

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

n° 27-28 - hiver - printemps 2010



p.18

Recherche sur les forêts mélangées

Exploitation forestière



p. 63

patrimoine
sylviculture
progrès

connaissances

économie

forêts et société
environnement

biodiversité

gestion durable

RenD ez - Vous techniques

Directeur de la publication

Bernard Gamblin

Rédactrice en chef

Christine Micheneau

Comité éditorial

Joseph Behaghel, Yves Birot, Jean-Marc Brézard,
Léo Castex, Jean-François Dhôte, Pierre-Edouard Guillain,
Laurence Lefebvre, Pierre Leroy, Alain Macaire,
Jérôme Piat, Florent Romagoux, Brigitte Pilard-Landeau,
Marianne Rubio, Thierry Sardin, Véronique Vinot

Maquette, impression et routage

Imprimerie ONF - Fontainebleau

Conception graphique

NAP (Nature Art Planète)

Crédit photographique

Page de couverture

En haut : H. Davi, INRA

En bas : D. Pishedda, ONF

Page d'ouverture du dossier

J.E. Begin, ONF ; H. Davi, INRA ; Y. Dumas, Cemagref

Périodicité

4 numéros ordinaires par an

(possibilité d'édition resserrée en numéros doubles)

Accès en ligne

<http://www.onf.fr/>

(rubrique Lire, voir, écouter/Publications ONF/ Périodiques)

Disponibilité au numéro, abonnement

Renseignements : ONF - cellule de documentation technique,
boulevard de Constance, 77300 Fontainebleau

Contact : dtcb-documentation@onf.fr

ou par fax : 01 64 22 49 73

Dépôt légal : mars 2010

sommaire

n° 27-28 - hiver - printemps 2010

3 connaissances

Comprendre et maîtriser le cœur rouge du hêtre
par Nicolas Gomez et Jérôme Bock

8 méthodes

La sylviculture du Mahogany à grandes feuilles dans les Antilles françaises
par Cécile Leroy et Jean-Baptiste Schneider

18 **dossier connaissances**

Recherche : des bases pour la gestion durable des forêts mélangées

63 pratiques

Évolution de l'exploitation forestière et actions de l'ONF
par Didier Pischedda

71 fiche technique

Fiche n° 2 - Sol - Diagnostiquer la sensibilité du sol au tassement
du plan d'action environnemental

éditorial

Nos Rendez-vous techniques pour l'année 2010 commencent avec un nouveau numéro double, difficultés conjoncturelles obligent. Dans un contexte encore tendu qui mobilise toutes les énergies, les exigences éditoriales d'une revue comme la nôtre sont particulièrement lourdes pour tous ceux qui y contribuent : je saisis donc ici l'occasion de remercier les auteurs et les relecteurs de les avoir supportées (et de les supporter encore) avec persévérance.

En ouverture, ce numéro propose une synthèse des connaissances actuelles sur le cœur rouge du hêtre, les facteurs de son apparition et conséquences pour la sylviculture. Clair et pratique, bien articulé avec les indications des guides de sylviculture en vigueur, cet article intéressera tous les gestionnaires de hêtraies... et les autres, ne serait-ce qu'à titre de culture technique forestière.

Le volume s'achève sur un autre sujet important pour l'ensemble des gestionnaires métropolitains : l'évolution de l'exploitation forestière, ses enjeux actuels et les actions engagées par l'ONF pour y faire face. Là encore, le propos n'est pas vraiment nouveau, mais il fait le point d'une situation qui, vu l'ampleur du « chantier », n'est pas toujours « connue ». La fiche technique n°2 du plan d'action environnemental de l'ONF fait opportunément écho à une partie de ce propos puisqu'elle traite du diagnostic de la sensibilité des sols au tassement.

Dans les DOM, les questions d'exploitation forestière sont sensiblement différentes. Les Rendez-vous techniques (automne 2005) en ont donné dans le n° 9 un aperçu pour la Guyane, sous le titre « Mieux valoriser la ressource en bois et réduire les impacts sur l'environnement », puis dans le n° 17 avec les actions pour promouvoir l'exploitation à faible impact. C'est ici le tour des Antilles françaises, à travers la sylviculture du mahogany à grandes feuilles : la fragilité des activités d'exploitation et première transformation est au cœur de réflexions sylvicoles qui ne peuvent aboutir que si elles s'intègrent dans une politique de développement insulaire volontariste et cohérente.

Quelques mots enfin de notre dossier central : sa tonalité est très « recherche » et aide à comprendre les mécanismes en jeu dans la dynamique des mélanges d'essences. Cela ne répond pas encore totalement aux besoins des forestiers qui, au quotidien, doivent gérer plusieurs types de mélanges : ceux des futaies irrégulières hétérogènes et ceux des futaies régulières, associations d'essences objectif principales (ex hêtraie-sapinière) ou mélanges cultureux dans lesquels les essences secondaires représentent 10 % à 25 % du mélange.

Le Directeur technique et commercial bois
Bernard GAMBLIN

Comprendre et maîtriser le cœur rouge du hêtre

Les forestiers sont unanimes pour reconnaître l'impact du cœur rouge sur la valeur économique d'une grume de Hêtre. Pourtant les causes d'apparition du cœur rouge sont souvent discutées. Est-ce un effet âge ou diamètre ? La station joue-t-elle un rôle ? Existe-t-il d'autres facteurs aggravants ? La présente analyse bibliographique permet de dégager nombreux points faisant consensus et de tirer des enseignements pour la gestion des hêtraies.

Le cœur rouge du hêtre, phénomène fréquent de coloration du bois, est à l'origine d'une décote importante à la vente des produits. Même si les propriétés mécaniques du hêtre ne sont pas altérées par le cœur rouge, la perte de valeur s'explique en partie par la modification de l'aspect esthétique et des propriétés chimiques : capacités d'imprégnation et de séchage.

En application de la norme européenne EN 1316-1, la présence à la découpe d'un cœur rouge sain dépassant 20 % du diamètre entraîne le déclassement en qualité C. L'altération de la grume par un cœur rouge « flammé » conduit à une dévalorisation en qualité D si son importance dépasse 10 % ! La perte financière peut être approchée, dans les conditions de marché

actuelles par référence aux contrats d'approvisionnement conclus par l'ONF en bois façonnés sur les régions Alsace et Lorraine (chiffres ONF 2008-2009, B. Cuillier com. pers.). Pour des grumes de classe 5 et + (diamètre milieu sur écorce ≥ 50 cm) le prix « bord de route forêt » passe de :

- 70 à 58 €/m³ pour un déclassement de (B)C blanc en (B)C rouge (cœur rouge sain) ;
- 70 à 43 €/m³ pour un déclassement de (B)C blanc en D (cœur rouge flammé).

D'un point de vue sylvicole, il est donc important pour le forestier de comprendre les mécanismes induisant la coloration du bois, d'apprécier l'importance de certains facteurs aggravants et d'en tirer les conséquences pour la sylviculture du hêtre.

Il existe différents types de cœur rouge

En fonction des causes d'apparition du cœur rouge, on distingue 4 principaux morphotypes (Kuncera et Walter et Kucera, 1991) :

- le cœur rouge normal-rond (sain) qui est le plus fréquent, la limite entre le cœur rouge et le bois normal apparaît arrondie (voir photo 1) ;
- le cœur étoilé (flammé) dont la limite est dentelée (voir photo 2) et dont l'origine, liée à la présence de champignon et de bactérie, semble complexe à appréhender (Werndörfer, 2007) ;
- le cœur anormal, dû à une activité bactérienne ;
- le cœur traumatique de faible extension est dû à des blessures ponctuelles (voir photo 3).

Cet article ne porte que sur le cœur rouge normal qui est le plus fréquent et le plus étudié.



A. Piboule, ONF

1 - cœur rouge normal



P. George, ONF

2 - cœur rouge étoilé (à droite) et cœur blanc (à gauche)



A. Piboule, ONF

3 - cœur rouge traumatique

La coloration est liée à un phénomène d'oxydation

La formation du cœur rouge est consécutive au retrait de l'eau de constitution du bois. Cette chute de l'humidité du bois, qui apparaît naturellement à l'intérieur du tronc des vieux arbres suite à un dysfonctionnement des vaisseaux conducteurs, permet à l'oxygène de l'air de pénétrer dans le bois par des branches sèches, des fourches ou de racines mortes (Werndörfer *et al.*, 2007). Il s'ensuit une formation de thylle (cellule pleine) et l'apparition de nécroses. La coloration brune n'apparaît qu'après la formation des thylls, elle est due à l'oxydation des tissus parenchymateux et des matériaux intracellulaires, dans le cas présent (cœur rouge normal). Il n'y a pas de pourriture possible. Pour plus de détails, voir l'article de Werndörfer *et al.* dans le hors-série n° 2 des Rendez-vous techniques (2007).

Quels facteurs expliquent l'apparition du cœur rouge ?

Même s'il n'est pas aisé d'apprécier l'influence des nombreux facteurs impliqués dans l'apparition du cœur rouge et si les débats entre chercheurs demeurent, les nombreuses études menées en France et à l'étranger conduisent à des résultats convergents qui doivent nous inciter à des évolutions sylvicoles.

L'âge et le diamètre : deux facteurs déterminants...

La plupart des études montrent que l'âge et le diamètre sont deux facteurs déterminants, liés forcément l'un à l'autre. Le diamètre, plus facile à apprécier par le forestier, est souvent mis en avant dans les études. Cependant, l'effet du diamètre à un âge fixé reste peu étudié, probablement du fait des difficultés à construire un plan d'échantillonnage adapté et des corrélations évidentes entre ces deux variables.

En général, pour les peuplements de moins de 100 ans, la proportion d'arbres à cœur rouge reste très limitée, sauf circonstances exceptionnelles comme le manque d'éclaircie, conduisant à des peuplements denses, à élagage tardif (voir plus loin les facteurs aggravants). La plupart des études montrent que le risque de cœur rouge, ainsi que sa proportion par rapport au diamètre de la tige, augmente fortement entre 120-150 ans et de manière très importante au-delà de 150 ans. L'étude de Knoke (2003), réalisée sur 392 hêtres issus de TSF et de futaie, montre qu'une tige de 60 cm de diamètre présente quasiment 100 % de risque de cœur rouge à 180 ans, alors que cette probabilité tombe à 34 %, pour un même diamètre obtenu à 120 ans et à 15 %, si ce diamètre est atteint à 100 ans.

Peu d'études abordent l'effet du diamètre à un âge donné, autrement dit l'accroissement. Ces études montrent en général que, dans une gamme d'âge raisonnable (80-130 ans), le risque de cœur rouge augmente avec le diamètre. Cependant, dans les peuplements très âgés, le diamètre n'a plus trop d'importance puisque les tiges (grosses ou petites) présentent un fort risque cœur rouge lié à l'âge. Ainsi pour un peuplement de 180 ans, la probabilité de cœur rouge est supérieure à 80 % quel que soit le diamètre, alors que pour un peuplement de 120 ans, cette probabilité croît fortement avec le diamètre de l'arbre (figure 1b). Néanmoins, il y a un consensus pour reconnaître qu'à diamètre égal, les hêtres les plus jeunes présentent une probabilité d'apparition du cœur rouge plus faible que les plus âgés (Werndörfer *et al.*, 2007) ou que les arbres à croissance rapide sont associés en général à une faible probabilité de cœur rouge (Knoke et Schulz Wenderoth, 2001).

Ce qui importe alors pour le forestier, lors des opérations sylvicoles, c'est de savoir appréhender

la probabilité de cœur rouge ou estimer le risque à laisser une rotation de plus un hêtre en fonction de ses caractéristiques visibles (figure 1).

Il existe des facteurs aggravants !

Les hêtres avec défauts (chicots, branches pourries, baionnettes, gélivures, sécheresse de cime ou blessures d'exploitation...) présentent une proportion de cœur rouge 3 fois plus importante que des troncs extérieurement en parfait état car ces défauts favorisent la pénétration de l'air (Krempf et Mark, 1962). Le risque d'apparition de cœur rouge dépend également des dimensions des branches mortes/nœuds : diamètre, profondeur et inclinaison (Werndörfer *et al.*, 2007). Il faut donc éviter la remontée de l'élagage naturel sur de grosses branches (diam > 6 cm dans l'étude de Knoke, 2003), souvent consécutive à la diminution de l'intensité des éclaircies avec l'âge ou à la remontée du taillis (risque élevé en conversion de taillis-sous-futaie en futaie). Autre facteur, souvent cité comme le plus défavorable, la présence d'une fourche en fin de bille de pied (sous le houppier), peut multiplier par 4 le risque de cœur rouge (figure 1a ; photos 4 et 5 p. 6 et 7). Néanmoins, dans les peuplements très âgés, la présence de fourche, tout comme le diamètre, n'a pratiquement plus d'effet.

Inversement, l'absence totale de ces facteurs aggravants expliquerait l'existence de vieux peuplements avec une faible proportion de cœur rouge. Ainsi, des tiges n'ayant pas eu notamment d'élagage tardif de grosses branches et qui présenteraient des branches basses charpentières vertes à la base du houppier seraient, pour certains auteurs, moins sujettes au problème du cœur rouge. Ces charpentières basses limiteraient le risque de diffusion d'air et donc la progression du cœur rouge (Wilhelm et Gross, communications personnelles – tournée Campus ONF de 2007). Cette hypothèse expliquerait qu'on peut trou-

ver des arbres âgés avec une faible proportion de cœur rouge dans les ex TSF clairs en futaie.

Le type de station semble aussi avoir une influence, mais les observations faites sur le sujet sont parfois contradictoires. Il semblerait néanmoins que le risque d'apparition du cœur rouge est plus important sur les stations à forte fertilité. Plusieurs explications sont généralement avancées sur ces stations fertiles : des sols plus sensibles aux tassements, induisant des blessures aux racines plus fréquentes, des hauteurs plus importantes impliquant des branches mortes plus nombreuses et donc plus de possibilités pour l'oxygène de rentrer.

Les conséquences pour le sylviculteur...

Au vu du pourcentage de grumes récolté en qualité A (0,6 %), le sylviculteur dispose d'une forte marge pour augmenter la proportion de bois blanc, de bonne qualité dans ses peuplements. À la lumière des derniers résultats scientifiques, une action forte consiste à réduire le pourcentage d'arbres atteints par le cœur rouge en observant ces quelques conseils sylvicoles suivants.

L'idée directrice se base sur une sylviculture dynamique, ciblée en priorité sur des tiges vigoureuses, afin de produire, le plus rapidement possible, des gros bois ou très gros bois de hêtre.

En phase de qualification, il convient de favoriser la différenciation et l'élagage naturel de tiges vigoureuses, en pratiquant les interventions 'justes' nécessaires, afin que cette phase soit la plus courte possible (35-40 ans maximum pour le hêtre, soit 14-16 m de hauteur dominante).

