 2004, notamment en ce qui concerne les travaux, tandis que le second a été complété par la sortie en 2003 des Itinéraires techniques de travaux sylvicoles (ITTS) pour le hêtre dans

le Sud-Ouest. Un autre guide concerne les hêtraies d'altitude supérieure à 900 m du Massif Central, paru en 2001, mis à jour et complété par des ITTS en 2005.

Ces guides de sylvicultures sont évolutifs. Un audit en cours sur celui du Sud-Ouest devrait conduire à une révision pour une meilleure prise en compte des traitements irréguliers et des futaies à deux étages présentes dans l'ouest de la chaîne. Une 3^e version du guide des Alpes du nord (GSM : guides des sylvicultures de montagne) a été réalisée en collaboration avec le CRPF et le Cemagref et récemment diffusée. Ce nouveau guide aborde les fonctions de production mais aussi celles de protection contre les risques naturels (chutes de blocs, avalanches, phénomènes torrentiels, glissements de terrain), en liaison avec l'exploitabilité des peuplements.

Une réflexion reste à mener dans le Massif Central sur les peuplements situés à des altitudes inférieures à 900 m notamment en Limousin et Allier. Les classes de fertilité y sont en effet bien meilleures, les bois de qualité supérieure à ce qu'on obtient en altitude avec une bille de pied potentiellement plus longue et la desserte est bonne. Une adaptation des préconisations d'interventions sylvicoles y est donc nécessaire, d'autant plus que les peuplements d'origine artifi-

cielle y sont aussi plus nombreux. Dans les Alpes du sud, une étude préalable à l'élaboration d'un guide de sylviculture a été réalisée en 2005. Celle-ci a consisté notamment à recenser la diversité des hêtraies (futaies sur souches, vieux taillis, accrus dynamiques) et à proposer les bases d'une clé de choix des orientations sylvicoles en fonction des enjeux et des contraintes.

Tous ces guides de sylvicultures s'appuient sur des outils d'aide à la description des peuplements. Que ce soit pour les Alpes du nord ou le Sud-Ouest, une première typologie spécifique aux hêtraies a été remplacée par un nouvel outil plus moderne et indépendant de l'essence respectivement en 2003 et 2004 (cf. Sardin et Gauquelin, 2003 : *Rendez-vous techniques* n° 2, pp 20-24). Le Massif Central dispose également d'une typologie valable pour tous les peuplements depuis 2001.

Les grands principes sylvicoles des guides en vigueur

En montagne, les sylvicultures remplissent plusieurs rôles

Si la fonction de production a été déterminante dans l'élaboration des guides de sylvicultures en vigueur dans le sud de la France, les autres fonctions ne sont pas en reste. Sur les territoires où les risques naturels sont importants, la fonction de protection fait l'objet d'itinéraires techniques spécifiques, notamment dans les Alpes du nord. Le paysage est également un élément important pris en compte dans les préconisations des guides. La recherche systématique du mélange des essences, retenue dans tous les massifs, contribue à la biodiversité et la stabilité des peuplements sur le long terme. Pour y parvenir, des travaux spécifiques sont envisagés durant la phase de qualification des tiges et les sylvicultures préconisées conduisent à des futaies le plus souvent claires.

Priorité à la régénération naturelle des hêtraies

Pour le renouvellement des peuplements, la priorité est nettement donnée à la régénération naturelle, elle permet le maintien et l'utilisation des écotypes locaux, elle est plus économique. D'autant qu'en général les semis ont tendance à s'installer très facilement. Dans quelques cas rares il peut être toutefois fait appel à la régénération artificielle : reconstitution après aléas, substitution d'essences mal adaptées, difficulté d'obtenir de la régénération naturelle dans un contexte de forêt à rôle de protection...

Cette phase de renouvellement est parfois menacée par les cerfs, même si ceux-ci éprouvent une appétence bien moindre pour le hêtre que pour bien d'autres essences. Mais dans certains secteurs, notamment les Pyrénées centrales, les densités d'animaux sont telles que des hêtraies entières ont leur renouvellement menacé voire stoppé depuis de nombreuses années.

Des travaux en phase de qualification adaptés aux peuplements en place

Les itinéraires techniques en phase de qualification des tiges (entre 3 m et 12-14 m de hauteur dominante) proposent des interventions très variées en fonction des caractéristiques des peuplements et de leurs objectifs. Des dépressages (selon le cas en plein ou ciblés au profit d'un nombre limité de tiges) sont préconisés dans les fourrés denses lorsque leur hauteur dominante est de 6-8 m pour accélérer la croissance des tiges (et obtenir des produits mieux valorisés que le bois de chauffage dans les hêtraies d'altitude du Massif Central), favoriser le mélange des essences, permettre le retour d'une strate basse favorable à la biodiversité (ex : myrtille dans les zones à grand tétras des Pyrénées), structurer le peuplement (dans les zones de protection vis-à-vis des chutes de blocs et de l'érosion dans les Alpes)... Dans les peuplements plus âgés et restés denses



Photos ONF, STIR Massif Central

Hêtraie montagnarde dans le Puy de Dôme

des Pyrénées, de hauteur dominante 11-14 m, des détourages au profit de tiges d'avenir (100-140/ha) sont préconisés. Ce détourage est plutôt modéré et permet de retarder la première éclaircie, afin d'augmenter ses chances d'être commercialisée, tout en permettant aux tiges sélectionnées d'avoir leur rapport H/D amélioré (l'élagage naturel ne doit pas être arrêté, il reprend après un ralentissement voire une pause passagère).