Les dépressages, lorsqu'ils sont utiles (peuplements très denses et homogènes – voire les seuils dans les guides de sylviculture en vi-

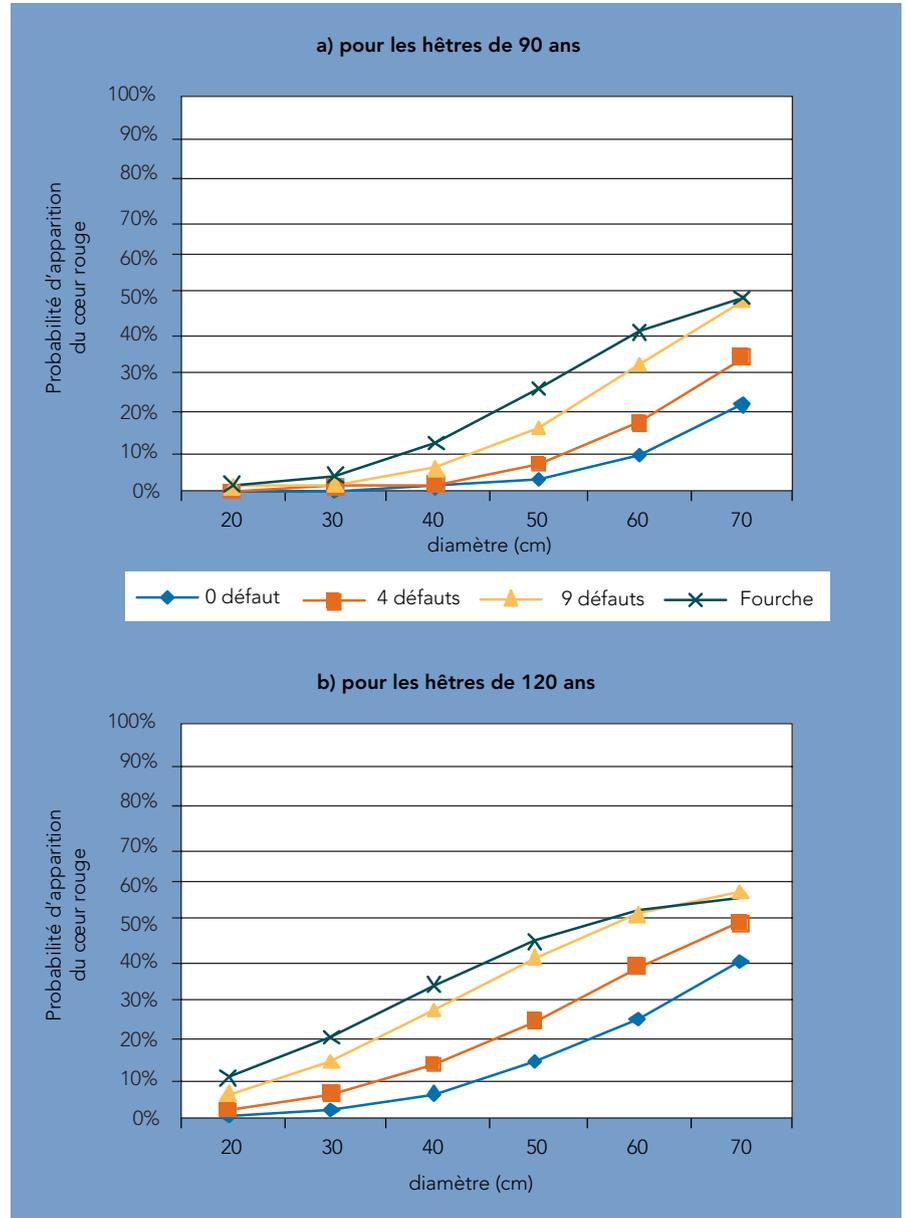


Fig. 1 : risque de cœur rouge associé à la conservation d'un hêtre pour une rotation supplémentaire de 10 ans (source : Knoke, 2003)

Illustration de l'effet de l'âge de l'arbre, du diamètre individuel et de la présence de défauts visibles tels que les grosses branches mortes ($\varnothing > 6$ cm) ou blessures de plus de 9 cm. Échantillon de 393 arbres récolté sur 13 peuplements (TSF et futaies).

gueur), doivent être suivis d'une phase de compression suffisamment longue afin de pallier le ralentissement temporaire de l'élagage naturel et d'une éventuelle augmentation des phénomènes de fourchaison.

En début de croissance active, la désignation est l'action cruciale du forestier pour façonner un peuplement de qualité. La présence de

fourche dans les 8 premiers mètres de bille doit être considérée comme un défaut rédhibitoire. Au-delà de 8 m, la présence d'une fourche est un risque significatif (d'autant que s'y ajoute un risque d'éclatement de la bille à l'abatage), mais qui peut être toléré à défaut de mieux. Deux facteurs sont alors à intégrer : la présence de branches vertes charpentières en dessous du niveau de la



A. Piboule, ONF

4 - la fouche en fin de bille de pied est souvent associée à la présence de cœur rouge

exigé lors des exploitations pour éviter des dommages trop importants : blessures sur les racines ou dégâts sur les tiges qui sont des portes d'entrée pour ce phénomène d'oxydation.

Enfin, même si cela relève plutôt d'un marché de niche, on peut remarquer qu'avec un effort important de marketing et grâce aux nouvelles techniques d'étuvage et de séchage, des bois de hêtre rouge peuvent parfaitement être valorisés par certains transformateurs. En effet, au-delà des problèmes d'aspect ou d'imprégnation, les qualités technologiques restent identiques à celles des hêtres blancs.

fourche ou la forme en U de la fourche (qui lui évite de trop « travailler »). La présence de blessure ou de grosses branches basses susceptibles de mourir précocement constitue également un défaut réhibitoire.

Bien entendu, la mise en œuvre d'éclaircies dynamiques, appliquées dès la sortie de la phase de qualification, entre 14 et 16 m de hauteur dominante selon la fertilité et le contexte biogéographique (cf. les préconisations des guides en vigueur), constitue l'assurance d'une récolte de bois en moins de 100 ans ; ce qui correspond à des niveaux de risque de cœur rouge généralement faibles.

En phase de maturation des peuplements régularisés, la maîtrise du capital sur pied autour de 16 à 19 m²/ha après coupe permet un climat lumineux suffisant pour préserver la vigueur des grosses branches basses des houppiers de hêtre.

En futaie irrégulière, l'objectif est de tendre vers un capital autour

de 13-18 m²/ha (après/avant coupe à l'échelle de la forêt ; selon l'objectif recherché localement).

Dans tous les cas (en futaie régulière ou futaie irrégulière), il convient de maîtriser les non-précomptables (taillis essentiellement) autour de 2-3 m²/ha et éviter qu'ils ne remontent dans les houppiers et provoque ainsi la mort tardive de ces branches charpentières. La récolte doit intervenir dès que le peuplement (la tige en irrégulier) a atteint son diamètre d'exploitabilité ou que sa qualité est menacée, et d'autant plus strictement que le peuplement (l'arbre) est vieux et a connu des phases ayant induit des facteurs aggravants : présence de branches basses mortes ou dépérissantes, de fourches en fin de bille, de blessures, de nœuds ouverts. En revanche, la croissance d'une tige de qualité peut se poursuivre si elle est exempte de tels défauts, et surtout si elle n'a pas atteint l'optimum économique. Par ailleurs, un respect absolu des cloisonnements et de leur praticabilité est

Nicolas GOMEZ
assistant de R & D
ONF - DT Lorraine
nicolas.gomez@onf.fr

Jérôme BOCK
chargé de R & D
ONF - DT Lorraine
jerome.bock@onf.fr

Bibliographie

BECKER D., FREIST H., OLLGAARD M., 1989. Zielstärkennutzung und Buchenrotkern. Forst und Holz, vol 44, n°1, pp. 12-14

BECKER G., SEELING U., WERNSDÖRFER H., 2005. Relation entre la sylviculture et la qualité du bois de hêtre : l'expérience allemande. RFF vol. 57 n° 2, pp. 227-238

KELLER H., 1961. Vom rotkern der Buche. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen vol. 8, n° 8, pp. 499-502

KLÄDTKE J., 2002. Wachstum großkroniger Buchen und waldbauliche Konsequenzen. Berichte Freiburger Forstliche Forschung, vol.44, pp.19-31

KREMPL H., MARK E., 1962. Untersuchungen über den kern der rotbuche. Allgemeine Forstzeitung (Wien) vol. 73 pp.186-191

KNOKE T., 2003. Predicting red heartwood formation in beech trees. Ecological Modeling, vol.169, pp.295-312

KNOKE T., SCHULZ WENDEROTH W. S., 2001. An approach to predict probability and extent of red coloured heartwood in beech. Forstwissenschaftliches Centralblatt, vol.120, pp. 154-172

LANIER L., LE TACON F., 1981. Cœur rouge. In : TEISSIER DU CROS E., LE TACON F., NEPVEU G., PARDÉ J., PERRIN R., TIMBAL J. (éditeurs). Le Hêtre. Paris : Institut National de la Recherche Agronomique. pp. 505-507

MOREL, 2000. Etude en Haute-Marne et en Haute-Saône. Pour en savoir plus sur le cœur rouge du Hêtre. Dole : ONF. Rapport STIR Est

MAHLER G., HÖWECKE B., 1991. Verkernungserscheinungen bei der Buche in Baden-Württemberg in Abhängigkeit von Alter, Standort und Durchmesser. Schweiz. Z. Forstwes. vol. 142, pp. 375-390

PICHERY C., 2000. Cœur rouge du Hêtre : peut-on trouver des indicateurs externes de la coloration rouge du bois de hêtre ? Nancy : ENGREF. Mémoire de stage FIF, module MQGF

PILARD-LANDEAU B., PIAT J., LANDREAU P., 2000. Etude du cœur rouge en Picardie après chablis de décembre 1999. Compiègne : ONF. Bulletin d'information de la STIR Nord-Ouest
 RACZ J., SCHULZ H., et KNIGGE W., 1961, Untersuchungen über das Auftreten des Buchenkerns.- Forst und Holzwirt, vol. 16, n°19, 1961, pp.413-417

RERAT B., 2008. Prix des feuillus par qualité, Forêts de France n° 512



C. Robert, ONF

5 - La fourche, facteur aggravant du risque de cœur rouge... entre autres

RIDER A., 1998. Le cœur rouge du hêtre. Forêt entreprise n°124

SACHSSE H., 1991. Kerntypen der Rotbuche. Forstarchiv, vol.62, pp.238-242

SCHMIDT M, GADOW K.v., HÖFLE H, 2005. Vorkommen und Ausprägung von fakultativen kerntypen bei Rotbuche auf südniedersächsischen Kalk- und Rötstandorten. Allg. Forst und Jagdzeitung vol. 176 (11/12) pp. 200-211

VON BUREN S., 1998. Buchenrotkern, Verbreitung und wirtschaftliche Bedeutung. Schweiz. Z. Forstwes., vol. 149 pp. 955-970

VON BUREN S., 2002. Der Farbkern der Buche in der Schweiz nördlich der

Alpen. Schweiz. Z. Forstwes., Supplément n° 86, 137p.

WALTER M., KUCERA L., 1991. Vorkommen und Bedeutung verschiedener Kernformen bei der Buche. Schweiz. Z. Forstwes. vol. 142 pp.391-405

WERNSDÖRFER H., LE MOGUÉDEC G., CONSTANT T., MOTHE F., SEELING U., NEPVEU G., 2007. Le cœur rouge du hêtre est-il détectable sur pied, Rendez-vous techniques de l'ONF hors série n° 2 pp. 85-91

ZYCHA H., 1948. Über die Kernbildung und verwandte Vorgänge im Holz der Rotbuche. Forstwissenschaftliches Centralblatt n°67 pp. 80-109

La sylviculture du mahogany à grandes feuilles dans les Antilles françaises

Dans les Antilles françaises, la production de bois d'œuvre doit répondre à des enjeux que le contexte insulaire caraïbe rend particulièrement complexes. En outre, la Martinique et la Guadeloupe sont en quelque sorte de fausses jumelles, et pas seulement du fait de l'histoire locale : les contextes biotiques et stationnels diffèrent aussi. Cet article fait le point du passé sylvicole, des réflexions croisées et des perspectives communes aux deux îles pour la principale essence de production.

Le mahogany à grandes feuilles est la principale essence de production de bois d'œuvre en Martinique et en Guadeloupe. Du fait de sa croissance rapide et des qualités de son bois, il a été largement introduit dès 1905 en tant qu'essence de reboisement dans des zones qui avaient été surexploitées. Cependant, la gestion de cette essence en peuplements de production est complexe et il est apparu nécessaire aux Directions régionales de l'ONF en Martinique et en Guadeloupe de faire un bilan sur sa sylviculture et de proposer des orientations. Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un stage de 6 mois, par Cécile Leroy, ingénieure diplômée de la FIF. L'objet de cet article est de présenter les enseignements issus de 100 ans de gestion sylvicole et les orientations envisagées.

Présentation du mahogany à grandes feuilles

Le mahogany à grandes feuilles (*Swietenia macrophylla* – King, Méliacées ; figure 1) fait partie des acajous, terme désignant des arbres tropicaux à bois rouge, essentiellement de la famille des Méliacées (genres *Khaya* en Afrique et *Swietenia* en Amérique). Il peut



Fig. 1 : anatomie du Mahogany à grandes feuilles (Tamby, 1987)
 1= Feuille, gr.1/5 ; 2 = Inflorescence, gr.1/4 ; 3 = Fruit, début de déhiscence, gr.1/4 ; 4 = Valves détachées : a, partie externe, b, partie interne, gr.1/4 ; 5 = Columelle avec une graine ailée, gr.1/4 ; 6 = Graine, gr. 1/3

mesurer jusqu'à 40 m de haut pour un diamètre supérieur à 1 m. Les plus vieux arbres exploités dans son aire d'origine (figure 2) en forêts naturelles étaient âgés d'une centaine d'années. On ne dispose pas d'indications plus précises concernant sa longévité.

Le mahogany à grandes feuilles (MGF en abrégé) est une espèce des forêts tropicales mésophiles et hygrophiles d'Amérique Centrale et du Sud ; il a besoin d'une alimentation en eau constante, mais ne supporte pas l'engorgement permanent. En forêt humide, il recherche des pentes bien drainées et des sols profonds très perméables. Le MGF est une espèce héliophile. Il tolère la concurrence latérale au cours de sa croissance, mais supporte mal la concurrence au niveau du houppier. C'est enfin une essence disséminée qui, dans son aire naturelle (strictement continentale), se rencontre à des densités très faibles : parfois un pied pour 10 ha.

Il est depuis longtemps exploité intensivement et en voie d'extinction dans son aire d'origine. Il est donc inscrit à l'Annexe II de la CITES (Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction). En effet, le MGF est un bois précieux, très recherché dans le commerce international sous la dénomination « acajou du Honduras », pour ses propriétés physiques, mécaniques (bois tendre, léger, faibles retraits, séchage rapide) et esthétiques ainsi que sa bonne durabilité naturelle. Il est destiné à des emplois variés : l'ébénisterie et l'ameublement, la construction (charpente légère, parquet, lambris).

Le MGF est apprécié en plantation par les forestiers tropicaux : sa croissance est rapide et la multiplication en pépinière est facile. Malgré tout, il existe peu de

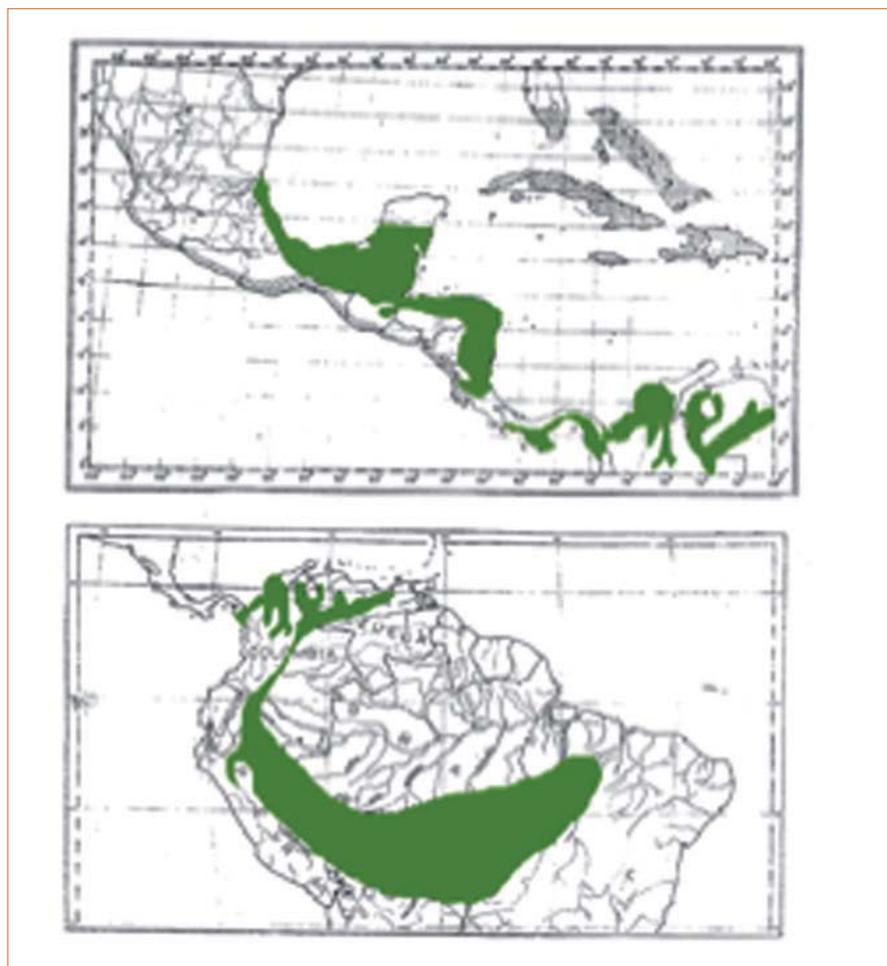


Fig. 2 : aire de répartition naturelle du Mahogany à grandes feuilles (Lamb, 1966)

grandes plantations, car l'espèce est assez exigeante, souffre d'attaques de ravageurs (encadré page suivante) et elle est sensible à la concurrence virulente des lianes et autres adventices des milieux tropicaux. En conséquence, la sylviculture est coûteuse les premières années. Les Petites et Grandes Antilles en détiendraient les plus grandes surfaces¹.

Le contexte stationnel et économique de production dans les Antilles françaises

Le mahogany à grandes feuilles a été introduit dans les Antilles françaises en 1905 afin de restaurer et de mettre en valeur des zones fo-

restières dégradées par la déforestation coloniale, principalement en périphérie des massifs forestiers hygrophiles. Il s'agit exclusivement de forêt publique (départementalo-domaniale), dans les zones montagneuses en périphérie du massif forestier des Pitons du Carbet en Martinique et de Basse-Terre en Guadeloupe. Cette introduction s'est faite sans analyse stationnelle poussée, d'où le succès variable des plantations. La Guadeloupe a d'ailleurs réduit ses efforts.

Ainsi, la Martinique compte aujourd'hui 1 500 ha de peuplements de MGF gérés sur les 15 500 ha de forêt publique que compte l'île. En Guadeloupe, 911 ha de peuple-

¹ D'après un document CITES (faisant référence à MAYHEW et NEWTON - *The silviculture of mahogany* - 1998), 116 000 ha seraient plantés en MGF en Indonésie, 42 000 aux Fidji, 25 000 aux Philippines... mais la confusion des dénominations fait douter qu'il s'agisse réellement de *Swietenia macrophylla*

Risques phytosanitaires, maladies et ravageurs

Plusieurs facteurs biotiques engendrent des dégâts importants dans les plantations de mahogany. Les principaux sont les suivants :

- **la mineuse des pousses d'acajou ou « borer »** (*Hypsipyla grandella* Zeller), principalement en Martinique. Elle augmente significativement les coûts de la sylviculture en causant un fort ralentissement de la croissance en hauteur et une mauvaise conformation des plants (fourches...);
- **le scolyte** (*Hexacolus guyanensis*) : ce ravageur ne concerne que la Guadeloupe. Il provoque des dégâts considérables aux plantations de MGF entraînant le plus souvent la mort de l'arbre en forant un réseau de galeries dans leur bois ;
- **la fourmi manioc** (*Acromyrmex octospinosus*) Reich. : signalée uniquement en Guadeloupe, c'est une espèce envahissante qui utilise les matières végétales non ligneuses pour nourrir un champignon qui l'alimente en retour. Elle sévit particulièrement dans les jeunes plantations monospécifiques de MGF, les réduisant parfois à néant ;
- **les pourritures racinaires et de cœur** : ces pourritures peuvent monter à l'intérieur de la grume sur plusieurs mètres. Les dégâts apparaissent généralement dans les peuplements âgés de plus de 45 ans. À l'heure actuelle, il n'y a pas assez d'études pour déterminer quels champignons sont responsables et comment lutter contre ces pourritures.

ments de mahogany font encore l'objet d'une gestion sylvicole (sur les 4 200 ha initialement plantés) pour 38 200 ha de forêt relevant du régime forestier.

Ces plantations ont permis d'installer en Martinique une petite filière de transformation (le MGF représente 95 % de la production martiniquaise de bois d'œuvre), pour la consommation locale (pas d'exportations). La ressource guadeloupéenne reste par contre largement sous-exploitée, faute d'exploitants forestiers disposant du matériel adéquat.

Des potentialités différentes en Martinique et en Guadeloupe

En Martinique, les peuplements sont en grande partie installés sur des sols à allophanes, à potentialité élevée. En Guadeloupe, en revanche, ils reposent majoritairement sur des sols ferrallitiques, beaucoup moins fertiles. Ainsi, la productivité moyenne des peuplements de MGF est de l'ordre de 8 m³/ha/an en Guadeloupe contre 15 m³/ha/an en Martinique (volume à la découpe 20 cm). Ces différences stationnelles expliquent en partie les différences sylvicoles entre les deux îles, le reste relevant de la pratique locale, des pathogènes...

Une filière « bwa-péyi » insuffisamment développée

Les filières bois martiniquaise et guadeloupéenne sont approvisionnées à plus de 90 % par les importations, le plus souvent standardisées. La filière MGF n'occupe donc qu'une place très restreinte sur le marché local. La commercialisation concerne principalement les bois de gros diamètres et très peu les produits d'éclaircie de qualité et dimension moyennes.

En Martinique, les exploitants forestiers s'approvisionnent en matière première principalement auprès de l'ONF qui a vendu de 2 000 à 3 000 m³ de mahogany par an ces dernières années. Ce chiffre est nettement inférieur aux volumes mobilisables en forêt (le double), car les entreprises de première transformation de mahogany ne sont pas compétitives face aux produits importés classés, standardisés, séchés et proposés à des prix équivalents voire inférieurs. Cet état de fait vient de ce que, tout d'abord, **les matériels d'exploitation et sciage sont souvent anciens** ; du reste, l'exploitation traditionnelle à « l'Alaskane » n'a pas disparu (bois abattus débités sur place, les planches étant ensuite débardées à dos d'homme). En conséquence,

les rendements sont faibles : la découpe conduit à des pertes de 60 % à 70 % sur les volumes vendus. De plus, **le relief est très accidenté et les sols sont peu porteurs** (argiles lourdes). Signalons encore **l'absence de standardisation** (absence de norme pour les produits mahogany et défaut de technicité). Dans ce contexte, **les difficultés financières des exploitants** ont des allures de cercle vicieux.

En Guadeloupe, la demande en bois de MGF ne peut être satisfaite du fait de la carence en moyens d'exploitation et de débardage des acheteurs ; l'ONF éprouve énormément de difficultés à commercialiser la production de la forêt départementalo-domaniale (estimée à 2 000 m³/an) et ne vend plus, depuis 1990, que quelques centaines de m³/an pour un revenu dépassant rarement 10 000 €/an.

Malgré un état des lieux assez sombre, des perspectives prometteuses

En Martinique, un accord-cadre a été signé en 2001 entre la Région, l'État, l'ONF et la Chambre des Métiers et de l'Artisanat de la Martinique (CMAM) puis le Syndicat du Bois et de l'Ameublement (SBAM) à partir de 2004. Il s'agit de développer la filière bois martiniquaise, lever les difficultés techniques et financières rencontrées par les entreprises de la filière bois, élargir les ressources en bois de la Martinique (y compris dans les forêts privées qui, jusqu'à présent, n'ont pas été véritablement gérées) et permettre le rapprochement avec les acteurs des filières bois des DOM voisins et de la zone Caraïbe. Depuis 2006, le Conseil régional s'est attaché à valoriser le potentiel martiniquais, en finançant notamment trois études : un audit de la filière bois qui a désigné les leviers à mettre en place ou à développer pour améliorer la situation, une cartographie des ensembles forestiers et naturels (entre autres pour iden-

tifier la forêt privée) et enfin une étude montrant la faisabilité du débardage par câble, pour augmenter la surface exploitable et les volumes mobilisables tout en préservant les sols.

En Guadeloupe (et Martinique), des dispositions ont été prévues au titre du programme de développement rural pour la période 2007-2013 afin d'aider les entreprises d'exploitation forestière à investir dans des matériels adaptés. Les trois quarts du coût des matériels peuvent ainsi être financés avec l'aide de fonds publics (Europe, État et collectivités). La ressource bois existe. Des aides sont disponibles pour l'exploitation. Un travail d'animation reste à engager pour faire émerger une ou deux entreprises d'exploitation forestière.

Par ailleurs, la production de bois de MGF est onéreuse, en raison principalement de coûts élevés de main-d'œuvre. Cependant ce bois précieux devrait normalement se négocier sur pied à des tarifs élevés², de l'ordre de 100 €/m³, qui compenseraient largement les coûts de production. En pratique il faudrait, pour atteindre l'équilibre, mobiliser correctement la ressource et doubler voire tripler les prix de vente actuels (20 à 60 €/m³, les meilleurs lots dépassant rarement 50 €/m³). Or la fragilité de la filière bois locale et la forte concurrence des importations ne le permettent pas aujourd'hui. Dans ces conditions, on peut s'interroger sur la poursuite de cette sylviculture... Rappelons ici que la production de bois et la filière aval ne fonctionnent pas du tout sur les mêmes échelles de temps. Alors qu'il faut 60 ans pour produire du bois de MGF, il faut seulement quelques années pour voir éclore les quelques petites entreprises nécessaires de la filière bois.

On peut donc raisonnablement penser que dans quelques années le bois de MGF produit localement pourra être commercialisé à un niveau beaucoup plus favorable (en volume et en prix), d'autant que le mahogany peut alimenter un marché de niche, pour plusieurs raisons : (i) c'est un bois précieux ; (ii) on cherche à développer les productions locales ; (iii) la valorisation de la ressource peut contribuer à la protection de l'espèce. Elle est en effet menacée dans son aire d'origine et fait ici l'objet d'une gestion durable sur quelques milliers d'hectares, dans la mesure où la filière bois s'organise pour pouvoir en récolter les produits.

Parallèlement, il existe des pistes sylvicoles à explorer pour diminuer les coûts de production, en étroite relation avec les actions de développement de la filière aval (exploitation et valorisation des bois). Il s'agit en particulier de recourir plus largement à la régénération naturelle et de réduire les productions intermédiaires de bois de faibles ou moyennes sections en baissant les densités, et en limitant le nombre d'éclaircies. Mais voyons d'abord le passé.

Bilan des sylvicultures passées

De l'introduction du mahogany...

Les premiers essais de plantation du mahogany en Martinique datent de 1905. L'essence a alors été introduite en plantation sur cultures de faible surface (moins d'un hectare) : il s'agissait de répondre à des besoins croissants à la fois en bois et en terres cultivables. La densité de plantation était de l'ordre de 100 plants/ha et l'âge d'exploitabilité était fixé à 40 ans.

Le succès de ces essais a conduit dans les années vingt à développer la plantation du mahogany, toujours

dans un cadre agroforestier, selon la méthode « Taungya » : les jeunes plants forestiers, bien répartis sur le terrain, bénéficiaient des entretiens apportés aux cultures. Cette méthode fut appliquée jusqu'en 1955 et 756 ha furent ainsi plantés, tout d'abord à raison de 100 plants/ha puis à la densité de 625 plants/ha (4 m x 4 m) afin d'améliorer la conformation des arbres. Elle fut abandonnée du fait de la petite taille unitaire des plantations et de leur dispersion, rendant trop compliquée la gestion des peuplements et trop lente l'introduction du mahogany.

À partir de 1955 et jusqu'en 1971, l'introduction du mahogany se fait après coupe rase de forêt naturelle dégradée sur plusieurs hectares puis plantation à 1 600 plants/ha (2,5 m x 2,5 m) pour améliorer encore l'élagage des tiges ; cependant, bien que la forme soit améliorée en peuplement serré, la grume présente souvent une ou plusieurs fourches. Le coût très élevé de cette sylviculture, les risques importants d'érosion des sols à nu, l'augmentation de la sensibilité au vent et aux parasites de ces peuplements purs et denses ont conduit à changer de méthode à partir de 1973.

Inspirée par la réussite martiniquaise, la Guadeloupe a entrepris l'introduction du mahogany en 1948. Entre 1948 et 1972-73, on a planté 4 200 ha et trois méthodes de plantations ont été testées :

- la plantation dite en layon sur des bandes de 2-3 m de large ouvertes tous les 8 m en sous-étage de forêt « naturelle » (à la machette, et la tronçonneuse selon le sous-étage), soit 500 plants de MGF/ha (2,5 m x 8 m) ; la méthode fut abandonnée, car le suivi était trop difficile ;
- la plantation en terrain découvert sur d'anciens jardins créoles à raison de 1 100 à 1 600 plants/ha, éga-

² En 1986, le Centre Technique Forestier Tropical (actuel CIRAD) a fait des essais de tranchage très encourageants sur des grumes martiniquaises de 60 cm de diamètre et plus.

lement abandonnée à cause de la trop forte concurrence herbacée et de l'accès difficile aux peuplements ;

■ la plantation sous abri, appliquée jusqu'en 1972, qui consiste à conserver comme abri des arbres d'essences locales de diamètre supérieur à 40 cm, éliminés progressivement dans les sept ans qui suivent la plantation. Sous cet abri, les MGF ont été plantés tout d'abord à une densité de 1 600 plants/ha puis à 1 250 plants/ha avec recrutement d'essences locales précieuses. Mais l'abri s'avère trop sombre et son élimination complexe. La méthode est améliorée en 1972 avec la plantation sous abri léger : élimination avant plantation de toutes les tiges de plus de 30 cm de diamètre puis plantation de MGF à 800 plants/ha et recrutement de 800 semis/ha d'essences locales.