Des sorties de phase de qualification dépendant des objectifs

La première éclaircie, ou sortie de phase de qualification, est programmée dans tous les guides selon la hauteur dominante atteinte, en lien avec la hauteur élaguée recherchée. Elle est directement dépendante de la fertilité de la station : de 13 à 16 m dans le Sud-Ouest et le Massif Central (hauteur plus élevée pour les meilleures fertilités), de 12 à 14 m dans les Alpes.



T. Sardin, ONF

Hêtraie en FD d'Orles (09)

Dans ce massif, la sortie de phase de qualification se fait soit par détourage (70 tiges/ha en fonction de production, 100 tiges/en fonction de protection) soit par éclaircie en plein pour faciliter la commercialisation (marquage en réserve de 300-400 tiges/ha).

Dans le Sud-Ouest et le Massif Central, la première éclaircie est toujours préconisée en plein pour être commercialisée, quitte à avoir été retardée après détourage léger de 100-140 tiges/ha dans les Pyrénées (cf. § immédiatement précédent).

Quel que soit le mode de sortie de phase de qualification retenu, toutes les sylvicultures préconisées dans le sud de la France sont dynamiques pour permettre une croissance soutenue, garante d'une production de bois de la meilleure qualité possible.

Des traitements diversifiés

Globalement la structure très régulière de toutes les hêtraies des massifs du sud de la France conduit les gestionnaires à privilégier les modes de traitement avec suivi de la régénération par surface. Outre la futaie régulière, la futaie (« irrégulière ») par parquets est souvent retenue pour son intérêt autant en terme

d'intégration paysagère que pour son rôle de protection (évite les phases de jeunesse sur de grandes surfaces contiguës). Là où la fonction de protection vis-à-vis des chutes de pierres est prédominante c'est la futaie irrégulière par bouquets (< 50 ares) qui est retenue. Mais dans ce contexte le traitement en taillis simple reste une alternative possible dans les Alpes. Il pourrait même prendre de l'ampleur en cas de forte évolution de demande en bois énergie.

Lorsque les conditions d'exploitation sont trop difficiles ou la valeur du bois trop faible et qu'il n'y a aucun enjeu (notamment de protection), le scénario « laisser faire la nature » est aussi une solution mise à disposition du gestionnaire.

Les évolutions en cours et à venir

L'évolution des sylvicultures tend à proposer de plus en plus d'itinéraires spécifiques à la structure des peuplements en place et aux objectifs qui leur sont assignés. Cela va conduire le forestier à devoir de plus en plus souvent diagnostiquer son peuplement pour le connaître au mieux avant d'intervenir, ou ne pas intervenir. Le diagnostic avant éclaircie en futaie régulière a été largement pratiqué grâce au logiciel Sylvie. Outre la détermination des caractéristiques dendrométriques des peuplements après éclaircie (surface terrière et nombre de tiges par hectare), le diagnostic avant éclaircie porte de plus en plus sur les facteurs qui influencent la commercialisation des coupes. En zone de montagne, les conditions souvent difficiles d'exploitation doivent être particulièrement étudiées. C'est d'ailleurs un des éléments forts du choix d'intervention du guide de sylviculture Massif Central actuellement en cours de validité et du nouveau guide Alpes du nord avec la présence (ou non) de risques naturels.

Mais le réflexe « diagnostic » doit aussi être étendu aux interventions en travaux. Les ITTS du Sud-Ouest

et du Massif Central préconisent le dépressage sous certaines conditions de densité initiale de tiges. Avec une conduite de régénération naturelle qui n'aboutit plus à des peuplements purs et extrêmement denses (on ne recherche plus la « salade » ou la « brosse » de semis, même si elle est parfois inévitable dans certaines stations du Massif Central), cela devrait conduire à une diminution sensible du nombre de dépressages qui seront effectués dans les années à venir. Ce qui n'exclut pas la réalisation de nettoie-ments, indispensable à la conservation du mélange des essences, utile d'un point de vue sanitaire, paysager, commercial et d'adaptation au changement climatique.

Les interventions ciblées au profit d'un nombre limité de tiges (tiges d'avenir ou tiges objectif pour celles qui constitueront le peuplement final) ont fait leur apparition dans les guides actuels et devraient se multiplier à l'avenir, sans toutefois devenir l'unique possibilité. L'heure est la multiplicité des solutions, les contextes sont tellement variés, l'itinéraire idéal n'existe certainement pas. Et la diversité des sylvicultures favorise la biodiversité de nos hêtraies.

Thierry SARDIN

ONF, direction technique
département forêts

Ariane ANGELIER

ONF, DT Auvergne-Limousin

Xavier GAUQUELIN

ONF, DT Rhône-Alpes

Benoît JACQUEMIN

ONF, DT Auvergne-Limousin

Jean-Marc COURDIER

ONF, DT Méditerranée

La place du hêtre en région méditerranéenne

Cet article complète le précédent en zoomant sur la hêtraie méditerranéenne. Dans le bas-pays méditerranéen, trois hêtraies reliques ont une valeur patrimoniale, écologique, historique et culturelle qui en justifie la conservation (d'autant qu'elles pourraient correspondre à l'influence génétique des « zones refuges secondaires » de la dernière glaciation, dont parlent Brigitte Musch *et al.* dans ce volume). Dans l'arrière-pays montagneux, le hêtre colonise les pinèdes naturelles de pin sylvestre, qui ont reconquis les espaces autrefois pâturés, ou les plantations RTM de pins noirs. Pour l'auteur, le changement climatique ne bloquera pas cette expansion mais la déplacera en altitude. Un guide de sylviculture est à l'étude pour proposer des itinéraires de gestion au forestier.