...aux premiers aménagements forestiers

La Martinique adopte cette dernière méthode en 1973 avec une densité de plantation différente : 1 250 plants/ha (2 m x 4 m) et recrutement d'essences locales. L'âge d'exploitabilité était alors fixé à 50 ans. Pendant la durée du premier aménagement des forêts martiniquaises (1977-1990), environ 310 ha ont été régénérés ou plantés de cette façon. Les difficultés pour financer les travaux de dégagements ont conduit en 1984 à suspendre ces dispositions et revenir à la méthode antérieure, malgré ses inconvénients. Le deuxième aménagement forestier (1993-2002) préconise alors la régénération artificielle après coupe rase, soit par bandes, soit par parquets de 2,5 ha maximum, avec plantation à 1 100 plants/ha (3 m x 3 m) : 126 ha ont été régénérés ainsi pendant la période.

De même en Guadeloupe, les difficultés liées à l'exploitation de l'abri et le constat d'échec de certains peuplements situés sur des stations inadaptées ont entraîné

Origine des graines et des plants, diversité génétique

Les premières introductions ont été faites à partir de graines provenant de sujets sélectionnés, dans le cadre de programmes de restauration des forêts naturelles (soutenus par les Conseils généraux) ; des études préalables avaient identifié les meilleures ressources.

Une étude génétique a été menée peu avant 2000 par le CIRAD-forêt (de Guyane) pour la Martinique : les tests génétiques réalisés à partir d'échantillons prélevés dans les peuplements de MGF ont montré qu'ils présentent une très forte diversité génétique, qui serait due aux semences de départ et au système sylvicole pratiqué depuis. Notons que les plants installés sont souvent des « transplants » (semis de 2-3 ans prélevés en forêt, avec leur motte), ou bien ils ont été élevés dans la pépinière ONF à partir de graines récoltées sous les beaux peuplements locaux.

En Guadeloupe il ne reste qu'une faible part des introductions initiales et aujourd'hui les plants proviennent exclusivement du commerce, leur origine n'étant pas toujours précisément connue. Or pour l'avenir on doit veiller à la conservation des ressources génétiques de l'espèce et prévenir le risque de dégradation ; une expertise génétique aiderait à mieux appréhender la situation et pallier les faiblesses éventuelles.

Autre risque génétique, l'hybridation a été constatée avec une autre espèce également introduite aux Antilles françaises, mais plutôt inféodée aux milieux secs : le mahogany à petites feuilles (*Swietenia mahagoni*). Cependant, le phénomène reste confiné à la limite de répartition entre les deux espèces.

une remise en cause du système. Le second aménagement de la forêt départementalo-domaniale (1991-2000) préconise alors une méthode de régénération semi-artificielle : coupe d'ensemencement, coupe définitive, ouverture de layons d'un mètre de large tous les sept mètres à la machette et à la débroussailleuse, puis plantation complémentaire dans ces layons pour obtenir une densité de 571 plants/ha (2,5 m x 7 m).

Les sylvicultures actuelles

En Martinique comme en Guadeloupe, le mode de traitement des peuplements de MGF est la futaie régulière, bien adaptée au tempérament de l'essence. Les aménagements en vigueur (2003-2012 en Martinique et 2002-2011 en Guadeloupe) préconisent un objectif de mélange avec des essences locales d'environ 25 % de la surface terrière totale. Ce mélange protège les peuplements contre les attaques de ravageurs, procure un

abri et augmente la biodiversité. Mais les schémas sylvicoles, construits progressivement de part et d'autre selon les difficultés rencontrées, diffèrent sur les deux îles.

Régénération artificielle après coupe rase en Martinique

En Martinique, la méthode de renouvellement par coupes rases par parquets est reconduite, mais avec quelques améliorations : réduction des surfaces rasées (0,5 ha, exceptionnellement 1 ha), de la densité de plantation et de la surface travaillée. La régénération des peuplements de MGF est généralement artificielle (voir encadré graines et plants), sauf si des semis naturels apparaissent spontanément en quantité suffisante. La densité de plantation est de 800 plants/ha, soit 2,5 m x 5 m (photo p. 14) ce qui ménage une interbande non travaillée de 3 m de largeur occupée par le recrû naturel. En effet, des essais réalisés entre 1998 et 2001 sur les techniques de plantation ont montré que ce type de plantation « par

	Âge	Nombre de tiges/ha (peuplement final)	Diamètre moyen	Diamètre maximum	Volume unitaire/tige (découpe 20 cm)	Volume/ha (découpe 20 cm)
Stations les plus fertiles	50 ans	200-250	50-55 cm	60 cm	≈2,5 m ³	≈610 m ³ /ha
Stations les moins fertiles	55 ans	200-250	40-45 cm	50-55 cm	≈2 m ³	≈360 m ³ /ha

Tab. 1 : objectifs de production en Martinique

bande » était plus adapté que la plantation en plein pour réduire les coûts sans compromettre les objectifs sylvicoles. Des interventions soutenues en dégagement sont ensuite nécessaires pendant quelques années (tableau 2).

Coupes d'ensemencement et régénération semi-artificielle en Guadeloupe

En Guadeloupe, on provoque la régénération naturelle avec une coupe d'ensemencement (prélèvement de 50 % de la surface terrière en conservant toutefois au moins 10 m² de surface terrière par hectare). La coupe définitive intervient trois à cinq ans plus tard. Tous les mahoganys et essences secondaires associées sont alors exploités. Le sous-étage est conservé en partie de manière à ne jamais laisser le sol nu et limiter le développement de la végétation concurrente (fougère Calumet (*Dicranopteris pectinata*) et herbe couteau (*Scleria secans*)) qui peut bloquer la régénération. On ouvre alors tous les 7 mètres des bandes d'un mètre de large, en veillant à y conserver les jeunes mahoganys issus de l'ensemencement et les essences secondaires recherchées. L'objectif est de constituer un peuplement mélangé avec 75 % de mahogany, sans descendre au stade de la régénération en dessous de 50 %. Une plantation complémentaire de mahogany intervient la même année dans ces bandes, afin de combler tous les 2,5 m les vides dans lesquels on ne trouve pas de régénération naturelle de mahogany ou d'essence souhaitée. On procède ensuite à des dégagements selon l'itinéraire prévu (tableau 3).

Martinique		
Année	Type d'intervention	Densité après intervention (en tiges de MGF/ha)
0	Plantation 800 plants/ha (2,5 m x 5 m)	~800
	1 dégagement	~800
1 à 3 ans	Dégagements (~4/an)	~800
4 à 5 ans	2 dégagements/an (délianage)	~800
6 ans	Nettoisement (élimination des sujets mal conformés et délianage)	~750
10 ou 12 ans (Ho ≈15 m)	Dépressage (éclaircie non marchande par le haut)	400-500
40 ans (ou 40 cm de diamètre)	Éclaircie forte par le haut	200-250
~50 ans (ou 55 cm de diamètre)	Coupe rase	0

Tab. 2 : sylviculture préconisée par l'aménagement forestier pour la période 2003-2012 en Martinique

Guadeloupe		
Âge	Type d'intervention	Intensité de prélèvement
0	diagnostic du semis naturel et complément éventuel par plantation	-
1 à 2 ans	1 dégagement manuel/an	-
3 ans	1 dégagement manuel en plein 1 taille de formation	-
5-6 ans	1 dégagement	-
10 ans	Dépressage	Élimination des tiges d'essences locales concurrentes
15 ans	Dépressage	Élimination des tiges d'essences locales concurrentes
30 ans	Éclaircie par le haut	Prélèvement = 30 à 40 % de G (tout en maintenant G > = 12 m ² /ha)
45 ans	Éclaircie par le haut	Prélèvement = 30 à 40 % de G (tout en maintenant G ≥ 12 m ² /ha)
57 ans	Coupe d'ensemencement	Prélèvement = 50 % de G (tout en maintenant G ≥ 10 m ² /ha)
60 ans	Coupe définitive	

Tab. 3 : sylviculture préconisée par l'aménagement forestier pour la période 2002-2011 en Guadeloupe

Critères d'exploitabilité et sylviculture

En Martinique, l'âge d'exploitabilité est fixé à 50 ans et le diamètre d'exploitabilité des tiges à 55 cm (tableau 1). La sylviculture correspondante est résumée au tableau 2. Cette sylviculture plus dynamique et partant de plantations moins denses qu'auparavant vise à obtenir des tiges ayant un volume unitaire plus élevé tout en diminuant les interventions et donc les coûts.

En Guadeloupe, l'âge optimum d'exploitabilité est de 60 ans et correspond à un diamètre de 50 cm (à moduler suivant la fertilité stationnelle) ; le tableau 3 résume la sylviculture correspondante. Dans les cas les moins favorables (stations limites, retards de sylviculture), l'âge limite d'exploitabilité acceptable pour le MGF est de 70 ans (risque avéré de pourriture au-delà), avec un diamètre minimum d'exploitabilité de 40 cm.

Rattraper les retards d'éclaircie

De nombreux peuplements âgés de 20 à 40 ans sont en retard d'éclaircie dans les deux îles, faute de débouchés pour les petits bois. Cela induit des problèmes de stabilité face aux vents. Ces peuplements sont également plus vulnérables face aux attaques de scolytes en Guadeloupe. Des opérations de rattrapage sont prévues pour ceux de ces peuplements qui présentent le meilleur potentiel de « récupération » et de valorisation ultérieure.

En Martinique, des éclaircies de rattrapage, non commercialisables, ont ainsi été proposées, et sont en voie de réalisation sur les 50 ha les plus concernés. Après désignation de 200 tiges d'avenir par hectare, il s'agit d'éclaircie mixte, par le haut (loups et codominants) au profit de ces 200 tiges et par le bas pour améliorer l'éclaircissement latéral, auquel le MGF est très sensible, et diminuer la concurrence trophique (photo p.17).

En Guadeloupe, diverses modalités sylvicoles de rattrapage ont été testées jusqu'en 1988 : éclaircie par le haut au profit d'arbre de place, éclaircie en plein par le haut ou par le bas, d'intensité moyenne ou forte. Il en ressort que la croissance en surface terrière est plus élevée pour les peuplements éclaircis par le haut (avec ou sans désignation), que la densité d'arbres d'avenir à désigner serait de 200 tiges/ha environ, mais que ces résultats sont à nuancer pour limiter les attaques de scolytes : éviter les interventions brutales dans l'étage dominant ainsi que la présence d'un sous-étage peu vigoureux de MGF pouvant servir de point de départ à l'infection.

Perspectives et propositions d'évolution de l'itinéraire sylvicole

Les enjeux de la sylviculture du MGF se traduisent plus que jamais par la nécessité de :

- définir une sylviculture dynamique pour réduire le nombre d'interventions et donc les coûts de production de bois d'œuvre de qualité ;
- tenir compte des difficultés d'exploitation et s'inscrire dans un programme de redressement de la filière bois locale ;
- intégrer la biodiversité, entre autres pour la diversification des produits et la lutte contre les problèmes phytosanitaires (mélange des essences) ;
- mieux utiliser la régénération naturelle de MGF ;
- rattraper raisonnablement les retards sylvicoles ;
- prendre en compte le risque cyclone en limitant la durée d'exposition des peuplements (produire plus vite des bois plus gros).

Objectifs de production

L'objectif de la sylviculture est d'atteindre un diamètre d'exploitabilité d'environ 50 à 60 cm à 50 ans, selon la fertilité de la station et avec une densité finale d'environ



ONF Martinique

Plantation martiniquaise âgée de 6 ans ($d = 800$ tiges/ha)

ron 150 tiges/ha. Concernant la vitalité et la stabilité des peuplements, il semble prudent d'éviter de pousser les peuplements au-delà de 60 ans, de nombreuses références bibliographiques faisant état de problèmes sanitaires fréquents passé cet âge (pourritures du bois notamment).

Une densité initiale plus faible, des interventions moins fréquentes et plus dynamiques

L'objectif étant un peuplement final de 150 tiges/ha, conserver une densité initiale de 800 plants/ha obligerait à multiplier les interventions, ce qui n'est évidemment pas souhaité, ou à éclaircir trop fortement, au risque de déstabiliser le peuplement. On a donc opté pour un dispositif de plantation de 3 m x 6 m soit une densité initiale de 555 plants/ha. L'interbande passe ainsi de 3 m de large à 4 m ce qui réduit également la surface travaillée (figure 3).

Les itinéraires sylvicoles proposés pour la Martinique et la Guadeloupe sont résumés dans les tableaux 4 et 5. Les principes sont les mêmes, que le renouvellement des peup-

Enseignement des dispositifs de recherche et développement

La sylviculture du MGF, telle qu'elle est pratiquée actuellement, résulte du bilan de la gestion passée, confronté aux évolutions technico-économiques, mais elle est également liée aux résultats de dispositifs de recherche et développement mis en place sur les deux îles depuis une vingtaine d'années.

Selon un essai de 1993 sur la régénération naturelle du MGF en Martinique, les sujets issus de semis naturels, s'ils sont sauvés de la concurrence herbacée, sont plus vigoureux à tous points de vue que les MGF issus de plantation.

Des essais menés en Martinique et en Guadeloupe entre 1991 et 2001 sur les types de plants et les techniques de plantation montrent que :

- l'utilisation de grands plants (2,5 – 4 m) engendre des surcoûts financiers sans améliorer la croissance initiale des plantations et sans réduire suffisamment le nombre de dégagements ;
- il n'y a pas de différence significative d'accroissement et de survie entre la plantation en « potet » (à la pioche) et au bâton (simple trou par enfouissement d'un bâton dans le sol).

Les essais de lutte contre la mineuse des pousses par traitement chimique, en 1992-1994, n'ont pas été plus efficaces que la méthode de dégagement manuel et la lutte sylvicole passive (mélange des essences), qui semblent être les meilleurs moyens de lutte actuels. Le mélange des essences serait également la meilleure solution pour limiter les attaques de scolyte. Les aménagements établis depuis lors tiennent compte de ces résultats et préconisent un mélange de 25 % d'essences locales dans les peuplements de MGF.

En Martinique, entre 2000 et 2003, la comparaison de 4 modalités de dégagement d'une plantation de MGF pour diminuer les coûts montre qu'aucune modalité n'est plus efficace que les autres. La préférence est accordée aux méthodes manuelles et/ou mécaniques, plus respectueuses de l'environnement

En Martinique, un dispositif a été mis en place en 2002, pour asseoir les bases d'un itinéraire technique destiné à améliorer la qualité des peuplements malgré l'impossibilité de vendre les premières éclaircies.

Il s'agit d'ajuster le dépressage pour limiter ensuite le nombre d'éclaircies à deux voire une seule avant récolte définitive. Deux modalités de dépressage à 10 m de hauteur dominante sont testées et comparées à une modalité non dépressée : l'une réduit la densité à 600 tiges/ha, l'autre à 350 tiges/ha. Il est encore trop tôt pour en tirer les conclusions de long terme.