Hêtre et région méditerranéenne sont au premier abord peu compatibles puisque le hêtre est une essence médioeuropéenne exigeante en humidité atmosphérique et que le climat méditerranéen est caractérisé par l'irrégularité de ses précipitations et par sa sécheresse estivale. Pourtant, le hêtre a bien sa place en région méditerranéenne, une place certes bien délimitée mais potentiellement importante (dans la mesure on l'on ne s'arrête pas à une acception trop restrictive de la région méditerranéenne).

Importance et répartition des hêtraies en région méditerranéenne

Les essences principales en région méditerranéenne française sont d'abord des résineux : pin d'Alep et surtout pin sylvestre. Du côté des feuillus, les chênes vert et pubescent dominant nettement et le hêtre occupe des surfaces relativement restreintes. Le tableau 1 donne la répartition des hêtraies pour les départements concernés. Dans les Alpes-Maritimes, on peut

noter une rareté des hêtraies, dont les causes restent mal déterminées. La coïncidence entre limite du hêtre et limite départementale sur certains versants plaide pour une raison anthropique, mais des facteurs d'ordre chorologique¹ ne sont pas exclus.

Les hêtraies se situent surtout en moyenne montagne. Elles sont de plus presque cantonnées dans l'étage montagnard d'ubac, ce qui constitue une différence par rapport aux régions plus tempérées où le hêtre est très présent dans l'étage collinéen (Thiébaud, 1982).

L'examen même rapide de la carte correspondante amène à distinguer deux groupes de régions :

■ D'une part, les régions soumises à un climat typiquement méditerranéen, chaud avec au moins un mois sec (selon Gaussen, c'est-à-dire avec Pluviométrie (en mm) < 2 x Température moyenne (en °C)) en été : plaine du Roussillon, bas Languedoc, basse Provence et Côte d'Azur. Il s'agit de l'aire de l'olivier et du chêne vert. Le hêtre y est anecdotique ; on peut citer les peuplements de Valbonne (dans le Gard – quelques hectares), de la Sainte-Baume (dans

le Var – 100 ha de hêtre dont 60 ha de hêtraie pure) et celui très localisé de Saint-Pons (dans les Bouches-du-Rhône – moins d'un ha).

■ D'autre part, les régions encore soumises à une influence méditerranéenne marquée, mais en transition avec des climats de type atlantique ou continental. Le hêtre est beaucoup plus fréquent dans ces régions périphériques où les précipitations sont plus abondantes et la chaleur moins constante que dans le bas

département	surface (ha)
66 – Pyrénées orientales (partie)	7 800
11 – Aude (partie)	8 000
34 – Hérault	7 900
30 – Gard	5 900
48 – Lozère (partie)	9 200
07 – Ardèche (partie)	7 800
26 – Drôme (partie)	14 400
84 – Vaucluse	1 300
13 – Bouches-du-Rhône	1
83 – Var	1 200
04 – Alpes-de-Haute-Provence	22 000
05 – Hautes-Alpes (partie)	11 400
06 – Alpes-Maritimes	1 000
Total	97 900

Tab. 1 : surfaces de hêtraie par département en région méditerranéenne (données IFN de 1991 à 2002, selon le département)

¹ la chorologie est l'étude de la répartition géographique des espèces et de son déterminisme

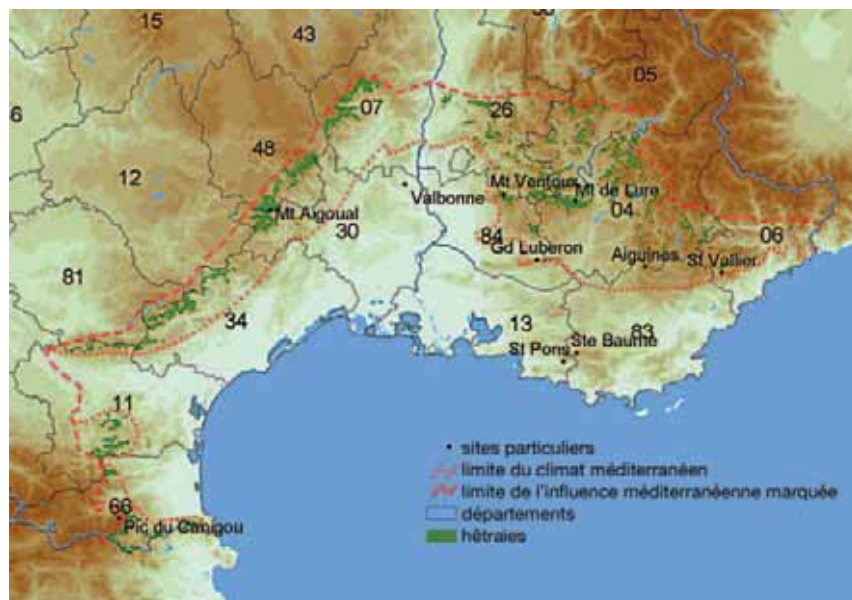


Fig. 1 : carte des hêtraies méditerranéennes

Languedoc ou la basse Provence. Sa répartition montre trois ensembles correspondant aux façades méditerranéennes des massifs montagneux : la terminaison orientale des Pyrénées (des Albères aux Corbières occidentales), la bordure du Massif Central (de la Montagne noire aux Cévennes) et la haute Provence (du Diois aux Préalpes de Grasse). Les peuplements du Grand Luberon (Vaucluse), d'Aiguines (Var) et de Saint-Vallier (Alpes-Maritimes) marquent la limite méridionale de cette zone haute-provençale.

Les hêtraies du bas pays méditerranéen

Situation écologique : des conditions très particulières

La localisation de ces hêtraies isolées en basse Provence et bas Languedoc se caractérise par de très fortes compensations locales climatique et édaphique qui tempèrent le contexte méditerranéen. La forêt de la Sainte-Baume bénéficie de précipitations très supérieures à celles des environs : 950 mm au pied du versant contre 670 mm à Aubagne. Elle se trouve suffisamment à l'écart du couloir rhodanien pour échapper aux effets les plus violents de ce vent froid et très sec

qu'est le mistral. Sa situation sur un ubac dominé par une falaise la protège largement du rayonnement direct ; cet écran limite les écarts thermiques et l'évaporation. En outre, le versant est nappé de colluvions épaisses et d'éboulis calcaires engendrés par la corniche surplombante, qui garantissent une réserve utile importante. En plus de ces substrats favorables, des suintements maintiennent au moins localement une humidité édaphique permanente.

Les sites de Valbonne et de Saint-Pons se caractérisent également par des conditions écologiques très particulières, bien que les précipitations ne soient sans doute pas aussi généreuses qu'à la Sainte-Baume (plus de 800 mm à Valbonne, mais on manque de données précises). Ces hêtraies sont situées en fond de ravin, ce qui les abrite à la fois du mistral et du rayonnement, et contribue au maintien de l'humidité atmosphérique. Le cas de Saint-Pons est à cet égard significatif puisque les hêtres sont cantonnés à proximité d'une cascade de type vauclusien qui assure une brumisation intermittente de l'atmosphère. Enfin, les substrats ont une réserve utile importante. À Valbonne, il s'agit

de sols calcaro-siliceux épais sur grès albiens. L'avantage des grès est que la roche peu altérée constitue un plancher imperméable, contrairement aux calcaires dont le réseau de fractures laisse l'eau s'échapper en profondeur. L'eau reste donc disponible et accessible aux systèmes racinaires. À Saint-Pons, on trouve des placages d'alluvions et des tufs alimentés par une source permanente.

Ces éléments confirment que toutes les composantes du bilan hydrique sont déterminantes pour permettre la croissance du hêtre en climat méditerranéen.

Dynamique et extension potentielle : ces hêtraies ne peuvent rester que très marginales

Dans ce contexte franchement méditerranéen, le hêtre est en concurrence avec le chêne pubescent. Celui-ci occupe généralement les stations fraîches, laissant les stations sèches au chêne vert et au pin d'Alep. Quand le biotope lui convient, le hêtre peut progresser sous le couvert du chêne. Ce processus est visible sur l'ubac de la Sainte-Baume, où la hêtraie est prolongée par une zone intermédiaire de chênaie-hêtraie. La situation est toute différente à Saint-Pons. En effet, les semis qui s'implantent à quelque distance de la hêtraie constituée rencontrent rapidement des conditions défavorables à leur développement. La marge de progression du hêtre y est donc très réduite (Ripert *et al.*, 1997).

Il existe sans doute, en Provence et en Languedoc, d'autres sites analogues présentant des conditions écologiques compatibles avec les exigences du hêtre tels que l'ubac du Mont-Aurélien, près d'Aix-en-Provence. En toute hypothèse, ces stations favorables représentent des surfaces extrêmement réduites et très éclatées. Si la présence ancienne d'une hêtraie y est plausible, une installation spontanée dans les conditions actuelles, à grande distance des noyaux existants, est impossible.

Des hêtraies atypiques d'origine incertaine

La situation atypique et marginale de ces hêtraies suscite depuis longtemps des discussions scientifiques quant à leur origine, d'autant plus qu'elles font chacune partie d'un domaine ecclésiastique (chartreuse à Valbonne, abbaye cistercienne à Saint-Pons, hôtellerie dominicaine à la Sainte-Baume). Forêts reliques de la période glaciaire ou plantations anciennement réalisées par les moines : la question n'est, semble-t-il, pas tranchée. Au moins peut-on être sûr que les religieux ont contribué à la préservation de ces formations.



FD de la Sainte-Baume : vue d'ensemble au printemps

D. Guicheteau, ONF

Malgré une maturation et une extension constatée localement, la hêtraie ne peut donc que rester très marginale en basse Provence et en bas Languedoc. On doit plutôt craindre une réduction des surfaces et une disparition des peuplements les plus méditerranéens du fait du réchauffement climatique. Des sécheresses estivales plus longues – scénario généralement envisagé – sont en effet de nature à rompre le fragile équilibre hydrique dont ils bénéficient.