Bien que les efforts de recherche et développement consentis en matière de sylviculture du MGF soient déjà importants, des investigations sont à poursuivre dans les domaines suivants :

1. *La fourmi manioc (en Guadeloupe) ;* Elle fait dans les régénérations des dégâts qui peuvent être sévères, mais qu'on peut sans doute limiter en privilégiant le mélange des essences. On observe également que la fourmi manioc circule de manière privilégiée sur les layons. Dans les secteurs les plus infestés, il faudra tester (chantiers pilotes) de nouveaux dispositifs de régénération où les plants à dégager ne soient pas sur de tels layons.

2. *Les conditions d'installation et de maintien de la régénération naturelle ;* En Guadeloupe, un dispositif dont l'objectif est de définir un itinéraire sylvicole de régénération naturelle du MGF a été installé en 2006. Il étudie l'influence du couvert sur l'apparition et la croissance des semis, sur la dynamique de la végétation concurrente et sur l'intensité des attaques de borer (mineuse des pousses). En Martinique, des chantiers pilotes sont mis en place dans le but de tester deux types de coupes permettant l'obtention et le maintien de régénération naturelle. Il s'agit de coupes d'ensemencement (prélèvement de tous les bois de plus de 40 cm de diamètre à 1,3 m) et de coupes par bandes (bandes de 10 m de large espacées de 25 m).

3. *Le dépressage de jeunes peuplements issus de régénération naturelle ;*

4. *Le rattrapage pour les parcelles en retard d'éclaircie.*

Enfin, une étude plus poussée sur la (ou les) pourriture(s) du MGF (agents, causes, facteurs aggravants...) est également souhaitable.

peuplements soit artificiel ou semi-artificiel : faible densité initiale et nombre d'éclaircies limité afin d'atteindre au plus vite de gros diamètres, et réduction des surfaces travaillées.

La Martinique conserve pour l'instant son mode de régénération artificielle par petites coupes rases, mais commence, depuis deux ans, à diminuer la part des plants au bénéfice des semis naturels qu'elle peut recruter. La Guadeloupe approfondit son expérience de régénération semi-artificielle avec coupes d'ensemencement et définitive, puis plantation complémentaire si nécessaire dans les bandes travaillées, à hauteur de la densité recherchée.

En résumé

Les enjeux de la sylviculture du mahogany à grandes feuilles aux Antilles françaises sont tout à la fois (i) de faire évoluer les itinéraires pour réduire les coûts et s'adapter à la demande (commercialisation des gros bois essentiellement), mais également et en parallèle (ii) de faire en sorte que les entreprises d'exploitation et la filière bois soient en capacité de valoriser complètement cette ressource. La gestion durable des plantations de mahogany passe nécessairement par sa valorisation.

Pour la sylviculture, dans le cadre d'un traitement en futaie régulière, on recommande de faibles densités initiales (550) et un nombre d'éclaircies limité afin d'atteindre au plus vite de gros diamètres, de limiter la production de petits bois et de réduire les coûts des travaux. Une surface travaillée réduite permet également de réduire les coûts. Ces principes s'appliquent, que les peuplements soient issus de plantation ou de régénération naturelle, avec plantation complémentaire éventuelle.

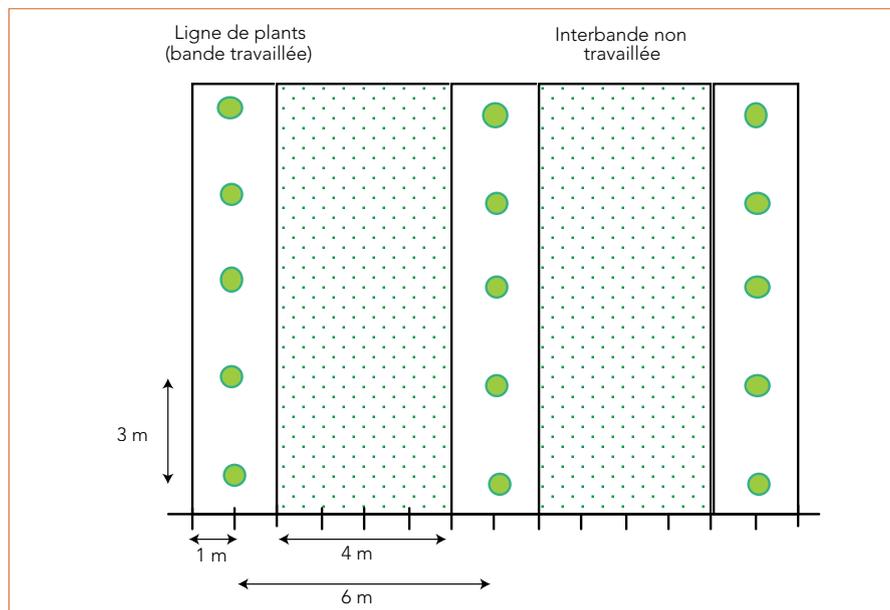


Fig. 3 : schématisation de la modalité d'espacement à 3 m x 6 m

Le mahogany est conduit en mélange avec 25 % d'autres espèces précieuses se développant spontanément. Le mélange, favorable à la diversité biologique, renforce également la capacité de résistance à des attaques de pathogènes. La question de la fourmi manioc reste cependant préoccupante en Guadeloupe. C'est un sujet à explorer avec la recherche et dans le cadre de chantiers pilotes.

La fragilité actuelle de la filière bois ne remet pas en cause la poursuite de la gestion des peuplements de mahogany. On se situe là sur deux échelles de temps différentes : la création d'entreprises d'exploitation peut être rapide, tandis que la production de bois d'œuvre de qualité est un processus qui se déroule sur un cycle de 50 ans. De plus, le mahogany peut alimenter un marché de niche, car c'est un bois précieux (un acajou) qui présente en outre l'avantage d'être une production locale, alors que beaucoup de biens et services sont importés à des coûts élevés.

Le développement nécessaire de la filière bois passe notamment par l'émergence ou la consolidation de quelques entreprises bien équipées d'exploitation forestière. Des études ont été réalisées. Des fonds d'aide à l'investissement sont réservés. Il est temps de relancer l'action dans ce domaine !

Cécile LEROY

Ingénieur diplômée de la FIF

Jean-Baptiste SCHNEIDER

ONF, DR Martinique
jean-baptiste.schneider@onf.fr

Année	Type d'intervention	Densité après intervention (en tiges de MGF/ha) /intensité
0	Régénération naturelle et/ou artificielle (*) 1 dégagement	550
1 à 3 ans	Dégagements (~4/an)	
4 à 5 ans	2 dégagements/an	
6 ans	Nettoisement	~500
10 ou 15 ans	Dépressage (par le haut)	250-300 (i = 40 à 50 %)
~40 ans	Éclaircie forte par le haut si commercialisable, rien sinon	~150 (250) (i = 50 %)
~50 ans	Coupe définitive (= rase)	0

(*) Plantation après coupe rase à 3 x 6 m, soit 555 plants par ha (figure 3), ou plantation complémentaire de la régénération naturelle après coupes d'ensemencement et définitive, sur cette même base.

Tab. 4 : nouveau schéma sylvicole proposé pour la Martinique

Âge	Type d'intervention	Densité après intervention (en tiges de MGF/ha) /intensité
0	Régénération naturelle et/ou artificielle (*)	~550 (**)
1 à 2 ans	1 dégagement manuel/an	
3 ans	1 dégagement manuel en plein associé avec 1 taille de formation	
5-6 ans	1 dégagement	
10-15 ans	Dépressage	250-300 (i = 40 à 50 %)
30 ans	Éclaircie par le haut	~150 (i = 50 %)
~50 ans	Coupe d'ensemencement	~100
55 ans	Coupe définitive	0

(*) Même dispositif que pour la Martinique.

(**) Les semis naturels présents sur les bandes travaillées n'atteignent généralement pas cette densité. Mais s'ils la dépassaient, il faudrait les ramener à 550 tiges par hectare lors du premier ou second dégagement.

Tab. 5 : nouveau schéma sylvicole proposé pour la Guadeloupe

Bibliographie

ERNST & YOUNG ADVISORY, Conseil Régional de Martinique, 2006. Étude de la filière bois en Martinique. Rapport de fin de phase 1, 153 p.

LEROY C., 2007 - La Sylviculture du Mahogany à grandes feuilles (*Swietenia macrophylla* – King) dans les Antilles françaises : Bilan et perspectives. ONF DR Martinique, 166 p.

MAYHEW J.E., NEWTON A.C., 1998. The silviculture of Mahogany. CABI Publishing (CAB International), 226 p.

ONF - DR Guadeloupe, 1991. Forêt Départementalo-Domaniale de la Guadeloupe, 27 754 ha 86 a 79 ca. Révision d'aménagement 1991-2000. 63 p.

ONF - DR Guadeloupe, 2002. Forêt départementalo-domaniale de Guadeloupe. Révision d'aménagement forestier 2002-2011. 58 p.

ONF - DR Martinique, 1980. Forêt des Pitons du Carbet et de la Montagne Pelée. Plan d'Aménagement (1977-1986). 90 p.

ONF - DR Martinique, 1992. Forêt départementalo-domaniale des Pitons du Carbet et de la Montagne Pelée. Aménagement 1993-2002. 99 p.

ONF - DR Martinique, 2003. Forêt départementalo-domaniale des Pitons du Carbet : Révision d'aménagement forestier 2003-2012. 75 p.

ONF - DR Martinique, 2005. Forêt départementalo-domaniale du Sud. Révision d'aménagement forestier 2005-2014. 55 p.

PLAN J., VENNETIER M., 1998. Contribution des dispositifs expérimentaux de la Martinique à la sylviculture du MGF. Bulletin technique ONF n°36, pp. 29-38

TAMBY C., 1987. Table de production pour le Mahogany à la Guadeloupe. Mémoire de 3ème année ENITEF, INRA des Antilles-Guyane, 29 p.

TEISSIER DU CROS R., 2000. Le Mahogany Grandes Feuilles de Martinique (*Swietenia macrophylla*). Plaquette CIRAD Forêt/ONF, 4 p.

TILLIER S., 1993. La productivité du Mahogany grandes feuilles dans le Massif des Pitons du Carbet. Mémoire FIF, ONF DR Martinique, 48 p.

VENNETIER M., 1998. Le Mahogany à grandes feuilles (*Swietenia macrophylla* King). Bulletin technique ONF, n°36, pp. 23-28



Perchis de Mahogany à grandes feuilles après éclaircie de rattrapage (FDD des Pitons du Carbet, Martinique)

J.B. Schneider, ONF

Dossier



Recherche : des bases pour la gestion durable des forêts mélangées

La part des peuplements mélangés augmente dans les paysages forestiers français, d'autant que les peuplements sinistrés en 1999 par les tempêtes Lothar et Martin ont souvent vu émerger une régénération naturelle plus diversifiée. Or la gestion durable des mélanges pose des questions très spécifiques : les connaissances sur la dynamique des mélanges, nécessaires à l'élaboration d'outils d'aide à la gestion, sont donc des enjeux de recherche importants pour les forestiers. Ce dossier présente les principaux résultats de 4 ans de recherches (au sein du programme ECOGER) sur les « Bases de la gestion durable des forêts mélangées », ainsi que les enseignements d'une thèse récente sur la modélisation des mélanges chêne-pin en région Centre. Mais beaucoup reste à faire.

- p. 19 Bases d'une gestion durable des forêts mélangées : résultats d'un projet de recherche mené sur quatre ans
par Thomas Cordonnier, Catherine Collet et Erwin Dreyer
- p. 23 Typologie et réactivité des perches de hêtre et de chêne en forêt hétérogène
par Thomas Cordonnier, François Ningre et Alexandre Piboule
- p. 29 Les semis préexistants : une composante importante de la régénération dans les hêtraies mélangées
par Catherine Collet, François Ningre, Thiéry Constant, Antoine de Boutray et Alexandre Piboule
- p. 36 Dynamique des forêts mélangées sur le Mont-Ventoux : effets de l'altitude et de la gestion
par Philippe Dreyfus, Jean Ladier et François Lefèvre
- p. 43 Ombre et forêts : pourquoi certaines essences sont-elles plus tolérantes à l'ombre que d'autres lors des phases de régénération ?
par Erwin Dreyer, Pierre Montpied, Daniel Epron, Catherine Collet
- p. 52 Comment estimer la lumière dans le sous-bois forestier à partir des caractéristiques dendrométriques des peuplements ?
par Philippe Balandier, André Marquier, Sandrine Perret, Catherine Collet et Benoît Courbaud
- p. 59 Modélisation de la croissance des peuplements mélangés chêne – pin : des enseignements importants pour la sylviculture de ces peuplements
par Christine Micheneau, Christine Deleuze-Brézins, Jean-François Dhôte et Myriam Legay

Bases d'une gestion durable des forêts mélangées : résultats d'un projet de recherche mené sur quatre ans

Bien représentés en France, les peuplements mélangés sont susceptibles de constituer dans de nombreuses situations un atout intéressant pour la gestion durable des forêts. Cet article « chapeau » rappelle brièvement le contexte particulier des forêts mélangées et présente la philosophie générale d'un projet de recherche mené pendant quatre ans sur les bases de la gestion durable des forêts mélangées (dans le cadre du programme fédérateur ECOGER) ; il synthétise aussi les apports de chacune des contributions à ce dossier.

La forêt française est constituée pour environ la moitié de sa surface de peuplements comprenant plusieurs essences en mélange, l'importance de ces peuplements augmentant dans le quart Nord-Est et en montagne (Morneau *et al.* 2008). Les peuplements mélangés font l'objet depuis plusieurs années d'un regain d'intérêt de la part des gestionnaires ainsi que des usagers de la forêt. Ce phénomène résulte d'une demande sociale forte pour un environnement de meilleure qualité, mais aussi, dans le contexte de diminution constante de la rentabilité forestière, de la recherche de méthodes de gestion économes, reposant sur les dynamiques naturelles (ex. successions des espèces). L'idée générale est que les peuplements mélangés seraient plus à même de répondre aux besoins de diversification économique (ne pas mettre tous ses œufs dans le même panier), écologique et sociale exprimés par la communauté forestière et que ces peuplements seraient plus résilients aux contraintes naturelles (sécheresse, pathogènes...). Les peuplements mélangés permettraient ainsi une gestion moins dépendante des aléas économiques et écologiques



Futaie mélangée dans le Vercors

M. Redon, Cemagref

(ex. changements climatiques, cf. Legay *et al.*, 2008). De ce point de vue, ils sont souvent considérés comme un moyen efficace pour améliorer ou garantir la gestion durable des forêts (Sardin *et al.*, 2008).

Dans la pratique, ces avantages ne s'avèrent pas systématiques, les mélanges posant parfois plus de difficultés qu'ils ne présentent d'atouts (Sardin *et al.*, 2008 ; Brucciamachie *et al.*, 2007). Des études et synthèses récentes vien-

nent peu à peu alimenter les débats autour de l'intérêt des mélanges pour la biodiversité, la résilience ou la résistance des forêts aux perturbations (Barbier *et al.*, 2008 ; Colin *et al.*, 2008 ; Jactel *et al.*, 2008). Les forêts mélangées ne seraient donc pas la solution universelle pour la gestion durable, et il convient de bien identifier les situations écologiques et les associations d'espèces qui constituent des atouts à la fois pour le forestier et pour le fonctionnement de l'écosystème.