Gestion

Ces forêts sont emblématiques tant pour les populations locales et les touristes que pour les scientifiques. Ce sont d'abord des lieux de visite et de promenade très fréquentés. Les visiteurs y apprécient la hêtraie elle-même, qui tranche avec les

autres espaces naturels de la région comme l'ensemble du site qui l'abrite. La Sainte-Baume est, depuis l'antiquité, un lieu de pèlerinage. La tradition orale provençale rapporte que Marie-Madeleine, chassée de Palestine, y passa la fin de sa vie. Pour les visiteurs qui gravissent le versant jusqu'à la grotte à l'ombre de cette forêt pluri-centenaire, la hêtraie de la Sainte-Baume revêt elle-même un caractère sacré et immuable. Les domaines de Valbonne et de Saint-Pons n'ont pas une valeur symbolique aussi forte, mais la fréquentation y est aussi très importante.

Les forestiers ont compris très tôt l'intérêt patrimonial de ces forêts. La hêtraie de la Sainte-Baume a heureusement traversé sans dégâts la période révolutionnaire. Par contre, celle de Valbonne a été surexploitée

et l'administration des Eaux et Forêts a hérité d'une forêt très dégradée qu'elle s'est attachée à restaurer et à protéger. Ces deux forêts domaniales ont donc bénéficié durant deux siècles d'une gestion conservatrice. Cela s'est traduit par une maturation des écosystèmes qui n'a fait que renforcer leur intérêt écologique. Les hêtraies méridionales à houx et à if (habitats d'intérêt communautaire rattachés à l'*Illici-Quercetum pubescentis*), susceptibles en outre d'abriter des insectes rares, ont justifié la création de ZNIEFF et de sites Natura 2000. Le domaine de Saint-Pons est quant à lui une forêt départementale qui fait partie de la ZNIEFF du massif de la Sainte-Baume.

On comprend que la production de bois n'est plus, depuis longtemps, une préoccupation et que les objectifs sont l'accueil du public et la préservation des écosystèmes. Cela n'a été possible jusqu'à présent qu'en retardant le renouvellement de la hêtraie, qui est maintenant le principal problème à résoudre. La régénération naturelle du hêtre ne présente pas de difficulté technique : l'ouverture de petites trouées, avec un crochelage pour limiter la concurrence herbacée, si nécessaire, permet l'installation des semis de hêtre et de feuillus divers. Des essais concluants ont été réalisés à la Sainte-Baume il y a quelques années. Mais l'abatage d'arbres et les dégâts et travaux associés, même sur des surfaces réduites, se heurtent à une forte opposition du public, des associations d'écologistes et de certains scientifiques. L'application d'un aménagement forestier dans ce contexte contraignant est donc extrêmement délicate.

Les hêtraies de l'arrière-pays méditerranéen

Notre propos concerne surtout la haute Provence. La situation est quelque peu différente en Languedoc-Roussillon, avec un climat humide aux brouillards fréquents qui s'avère moins limitant

pour le hêtre, et une gestion inspirée de celle du Massif Central ou des Pyrénées qui est maintenant éprouvée.

Situation écologique : répartition centrée sur le bioclimat montagnard d'ubac

Considérons d'abord le cas général représenté par les hêtraies montagnardes d'ubac. Dans les Alpes du Sud, ce sont souvent des hêtraies sèches à céphalanthères, à androsace de Chaix ou à buis, situées dans le montagnard inférieur (entre 950 et 1250 mètres d'altitude). Les faciès plus mésophiles se trouvent soit dans des situations topo-édaphiques favorables, soit plus haut dans le montagnard moyen (entre 1250 et 1600 mètres d'altitude). Le hêtre ne « monte » que timidement dans l'étage montagnard supérieur, où il semble moins adapté que le sapin pectiné, contrairement à ce que l'on observe dans le Nord-Est de la France. Peu sensible au type de sol tant qu'il n'est pas superficiel ou très acide, le hêtre se trouve aussi bien sur les substrats calcaires (dominants à l'est du Rhône) que siliceux (dominants à l'ouest du Rhône). Il est moins gêné que d'autres essences par les sols caillouteux, s'ils sont prospectables, et tire en particulier mieux parti des éboulis que le pin sylvestre.

Le hêtre « descend » localement en ubac dans l'étage supraméditerranéen supérieur (entre 750 et 950 mètres d'altitude) lorsque la topographie favorable et l'épaisseur du sol garantissent un bilan hydrique convenable. Il constitue alors des hêtraies thermophiles dont la flore mêle quelques espèces montagnardes aux espèces supraméditerranéennes compagnes du chêne pubescent.

En adret, il existe quelques hêtraies constituées, dans l'étage montagnard inférieur et moyen, notamment sur la montagne de Lure et le mont Ventoux. On note que ces formations se développent plutôt sur pente faible et sur sol acide issu de calcaire siliceux. La faible pente a

un effet positif sur le bilan hydrique et les substrats non calcaires semblent constituer un facteur facilitant pour le hêtre dans cette situation. Ces conditions n'existent pas ailleurs en haute Provence et, de fait, on ne trouve pas d'autre hêtraie d'adret dans cette région. Cependant il ne faut pas en conclure trop rapidement que le hêtre n'a pas sa place en adret franc. La présence de vieux individus sur l'adret dégradé du Chiran (en exposition ouest-sud-ouest et à une altitude d'environ 1500 mètres) comme en forêt communale de Barles (en exposition sud à 1300 mètres d'altitude) et de cépées plus jeunes isolées sur d'autres adrets préalpins semble indiquer plutôt une fragilité de la hêtraie d'adret face aux actions de l'homme qu'une réelle inadaptation.