Ceci étant, la gestion des mélanges en place reste un problème fondamental. Les questions des gestionnaires à ce sujet sont encore nombreuses et les connaissances sur la dynamique des mélanges et sur les outils d'aide à leur gestion représentent donc des enjeux importants. Ce dossier aborde la question des mélanges sous cet angle.

Pour les gestionnaires forestiers, les peuplements mélangés posent des questions spécifiques

Les peuplements mélangés ne sont pas nouveaux et font depuis longtemps l'objet d'une gestion sylvicole raisonnée, que ce soit à l'échelle du peuplement, de la forêt ou du massif au travers de la sylviculture et de l'aménagement. Le mélange, préconisé dans la plupart des guides de sylvicultures, soulève cependant des difficultés spécifiques, notamment sur le plan de la conduite sylvicole, plus particulièrement au niveau du renouvellement et des interventions dans les stades juvéniles (Sardin *et al.* 2008). Comment obtenir, doser et maintenir un mélange au cours du développement du peuplement ? Quels sont les stades d'interventions clés en fonction des types de mélange ? Comment tenir compte des différentiels de croissance entre les essences ? Quelle structure spatiale du mélange privilégier (ex. mélange intime ; mélange par bouquets) ? À ces questions précises s'ajoutent également des questions plus générales sur les contextes stationnels favorables ou non à la conduite de certains mélanges (ex. hêtre-frêne ; hêtre-chêne).

Un projet de recherche mobilisant de nombreuses disciplines

Ces questions interpellent bien évidemment le monde de la recherche. Les enjeux de recherche autour des forêts mélangées ainsi que les méthodes d'études ont

déjà fait l'objet d'articles dans deux dossiers précédents des Rendez-Vous Techniques consacrés aux forêts hétérogènes (Dhôte *et al.*, 2005 ; Cordonnier *et al.*, 2007). Il ne s'agit pas ici d'y revenir, mais de présenter quelques résultats obtenus dans le cadre d'un projet de recherche mené sur les forêts mélangées, et plus particulièrement les hêtraies mélangées. Ce projet intitulé « *Bases d'une gestion durable des forêts mélangées : croissance, écophysiologie et démogénétique des espèces constitutives* » et financé par le programme fédérateur ECOGER de l'INRA (ÉCOlogie pour la Gestion des Écosystèmes et de leur Ressource) a réuni de 2005 à 2008 des équipes de l'INRA, du Cemagref et de l'ONF autour d'un même objectif : élaborer des outils d'aide à la décision pour la gestion des hêtraies mélangées et permettre ainsi de défricher une partie des questions posées précédemment.

Le choix du hêtre comme essence centrale de ce projet résulte de sa grande amplitude écologique et de son tempérament très social qui en font une essence fortement présente dans les mélanges naturels sur une grande partie de notre territoire. Le hêtre est ainsi l'essence qui structure les peuplements mélangés dans l'Est de la France et l'essence qui colonise les terroirs agricoles abandonnés de moyenne montagne du Massif Central et les vieilles plantations résineuses de l'étage montagnard méditerranéen. Son caractère d'essence dryade et ses grandes capacités de régénération impliquent parfois de le contenir pour que puissent se maintenir des espèces sociales plus héliophiles ou des espèces disséminées (ONF, 2005).

Les travaux se sont focalisés sur la dynamique de développement des mélanges et des différentes essences qui les constituent, et sur la diversité génétique et fonctionnelle au sein des mélanges. Une approche de modélisation s'appuyant

sur des bases théoriques et sur des données de terrain a été mise en œuvre ; l'objectif était d'obtenir des prédictions d'évolution des peuplements dans des cas de figure complexes faisant intervenir de nombreux facteurs, à l'échelle de la parcelle ou du massif forestier et à moyen terme ou long terme, pour pouvoir ensuite réaliser des comparaisons de scénarios sylvicoles ou d'orientations d'aménagement à l'échelle du massif forestier.

Le projet a donc mobilisé des compétences multiples : écophysiologie (ex. étude de la résistance à la sécheresse ; diversité du fonctionnement carboné et hydrique des arbres), génétique (diversité génétique), dendrométrie (croissance, compétition), modélisation.

Une meilleure connaissance du comportement des essences en hêtraie mélangée

Un effort important a porté sur l'analyse des relations de compétition au sein d'une même espèce ou entre espèces, entre les différentes strates du peuplement (strate juvénile, intermédiaire ou adulte) ou au sein d'une même strate. Les mécanismes de l'interaction ont été détaillés, en quantifiant notamment l'accès aux ressources (eau, lumière) et leur utilisation par les individus. On a pu ainsi caractériser la diversité des réponses spécifiques et décrire les stratégies de développement des différentes espèces, d'après une analyse de différentes composantes de l'économie de l'eau et du carbone. Les principaux résultats obtenus sur ces sujets sont présentés et discutés dans les différents articles de ce dossier en intégrant bien sûr les résultats d'études antérieures.

Collet *et al.* démontrent ainsi la bonne réactivité en croissance et en qualité de semis préexistants de hêtre et d'érable à une sou-



J. Fay, ONF

Futaie mélangée en Chartreuse

daine mise en lumière dans des peuplements feuillus mélangés à base de hêtre sur plateau calcaire en Lorraine. Les implications d'un tel résultat pour la conduite de coupes de régénération sont discutées. Cordonnier *et al.* abordent cette même question pour le stade perchis : après avoir identifié différents types morphologiques de perches de hêtre et de chênes dans des futaies hétérogènes, ils observent également une bonne réactivité générale de la croissance des perches de hêtre « libérées » par une éclaircie à leur profit. Une expérimentation de

« libération » de perches de chêne est actuellement en cours pour comparer la réactivité de ces deux espèces feuillues majeures en France. Balandier *et al.* font le point sur notre capacité à estimer et modéliser de manière satisfaisante la ressource lumière dans des peuplements présentant différentes complexités structurales. Cette question s'avère fondamentale pour pouvoir aborder l'étude des relations entre lumière et composition des régénérations, ou entre lumière et croissance des espèces en mélange (Sardin *et al.*, 2008). Dreyfus *et al.* nous offrent

une vision éclairée de la dynamique des forêts mélangées du Mont Ventoux, en faisant la part des facteurs climatiques (ex. altitude) et anthropiques (gestion) sur la distribution des espèces et leurs interactions en situation de mélange. Enfin, Dreyer *et al.* abordent la question essentielle, mais difficile, de la caractérisation du comportement des espèces constitutives de mélanges, en particulier la tolérance à l'ombre. Ils mettent l'accent sur la notion de diversité fonctionnelle, qui devrait permettre dorénavant de mieux comprendre la réaction des espèces dans des mélanges soumis à différentes contraintes climatiques.

Un outil privilégié pour le transfert : la modélisation

Ces processus ont été intégrés dans une suite de modèles pour construire différents outils de simulation pour la communauté scientifique ainsi que des outils d'aide à la gestion. Les partenaires du projet ont développé quatre séries de modèles et simulateurs : (1) de la structure de peuplements mélangés ; (2) de l'interception et de la transmission du rayonnement lumineux par les arbres individuels et les couverts (voir Balandier *et al.*, ce dossier) ; (3) de la dynamique des peuplements mélangés à base de hêtre du Nord de la France ; et (4) de la dynamique de peuplements mélangés hêtre-sapin-pin en zone méditerranéenne à l'échelle du massif (voir Dreyfus *et al.*, ce dossier). En parallèle, des programmes informatiques ont été conçus pour mettre en œuvre et exploiter efficacement ces simulateurs dans le cadre de plateformes de modélisation (ALEA et CAPSIS).

Le projet a combiné des approches expérimentales pour l'étude des processus élémentaires, et des approches virtuelles par simulation (ex. création de peuplements vir-

tuels « réalistes » pour estimer la ressource lumière) pour assembler ces processus et analyser la résultante à des échelles spatiales et temporelles plus larges. L'approche expérimentale était basée pour une large part sur un réseau de dispositifs déjà en place, permettant ainsi de disposer de séries de données longues au regard de la durée effective du projet. De manière similaire, l'approche virtuelle s'est appuyée sur des modèles et simulateurs déjà fonctionnels et a permis leur d'améliorer leur fiabilité et d'étendre leur champ d'application (ex. des peuplements purs aux peuplements mélangés).

Des avancées, certes, mais beaucoup reste encore à faire

Les lecteurs pourront regretter, à juste titre, que les outils proposés soient encore loin de fournir des résultats « clé en main » directement utilisables par les sylviculteurs ou les aménagistes. Mais un tel objectif n'est que rarement affiché pour des projets scientifiques de cette ampleur, même dans le cadre d'une recherche finalisée. Les résultats obtenus et présentés dans ce dossier sont donc encore partiels. Il ne pouvait en être autrement pour un sujet difficile, faisant appel à des domaines scientifiques très variés et nécessitant de développer des outils intégrateurs dont la validation s'avère longue, délicate et laborieuse. Ce projet a cependant abouti à des avancées significatives sur les outils et les développements conceptuels nécessaires pour aborder des peuplements mélangés : modélisation de la ressource lumière, meilleure connaissance du fonctionnement hydrique et carboné des arbres en situation de mélange, réactivité des espèces à une mise en lumière, modélisation de la structure spatiale de mélanges, structuration de la diversité intraspécifique, et enfin, modélisation de la dynamique de certains mélanges à base de hêtre (hêtre-

frêne, non présenté dans ce dossier ; hêtre-pin-sapin). Nous espérons avoir, au travers de ce projet, apporté une pierre solide à cet édifice complexe, mais passionnant que représente la connaissance des « forêts hétérogènes ».

Thomas CORDONNIER

Cemagref Grenoble, Unité EMGR
thomas.cordonnier@cemagref.fr

Catherine COLLET

INRA Nancy, UMR 1092 - LERFoB
collet@nancy.inra.fr

Erwin DREYER

INRA Nancy, UMR 1137 – EEF
dreyer@nancy.inra.fr

Remerciements

Nous voudrions remercier l'ensemble des chercheurs, techniciens, doctorants et personnels ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce projet. Nous remercions également l'ensemble des relecteurs des articles de ce dossier. Nos pensées vont à la famille d'Hervé SINOQUET (INRA PIAF), une des chevilles ouvrières du projet, décédé en septembre 2008 après un long combat contre la maladie.

Bibliographie

BARBIER S., GOSELIN F., BALANDIER P., 2008. Le mélange est-il favorable à la diversité végétale en forêt ? *Revue Forestière Française* tome LX, pp. 159-167

BRUCIAMACCHIE M., HANEWINKEL M., PEYRON J.-L., 2007. Aspects économiques de la gestion des peuplements forestiers mélangés. Communication orale REGEFOR, Atelier Recherche et Gestion Forestière « Forêts mélangées : quels scénarios pour l'avenir ? » 26-28 juin 2007, Champenoux

CORDONNIER T., GINISTY C., NINGRE F., PÉROT T., PIBOULE A., VINKLER I., 2007. Recherches sur les forêts hétérogènes : observation, expérimentation, et modélisation. ONF, *Rendez-Vous Techniques* n° 18 pp. 18-25

COLIN E., BRUNET Y., VINKLER I., DHÔTE J.-F., 2008. Résistance aux vents forts des peuplements forestiers, et notamment des mélanges d'espèces. *Revue Forestière Française* tome LX pp. 191-205

DHÔTE J.-F., CORDONNIER T., LEGOFF N., DREYFUS P., 2005. Quelques enjeux autour des forêts hétérogènes tempérées. ONF, *Rendez-Vous Techniques* n° 10 pp. 22-31

JACTEL H., BROCKERHOFF E., PIOU D., 2008. Le risque sanitaire dans les forêts mélangées. *Revue Forestière Française* tome LX, pp. 168-180

LEGAY M., CORDONNIER T., DHÔTE J.-F., 2008. Des forêts mélangées pour composer avec les changements climatiques. *Revue Forestière Française* tome LX, pp. 181-190

MORNEAU F., DUPREZ C., HERVÉ J.-C., 2008. Les forêts mélangées en France métropolitaine. Caractérisation à partir des résultats de l'Inventaire Forestier National. *Revue Forestière Française* tome LX, pp. 117-120

ONF, 2005. Guide des sylvicultures : le hêtre en Lorraine. Direction Territoriale Lorraine, 88p.

SARDIN T., BOCK J., BECQUEY J., 2008. Les peuplements mélangés : enjeux et interrogations des gestionnaires. *Revue Forestière Française* tome LX, pp. 121-128

Typologie et réactivité des perches de hêtre et de chêne en forêt hétérogène

La recherche d'éléments de diagnostic des perches permettant de prédire leur dynamique de croissance et leur évolution qualitative sous l'effet d'une éclaircie est une préoccupation forte des gestionnaires en futaie hétérogène. Elle est d'ailleurs commune à toutes les sylvicultures qui nécessitent de repérer les tiges de qualité, parfois très précocement, afin de travailler à leur profit. Nous présentons ici les résultats d'une étude sur la morphologie des perches de hêtre et chêne dans des peuplements multi-strates. Cette étude se poursuit par des expérimentations de « libération » de perches afin d'évaluer leur réactivité sur une période de 5 à 8 ans.

L'établissement d'un diagnostic du potentiel d'avenir d'une tige dans les jeunes stades de développement constitue une préoccupation importante pour les gestionnaires forestiers. La phase de désignation de tiges d'avenir ou de tiges objectif, particulièrement délicate, constitue une étape clé qui engage la dynamique et la qualité future des peuplements. Cette étape, relativement bien définie dans le temps en futaie régulière, se révèle plus diffuse en peuplement hétérogène. Par exemple, dans le cas des futaies irrégulières, à chaque passage en coupe des arbres sont récoltés et d'autres prélevés au profit de tiges de meilleure qualité (amélioration). A cette occasion, certaines perches jugées intéressantes sont repérées et éventuellement favorisées par l'enlèvement d'un ou de plusieurs concurrents directs (rappel de la définition des perches : $7,5 \text{ cm} \leq \text{diamètre} < 17,5 \text{ cm}$, soit les classes de diamètre 10 et 15). Mais comment identifier une telle perche d'avenir et sur quels critères objectifs ?

Problématique : comment diagnostiquer le potentiel de réactivité en croissance et en qualité de perches en futaie hétérogène ?

La plupart du temps, le forestier juge le potentiel d'avenir des individus sur la base de critères morphologiques simples, directement appréhendables sur le terrain : proportion de houppier vivant, rapport entre hauteur et diamètre (facteur d'élanacement), présence de fourches, présence de gourmands, rectitude du tronc. Ces critères sont reconnus comme étant plus ou moins directement liés à la vigueur et la qualité future des tiges. Cependant le choix définitif s'avère encore bien subjectif et les seuils utilisés (ex. au moins $\frac{1}{4}$ de houppier vivant) demeurent arbitraires. Comment juger ensuite de la nécessité d'intervenir au profit des tiges repérées ? En système irrégulier cette question est le plus souvent formulée en terme de durée pendant laquelle une tige peut rester en phase d'attente ou de compression sans que son avenir soit remis en cause. Là encore, les critères utilisés (ex. croissance apicale) paraissent insuffisants pour permettre de bien ca-

ractériser la réactivité des perches suite à une phase de compression verticale prolongée.