Il ressort de ce rapide état des lieux que la répartition écologique du hêtre dans l'arrière-pays méditerranéen est centrée sur le bioclimat montagnard inférieur ou moyen d'ubac qui correspond à ses exigences thermiques et hydriques. Il n'est limité dans ce compartiment que sur les stations les plus sèches. Sa très faible représentation dans le montagnard supérieur est peut-être liée au fait qu'on y trouve surtout des milieux ouverts dévolus au pâturage, du moins dans les Préalpes. En revanche, sa présence en climat plus chaud (supraméditerranéen) ou plus contrasté (adret) n'est possible que si les conditions stationnelles sont suffisamment favorables pour garantir une bonne alimentation en eau et après une longue maturation de l'écosystème sans perturbation majeure.

Dynamique et extension potentielle : en progression aux dépens des pins

Si le hêtre occupe des surfaces assez réduites, il montre une dynamique progressive qui doit être prise en compte.

L'essence principale dans les Alpes du Sud est le pin sylvestre. Celui-ci a profité des grandes étendues

autrefois pâturées et peu à peu libérées par l'exode rural pour s'installer. Parallèlement, le pin noir d'Autriche a été planté à grande échelle dans le cadre de la restauration des terrains en montagne (RTM). La majorité des forêts est donc actuellement constituée de faciès transitoires, en évolution plus ou moins rapide.

Le chêne pubescent, qui a toujours occupé une surface importante, progresse dans l'étage supraméditerranéen, mais la concurrence qu'il exerce n'est pas très vive car il s'agit d'un post-pionnier souvent incapable de supplanter rapidement les pins.

Il en va tout autrement face au hêtre, qui a un tempérament de dryade. Le couvert des pins constitue une ambiance favorable à son installation. Les semis de pin n'ont alors plus assez de lumière pour se développer et la substitution est enclenchée. On peut voir ce scénario en cours à proximité des hêtraies actuelles. La situation est bien sûr plus fréquente en climat montagnard inférieur ou moyen d'ubac, mais elle existe également en adret montagnard sur pente faible, comme sur le mont Ventoux (photo). Une campagne d'observation menée dans des pinaies de pin noir d'Autriche des Préalpes sèches a également révélé des indices d'évolution possible vers la hêtraie (présence de semis de hêtre ou de quelques espèces compagnes) dans les stations du supraméditerranéen supérieur (au-dessus de 750 mètres en ubac et de 1000 mètres en adret) présentant un bilan hydrique favorable.

Par ailleurs, le hêtre se comporte parfois en post-pionnier dans des situations où on ne l'attend pas, en s'installant sur des éboulis calcaires à peine stabilisés, en compagnie du nerprun des Alpes, ou en formant quelques cépées en adret franc parmi des chênes pubescents et érables peu vigoureux alors qu'il n'existe aucune hêtraie constituée dans des conditions similaires.



Pins envahis par une régénération de hêtre au mont Ventoux, versant sud

La dynamique du hêtre est donc nette dans l'étage montagnard d'ubac autour des peuplements existants. Par contre, son extension en aval, en amont et en adret est plus ou moins difficile et lente. Les incursions dans le supraméditerranéen d'ubac sont possibles à la faveur des stations fraîches, où le hêtre peut rapidement prendre la place des pins ou du chêne pubescent pour constituer une hêtraie thermophile. Sa progression dans le montagnard supérieur est sans doute plus lente surtout lorsqu'il se trouve en limite de végétation forestière. En adret, l'extension des hêtraies actuelles est nette sur pente faible sous les peuplements pionniers (voir en encadré l'étude menée par l'INRA et l'ONF sur le Mont-Ventoux), mais ne se fera que très progressivement sur les stations plus sèches.

Dans ce contexte de maturation forestière, la surface potentielle de la hêtraie en région méditerranéenne est très importante à long terme. Une étude réalisée récemment dans les Préalpes sèches (Ladier, 2004) permet de quantifier les surfaces en jeu. Le hêtre

couvre actuellement moins de 30 000 ha, alors que les compartiments montagnards inférieur et moyen d'ubac représentent plus de 90 000 ha boisés. Toutes ces surfaces ne sont pas favorables à son installation, mais si l'on tient compte de son extension possible en adret, dans le montagnard supérieur et dans le supraméditerranéen, on peut estimer que la surface du hêtre pourrait facilement tripler dans cette région, aux dépens du pin sylvestre surtout. Ainsi, le hêtre apparaît comme la principale essence potentielle des Préalpes sèches. Ce scénario est sans doute applicable à l'ensemble de la haute Provence. Cependant, il n'intègre pas la localisation précise des peuplements sources et, de ce fait, il ne donne qu'une idée de la dynamique potentielle et ne permet pas de prévoir son déroulement effectif sur le terrain.

Le changement climatique limitera cette dynamique expansionniste

Cette expansion globale de la hêtraie dans les conditions climatiques actuelles sera sans doute

contrariée par les changements climatiques en cours, tels qu'ils sont simulés à partir des modèles de prévision actuels, sur une échelle de temps similaire. Les schémas proposés prévoient globalement une « remontée » des étages de végétation et une accentuation du contraste saisonnier des précipitations. Si l'on se base sur une augmentation de la température moyenne de 2 °C d'ici à la fin du siècle, cela devrait se traduire logiquement par une régression des hêtraies supraméditerranéennes et par une fragilisation des hêtraies du montagnard inférieur d'ubac et des hêtraies d'adret. La moitié des surfaces actuelles de hêtre est concernée. Il est probable que cette régression des hêtraies thermophiles et xérophiles ne soit que partiellement compensée par une extension en altitude ; il ne s'agira probablement pas d'un simple décalage altitudinal !

En définitive, il est clair que l'évolution du climat limitera la dynamique expansionniste des hêtraies de l'arrière-pays méditerranéen. Mais on ne doit pas craindre en région méditerranéenne une régression aussi importante que cela est présenté dans d'autres régions de France du fait de la sous-représentativité actuelle du hêtre par rapport à son potentiel d'extension et de la localisation en montagne des peuplements. Il faut plutôt s'attendre à un changement de répartition avec un recul des hêtraies de basse altitude et un développement des hêtraies de moyenne altitude, sans que l'on puisse affirmer aujourd'hui si le bilan en surface sera positif ou négatif.

Gestion

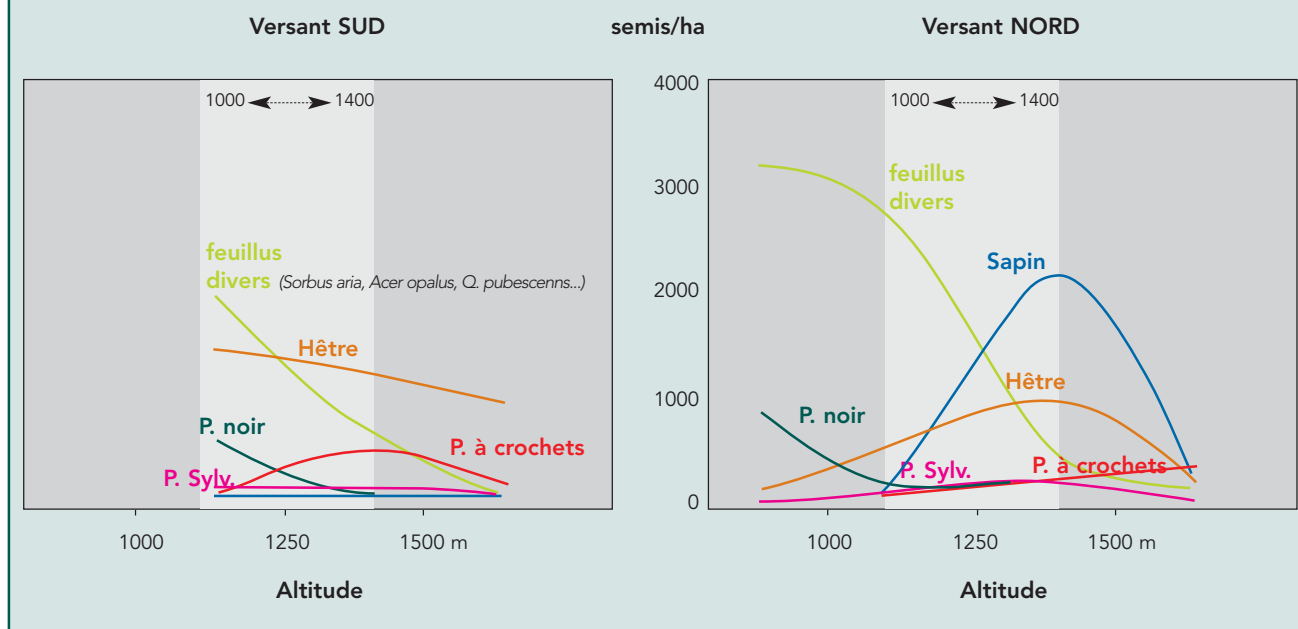
Comme le chêne pubescent, le hêtre occupe le plus souvent en haute Provence des parcelles depuis longtemps mises en défens et gérées traditionnellement en taillis pour la production de bois de chauffage. Les règlements d'ex-

Composition de la régénération dans les pineraies de l'étage montagnard du Mont-Ventoux

Une étude de la **maturation sylvigénétique** des pineraies de l'étage montagnard du Mont-Ventoux a été menée de 1998 à 2001 par l'INRA (Unité de recherches forestières méditerranéennes, Avignon) et l'ONF (STIR Méditerranée, service départemental du Vaucluse, cellule d'appui technique de Manosque) dans le cadre d'un projet cofinancé par le GIP-ECOFOR (Dreyfus *et al.*, 2001). Un **état des lieux de la dynamique de régénération** a notamment été établi dans des peuplements de pin noir, pin sylvestre, pin à crochets, en adret et en ubac, à partir d'observations sur un ensemble de 214 placettes de 4 ares ou plus.

Dans ces peuplements plus ou moins fermés, on constate que la régénération du **hêtre**, mélangée en versant nord avec celle du sapin pectiné, est **nettement plus abondante que celle des pins** (de tempérament plutôt pionnier). Ceci démontre la puissance du phénomène de recolonisation par ces essences tolérantes à l'ombre après qu'un sol et une ambiance forestière ont été reconstitués grâce aux boisements de pins (plantations RTM ou accrus déjà anciens).

On note également une forte abondance de divers feuillus disséminés, comme l'alisier blanc (*Sorbus aria* (L.) Crantz), l'érable à feuille d'obier (*Acer opalus* Miller), voire, au montagnard inférieur, le chêne pubescent (*Quercus pubescens* Willd.). Ces espèces ont cependant des dimensions moyennes inférieures à celles du hêtre, dès le stade de la régénération.



exploitation appliqués jusqu'à la fin de la seconde guerre mondiale montrent des rotations courtes : souvent 15 ans seulement. Autant dire qu'on en tirait essentiellement de la charbonnette.