L'objectif de l'étude menée dans le cadre du projet « Bases d'une gestion durable des hêtraies mélangées : démographie, écophysiologie et démogénétique des espèces constitutives » était de progresser sur notre capacité à prédire l'évolution à court terme (5-8 ans) de la croissance et de la qualité de perches au sein de peuplements feuillus multi-strates après réduction ou non de la compétition locale. Le choix de focaliser ce travail sur des peuplements hétérogènes en structure était motivé par la constatation d'un déficit important de connaissances sur la croissance des jeunes stades de développement dans ce type de peuplement. La première étape a consisté à définir des morphotypes (types de morphologies) à partir de descriptions détaillées de plusieurs centaines de perches situées dans des hêtraies et hêtraies-chênaies du nord de la France. La deuxième étape a consisté à mettre en place des expérimentations sur différents sites pour suivre la dynamique de croissance et l'évolution de la qualité de perches

libérées et de perches témoins appartenant aux différents morphotypes. Nous présentons les résultats de l'étude des morphotypes pour le hêtre et le chêne sessile. Pour les expérimentations, les résultats présentés sont préliminaires (une seule année de recul) et ne concernent que le hêtre, première essence modèle étudiée dans notre dispositif.

Première étape : est-on capable de définir des types morphologiques de perches ?

Méthodologie

Les peuplements concernés sont des futaies irrégulières ou d'anciens taillis-sous-futaie convertis ou en cours de conversion en futaie régulière dominés dans l'étage principal par le hêtre et les chênes sessile/pédunculé. Les tableaux 1 et 2 résument les caractéristiques des peuplements étudiés pour les deux essences. Sur chaque site, les perches ont été inventoriées et qualifiées selon la typologie Franche-Comté (projet Life ; Allegrini 2004) : perche d'avenir, récupérable, douteuse ou nulle. Lors de cet inventaire, les perches présentant des cimes sèches ou des défauts trop importants (ex. plus de 25 gourmands sur 4 mètres) ont été exclues. Les perches étudiées ont ensuite été sélectionnées de manière aléatoire en veillant à équilibrer les effectifs selon les catégories de la typologie Franche-Comté. Cette approche nous a permis d'obtenir une grande diversité de morphologies de perche au sein de chaque site. Plus de 800 perches de hêtre réparties dans 15 parcelles (dont 2 en forêt privée) et plus de 400 perches de chêne sessile réparties dans 7 parcelles (dont 1 en forêt privée) ont ainsi été décrites pour les variables suivantes : hauteur totale, circonférence à 1,30 m, hauteurs d'insertion des quatre premières branches séquentielles¹ vivantes, hauteur de base du houppier, hauteur de la fourche la plus basse et nombre total de fourches, écart à la verticalité sur

quatre mètres², nombre de gourmands et de branches gourmandes sur quatre mètres, hauteur de la branche gourmande la plus basse, surface de projection du houppier. Les données ont été ensuite traitées par des méthodes d'analyses descriptives multivariées (Analyse des Composantes Principales, Analyse Hiérarchique Ascendante), nous permettant de distinguer différents

types morphologiques et finalement de construire des clés typologiques.

Le cas du hêtre

La clé typologique obtenue pour le hêtre (figure 1) repose sur un nombre limité de variables : la proportion de houppier vivant, la proportion de la tige présentant des branches isolées sous le houppier (cf. encadré), la présence d'une fourche sur les 3 pre-

Sites peuplements hêtre			Surface terrière totale (hors perches en m ²)	% Surface terrière GB-TGB	% Surface terrière BM	Hauteur moyenne GB-TGB	Nombre de perches décrites
Forêt	Dépt ^t	Parcelle					
Abbé Val-Joly	59	61-81	18,6	69 %	7 %	24,7	71
Ageville	52	26	27,8	44 %	41 %	29,9	72
Arc-en-Barrois	52	120	16,3	46 %	40 %	24,6	68
Bride	57	22	20,9	64 %	25 %	29,1	72
Bride	57	65	25,6	84 %	9 %	30,8	72
Chateaufvillain	52	123	14,7	48 %	42 %	22,0	51
Grand Poiremont	70	15	28,3	49 %	39 %	31,6	71
La Chapelle-Guillaume	28	7-8	27,3	29 %	62 %	28,2	71
La Havetière	08	19	21,8	49 %	33 %	25,4	72
Luxeuil	70	45	21,3	73 %	23 %	31,9	72
Quiquengrogne	88	13	21,7	55 %	36 %	30,2	68
Saint-Aubin du Cormier	35	83-84	35,0	50 %	42 %	34,3	72

Tab. 1 : caractéristiques des peuplements étudiés pour la phase de d'étude des morphologies des perches de hêtre ; en italique les peuplements ayant fait l'objet d'une expérimentation

Sites peuplements chêne			Surface terrière totale (hors perches en m ²)	% Surface terrière GB-TGB	% Surface terrière BM	Hauteur moyenne GB-TGB	Nombre de perches décrites
Forêt	Dépt ^t	Parcelle					
Bois du Château	71	1 et 3	14,9	47 %	28 %	24,0	49
Dreux	28	170	20,2	16 %	44 %	23,0	56
Courcelles sur Blaise	52	1 et 2	17,8	70 %	24,4 %	26,1	64
Orléans	45	38A	22,0	67 %	20 %	24,8	57
Premery	58	37	17,7	66 %	27 %	26,0	72
Thoux	45	3	18,4	25 %	46 %	22,2	62
Villefermoy	77	111	14,6	56 %	12 %	25,1	56

Tab. 2 : caractéristiques des peuplements étudiés pour la phase de d'étude des morphologies des perches de chêne sessile ; en italique les peuplements ayant fait ou qui feront l'objet d'une expérimentation

¹ Une branche séquentielle est une branche qui se développe l'année qui suit la mise en place du bourgeon. Une branche gourmande (longueur de plus de 75cm) est issue du développement d'un bourgeon resté latent pendant au moins une année consécutive à sa formation.

² Seulement pour le hêtre

miers quarts de la tige, la présence de branches gourmandes sur les 4 premiers mètres. Ces variables permettent de différencier huit morphotypes.

Le cas du chêne

Pour le chêne, le nombre de morphotypes obtenu est plus réduit (figure 2). Les cinq types de perches se distinguent suivant les valeurs prises par les variables suivantes : proportion de houppier vivant, hauteur relative de la première branche séquentielle et hauteur relative de la première fourche. La présence d'une branche gourmande en dessous de la première branche séquentielle permet de distinguer deux sous-types. La clé typologique retenue pour le chêne s'avère un peu moins performante que pour le hêtre (elle rend moins bien compte du classement des types obtenu par l'analyse statistique).

Synthèse : quelle pertinence a priori de ces types morphologiques ?

Ces deux clés présentent deux caractéristiques intéressantes. Premièrement, les variables retenues sont relativement aisées à appréhender et à estimer sur le terrain, à l'exception peut-être de la distinction branche séquentielle/branche gourmande qui demande de la pratique et une formation auprès de personnes déjà rompues à cet exercice. Deuxièmement, ces variables peuvent être interprétées, pour la plupart, comme des indices de vigueur ou des critères de qualité. Parmi les indices de vigueur nous citerons : la proportion de houppier vivant, la hauteur relative de la première fourche. Les variables identifiées permettent également d'apprécier certains processus dynamiques liés à l'intensité de la compétition actuelle ou passée. La présence de branches isolées sous le houppier indique un processus en cours ou récent d'élagage et la présence de branches gourmandes un stress passé. En revanche, les seuils fournis pour chaque variable sont difficilement interprétables et leur pertinence au regard de leur réactivité à

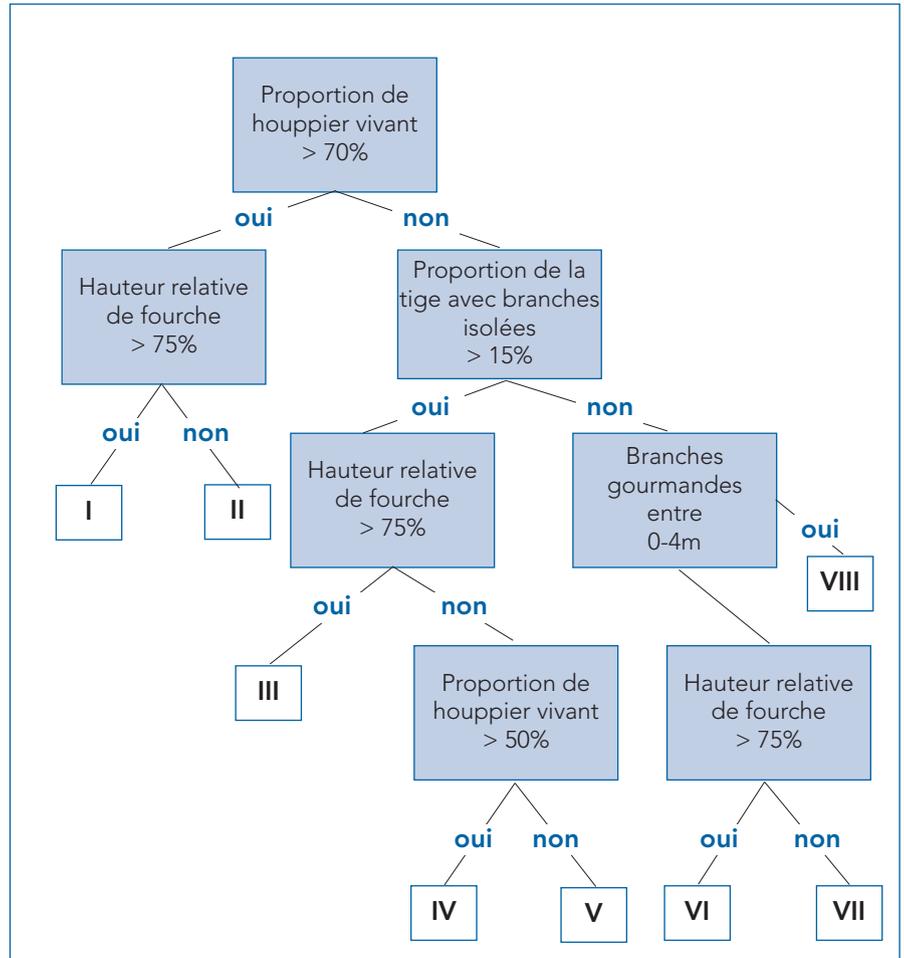


Fig. 1 : clé typologique des morphotypes de hêtre

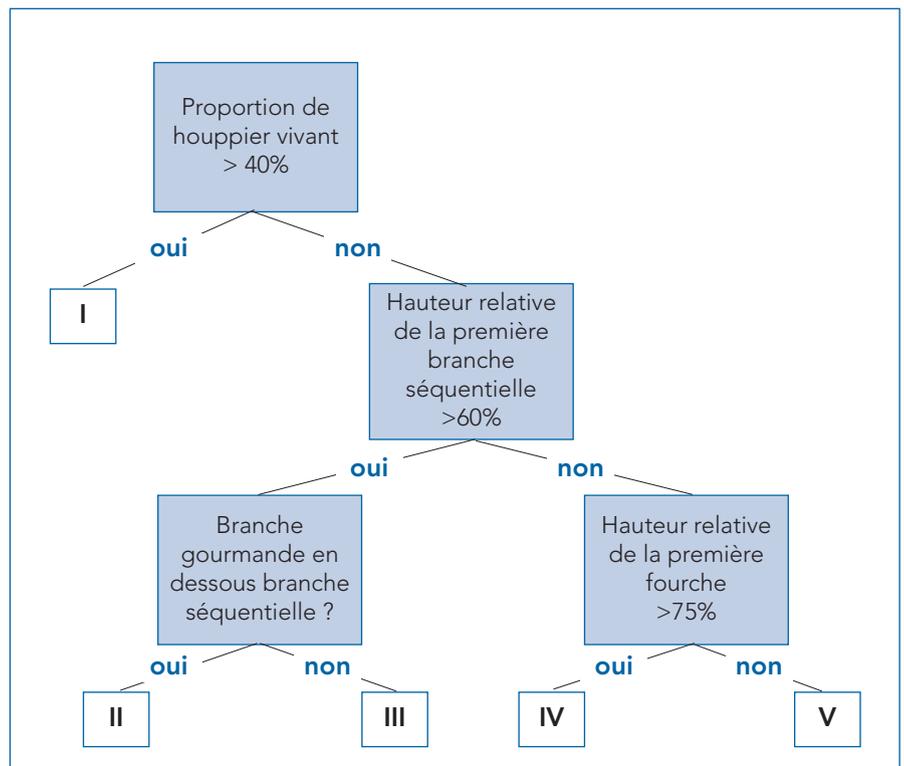


Fig. 2 : clé typologique des morphotypes de chêne

une éclaircie reste sujette à caution. Si le seuil de 70 % de proportion de houppier vivant s'avère efficace aujourd'hui pour classer nos perches de hêtre, est-ce réellement pertinent en terme de potentiel de réactivité ? La mise en place d'expérimentations était donc nécessaire pour juger de la pertinence de ces seuils et des morphotypes identifiés.

Deuxième étape : des expérimentations pour évaluer la réactivité des perches à une intervention ciblée ? Le cas du hêtre

Méthodologie

Sur quatre sites, des perches de différents types (déterminés avec la clé typologique) ont été sélectionnées et libérées de la concurrence par des éclaircies localisées (photo). Pour ces éclaircies, un mode opératoire commun à tous les sites a été appliqué : les 3 ou 4 compétiteurs³ les plus importants sont coupés ainsi que les tiges de diamètre inférieur à 27,5 cm dont le houppier pénètre la projection du houppier de la perche. Des perches témoins ont également été sélectionnées pour pouvoir comparer l'évolution des perches libérées à celle de perches n'ayant pas eu d'intervention à leur profit. Le choix des perches et du traitement (témoin/libérée) s'est fait de manière aléatoire avec la contrainte d'une distance minimale de 18 m entre perches. En raison de dégâts occasionnés aux perches

lors de l'abattage des tiges concurrentes (tâche délicate), dix perches ont été retirées du dispositif expérimental. La ventilation du nombre de tiges expérimentées pour le hêtre entre les types et les traitements dans les différents sites est fournie dans le tableau 3. Les variables mesurées sur chaque perche se rapprochent de celles utilisées dans le cadre de l'étude des morphotypes. Toutefois, des mesures plus fines de la projection du houppier, de la sinuosité du tronc ainsi que des types de formations épécormiques ont également été menées afin d'améliorer le suivi de certaines caractéristiques (ex. surface projetée du houppier, rectitude des tiges, apparition/disparition de formations épécormiques).