Depuis 1945, par contre, la demande décroît et le taillis de hêtre se vend de moins en moins bien. Cela se concrétise à trois niveaux. Il y a eu tout d'abord un allongement des rotations, puis une baisse des prix. Actuellement, seules les coupes accessibles et facilement exploitables trouvent preneur. Finalement, même après l'effort important consenti pour la desserte des massifs dans les années 1980, on ne peut plus espé-

rer commercialiser qu'une partie des taillis. Face à cette évolution, les aménagistes ont proposé dans certains cas une transformation, en sapin pectiné notamment. Mais le suivi coûteux des plantations est difficile à justifier quand les revenus continuent à diminuer.

Les forestiers tentent donc de mieux valoriser les hêtraies qui peuvent l'être. Le balivage est tenté dans quelques belles parcelles, à titre « expérimental » faute de références précises. Les peuplements semblent bien réagir et les semis semblent assez nombreux pour envisager une conversion. Cependant, l'intérêt technique et économique de la

conversion pose question. En effet, les quelques futaies sur souche actuelles, qui ont sans doute été conduites trop serrées, donnent un bois réputé nerveux qui n'est vendu, comme le taillis, qu'en bois de chauffage. Le sylviculteur n'est donc pas sûr de pouvoir produire du bois de qualité. En outre, la filière bois régionale n'est pas à même actuellement de valoriser du bois d'œuvre feuillu. Sans retournement du marché du bois, l'évolution vers une gestion extensive de la majorité des surfaces semble inévitable, le gestionnaire concentrant les interventions coûteuses sur les parcelles qui « valent le coup ».



Taillis après balivage en forêt domaniale des Duyes (04)

Face à ces incertitudes, il est impérieux d'apporter de nouvelles réponses techniques. L'ébauche d'un guide de sylviculture pour les hêtraies des Préalpes, proposée récemment (Delord, 2005), en est une. Plusieurs itinéraires sylvicoles sont proposés en fonction de la structure initiale du peuplement, de l'importance de l'enjeu de protection, et de la fertilité : maintien du taillis, conversion du taillis en TSF, conversion directe ou progressive en futaie régulière, etc. Des clés de décision simples orientent l'utilisateur vers le choix le plus adapté. Enfin, est proposée l'implantation de placettes de suivi, pour évaluer les limites d'application de ces itinéraires (capacité du taillis âgé à rejeter, régénération en versant sud...) et tester les intensités d'interventions lors du balivage et des éclaircies. Cette base cohérente est adaptée au besoin actuel des gestionnaires. Elle permettra d'acquérir le recul nécessaire et d'affiner ensuite les modèles de sylviculture.

Conclusion

S'il est marginal sur le pourtour méditerranéen, le hêtre montre, dans l'arrière-pays, une dynamique

d'extension qui ne sera probablement pas totalement remise en cause par les effets du changement climatique. Dans ces régions où l'on s'intéressait surtout aux conifères sapin pectiné, mélèze, pin noir d'Autriche et cèdre de l'Atlas, il devient maintenant une véritable essence objectif. Cependant, on manque de recul sur les traitements autres que le taillis simple, du moins en haute Provence. L'élaboration d'un premier guide pour la sylviculture du hêtre dans les Préalpes du Sud est une étape vers une véritable gestion de ces hêtraies sous influence méditerranéenne.

Jean LADIER

chargé de développement technique
ONF, DT Méditerranée

Philippe DREYFUS

Unité de recherches forestières
méditerranéennes
INRA Avignon

Daniel REBOUL

responsable cellule biodiversité
ONF, agence Alpes-de-Haute-Provence

Bibliographie

DELORD P., 2005. Le Hêtre dans les Préalpes du Sud : bilan de la situation actuelle et première ébauche d'une sylviculture adaptée. Mémoire de fin d'étude FIF. Nancy : ENGREF. 135 p.

DREYFUS P., BOURDENET P., LADIER J., GACHET S., COURDIER J.M., PORTÉ A., 2001. Gestion d'une évolution forestière majeure de l'arrière pays méditerranéen : la maturation sylvigénétique des pinèdes pionnières. Conséquences pour la biodiversité sur le site pilote du Mont Ventoux. Rapport final des conventions 1998 2001 entre le GIP ECOFOR (programme « Biodiversité et Gestion Forestière », l'INRA, l'ONF, l'IMEP. 150 p + annexes

LADIER J., 2004 – Les stations forestières des Préalpes sèches ; définition, répartition, dynamique, fertilité. ONF Méditerranée, Cellule Régionale d'Appui Technique. 124 p.

RIPERT C., GADIRIN., CHANDIOUX O., ESTEVE R., 1997. Parc départemental de St Pons Gémenos : études des potentialités du milieu naturel des zones à hêtre. Aix-en-Provence : Cemagref. 16 p. + annexes.

THIEBAUT B., 1982. Existe-t-il une hêtraie « méditerranéenne » distincte des autres forêts de hêtre en Europe occidentale ? *Vegetatio*, vol. 50, pp. 23-42

à suivre fin 2007

Hors-série n°3 : Forêts et milieux naturels face aux changements climatiques

Coordonné par Myriam Legay, chargée de recherche et développement, interface INRA / ONF
« changements climatiques ».

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



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
dtech-documentation@onf.fr