Observations sur les âges

Le forestier ne peut raisonnablement accéder à l'âge des arbres. Or cette variable est susceptible d'agir sur la réactivité des perches après éclaircie. Il convenait donc, dans un premier temps, de déterminer la gamme des âges des perches présentes sur chaque site. Le comptage des cernes a été effectué sur des rondelles de souches prélevées sur des perches concurrentes coupées lors de la phase de libération. La figure 3 représente les âges moyens et la variabilité des âges obtenus sur les différents sites (environ 30 rondelles par site). On constate que de manière générale les perches sont âgées, voire très



ONF

Perche de hêtre libérée sur le site du Grand Poiremont

âgées. Le site de Bride se démarque nettement par une forte variabilité des âges et l'existence de perches pouvant dépasser cent ans⁴. À l'opposé, les perches de La Havetière sont plus jeunes et présentent une faible variabilité (même cohorte). Afin de mieux évaluer un éventuel effet de l'âge des perches sur leur réactivité, il est prévu, en fin d'expérimentation, d'effectuer des carottages et des analyses de tige sur un échantillon des perches étudiées (processus destructif). Au-delà de la réactivité à court terme, le problème de l'appréciation de l'âge des perches pourrait aussi concerner le risque d'apparition ultérieure du cœur rouge (dépréciation commerciale), mais cela dépasse le champ de notre étude, d'autant que les mécanismes qui sous-tendent la corrélation actuellement constatée entre l'âge et la proportion de cœur rouge restent à éclaircir.

Réactivité de la croissance : résultats après une année d'expérimentation

Il s'agit de résultats tout à fait préliminaires, car nous ne disposons à ce jour que d'une seule année de recul. Sur tous les sites, les perches de

	Type de perche								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	Total
Ageville	0/0	0/0	0/0	0/0	1/3	6/6	5/4	0/0	25
Bride	4/4	4/4	3/3	2/3	0/0	2/1	2/2	4/4	42
La Havetière	4/4	3/6	4/5	2/5	0/0	0/0	0/0	1/2	36
Grd Poiremont	5/5	3/3	5/5	4/4	4/5	4/5	5/5	5/5	72
Total	13/13	10/13	12/13	8/12	5/8	12/12	12/11	10/11	175

Tab. 3 : ventilation du nombre de tiges en fonction du site, du type de perche et du traitement (libérée/témoin) pour le hêtre

³ Les compétiteurs sont classés selon un indice de compétition qui combine le diamètre du compétiteur et sa distance à la perche.

⁴ sur ce dernier point ce n'est vraisemblablement pas un site exceptionnel ; ainsi sur le site d'étude de Saint Aubin du Cormier les perches ont en moyenne 100 ans, la perche la plus jeune ayant 82 ans et la plus vieille 113 ans

hêtre ont, en majorité, réagi fortement aux éclaircies dès leur première année de libération. La figure 4 donne un exemple de résultat obtenu pour les perches du site de la Havetière. Sur tous les sites expérimentés on peut observer des différences importantes d'accroissement sur le rayon entre perches libérées et perches témoins (cf. tableau 4). Excepté le cas du site du Grand Poiremont, une proportion importante de perches libérées présente même plus de 4 mm d'accroissement sur le rayon ce qui équivaut pratiquement aux effets attendus d'un détournement en futaie régulière. Une première analyse par type, qui contrôle les différences de potentiel de croissance entre sites, révèle que le type II (grand houppier et présence d'une fourche basse) se distingue déjà nettement des autres en terme de croissance radiale. Comme attendu, les types III et V (houppiers moins développés) présentent, en moyenne, les plus faibles accroissements. Aucune différence significative n'apparaît entre types pour les perches témoins. Ces premiers résultats, bien que très partiels, sont encourageants pour la suite de l'étude, car d'ores et déjà une première différenciation entre types des perches libérées apparaît. Des résultats plus robustes pourront être obtenus sur la croissance et la qualité dans les trois prochaines années.

Vers des modèles de réactivité des perches tous traitements confondus ?

La détermination des morphotypes et l'étude de leur réactivité à court terme devraient permettre d'obtenir des premiers éléments sur les critères de choix des perches à favoriser en futaie irrégulière. Ces résultats devraient également permettre d'améliorer la modélisation de la dynamique des perches dans ces peuplements à structure complexe. Un objectif de recherche à plus long terme des équipes de recherche de l'INRA et du Cemagref consiste à essayer d'élaborer pour le chêne et le

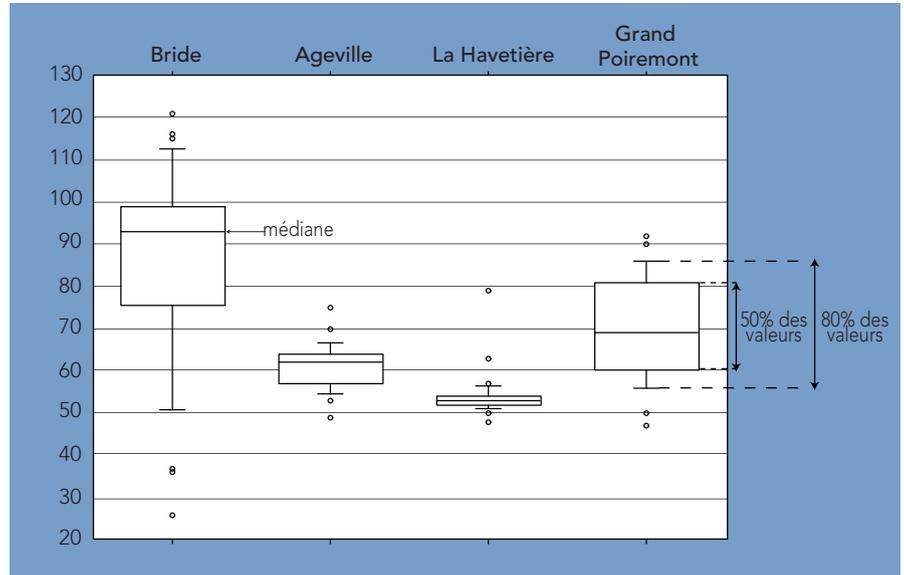


Fig. 3 : estimation de l'âge des perches de hêtre sur les quatre sites expérimentés

Les données sont représentées par des boîtes à moustache : la médiane est repérée par une barre horizontale dans le rectangle ; 50 % des données sont contenues dans le rectangle et 80 % des données sont comprises entre les petites barres horizontales. Les points indiquent donc des valeurs extrêmes.

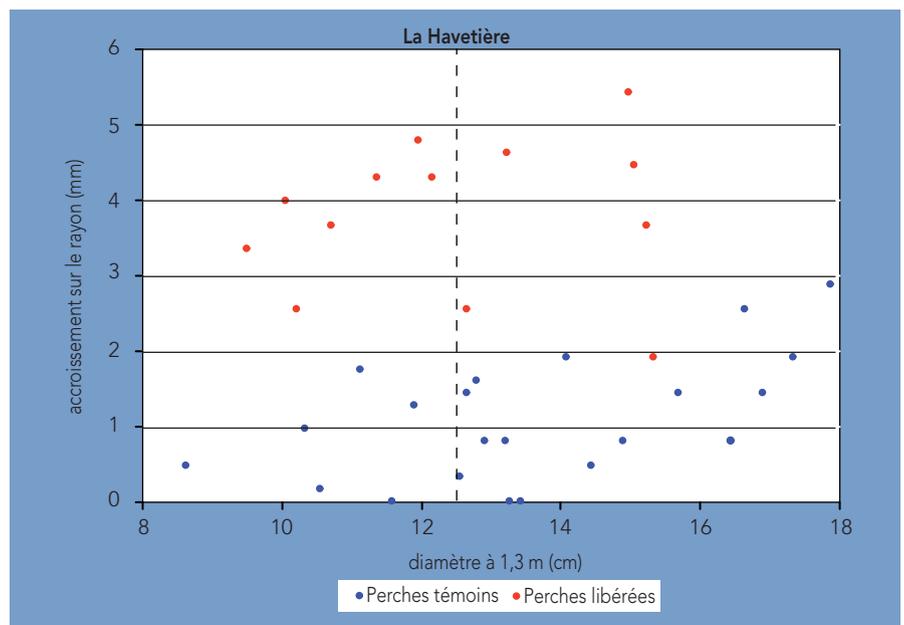


Fig. 4 : accroissement sur le rayon en fonction du diamètre à 1,30 m (mesuré fin 2007) pour les perches témoins et les perches libérées sur le site de la Havetière

La ligne en tiret sépare les perches de classe de diamètre 10 et 15.

Classes d'accroissement sur le rayon en mm						
	0-1	1-2	2-4	4-6	> 6	Total
Nb de perches libérées	9	11	36	22	4	82
Nb de perches témoin	64	20	9	0	0	93
Total	73	31	45	22	4	175

Tab. 4 : répartition des perches libérées et témoin (tous sites confondus) selon leur accroissement sur le rayon

hêtre des modèles de réactivité qui puissent être appliqués à tout type de structure et pour différents stades de développement (régénération, perches).

Thomas CORDONNIER

Cemagref Grenoble, Unité EMGR
thomas.cordonnier@cemagref.fr

François NINGRE

INRA Nancy, UMR 1092 – LERFoB
ningre@nancy.inra.fr

Alexandre PIBOULE

ONF, Direction Forêt DT Lorraine
alexandre.piboule@onf.fr

Remerciements

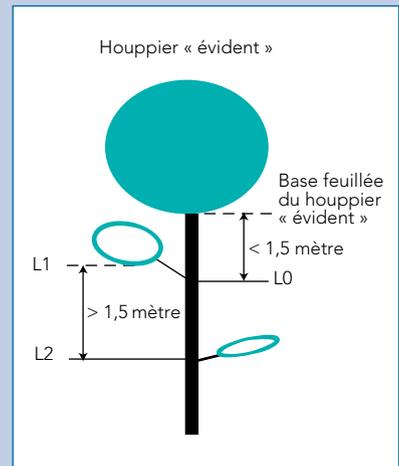
Ces travaux ont été effectués avec le soutien financier de l'INRA (programme ECOGER), de l'ONF (contrat ModelFor) et du FEDER (programme transfrontalier Coforko). Par ailleurs nous voudrions remercier l'ensemble des personnels R & D des directions territoriales ONF ayant participé à ce projet : DT Ile-de-France Nord-Ouest, DT Bourgogne Champagne-Ardenne, DT Centre-Ouest, DT Franche-Comté, DT Lorraine. Un remerciement tout particulier à Bruno Chopard pour son investissement important en animation et coordination dans ce projet.

Référence

ALLEGRIANI C., 2004. Clé de qualification de l'avenir des perches. Forêts de France n° 473, pp. 29-30

Détermination du houppier et des branches isolées

Dans un premier temps on essaie de déterminer un « **houppier vivant évident** » défini par le point de l'arbre au-dessus duquel la plupart des branches séquentielles vivantes et le feuillage sont continus et typiques pour l'espèce. Il est clair que plus l'arbre présente un stade de développement avancé et plus il est facile de définir un tel houppier. On n'hésitera pas à être sévère sur la définition d'un tel houppier.

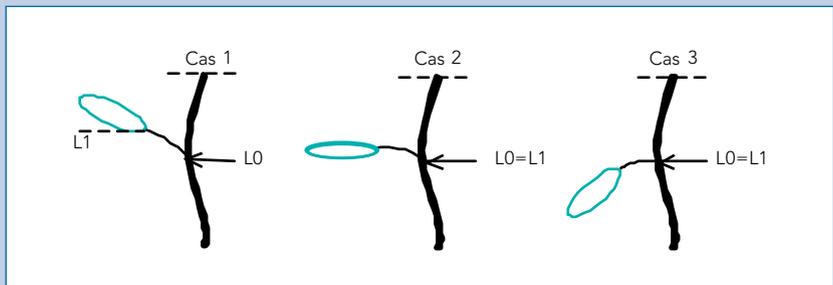


Le houppier évident ayant été défini, on dresse une ligne horizontale imaginaire (en pointillé sur le schéma) passant par le tronc et la base feuillée du houppier évident. Il est alors possible qu'une branche séquentielle vivante soit présente en dessous de cette ligne, son point d'insertion sur l'axe principal étant au niveau noté **L0**.

Ce processus est répété jusqu'à ce que la distance entre cette ligne horizontale et le point d'insertion de la prochaine séquentielle vivante (**L2**) soit supérieure à 1,5 m. La dernière ligne horizontale imaginaire tracée représente la base du houppier vivant (**L1** dans notre exemple). Dans le cas de fourches (vraies ou dissymétriques), le critère 1,5 m s'applique également entre les branches portées par les deux axes. Les branches situées en dessous de ce houppier sont considérées comme des branches isolées.

Si **L0** est à moins de 1,5 m de la base du houppier défini précédemment, on trace une nouvelle ligne horizontale (**L1**) imaginaire passant soit :

- par le tronc et la base du feuillage de cette branche (cas 1) ;
- par le tronc et l'insertion de cette branche (cas 2 et 3).



Les semis préexistants : une composante importante de la régénération dans les hêtraies mélangées

L'une des tendances fortes de la sylviculture actuelle est de chercher à mieux utiliser l'existant. Dans les hêtraies mélangées, les semis préexistants qui se sont développés pendant de longues périodes sous couvert fermé sont très présents dans les régénérations ; pourtant ils sont souvent considérés, en tant que « petits vieux », comme inaptes à participer au renouvellement et parfois éliminés. Qu'en est-il vraiment ? Cet article synthétise les résultats de plusieurs expérimentations menées en Lorraine pour évaluer le potentiel que constituent les semis préexistants pour régénérer un peuplement.

La régénération naturelle, méthode privilégiée pour le renouvellement des peuplements feuillus, met en présence trois types de jeunes arbres : (1) les nouveaux semis, qui ont germé au cours de la phase de régénération et ont rapidement été mis en lumière, (2) les rejets de souche, qui sont apparus suite à la coupe des arbres du peuplement précédent, et (3) les semis préexistants, qui ont germé bien avant l'entrée dans la phase de régénération et qui ont persisté de longues périodes sous le couvert des arbres adultes. L'importance relative de ces trois composantes de la régénération varie selon plusieurs facteurs : l'essence considérée, les conditions stationnelles, l'historique du peuplement et la sylviculture pratiquée.

Une question : peut-on utiliser les semis préexistants dans les régénérations ?

Dans la pratique, les semis préexistants (les « petits vieux ») sont peu utilisés pour former le futur peuplement et le sylviculteur préfère souvent les éliminer, car ils sont réputés

avoir une vigueur insuffisante et/ou présenter des défauts morphologiques importants. Néanmoins, dans un certain nombre de situations, les préexistants constituent une part importante voire l'essentiel de la régénération. Ces situations relèvent principalement de deux types : (1) les situations où le peuplement adulte a été détruit (tempête, dépérissement...) avant l'entrée dans la phase de régénération et où les préexistants et les rejets constituent le seul matériel disponible ; et (2) les situations où la régénération s'effectue sur de longues périodes (certains peuplements irréguliers, contextes de régénération difficile où l'on prévoit des régénérations longues...) pendant lesquelles les semis qui vont former le peuplement futur peuvent être maintenus sous couvert pendant plusieurs dizaines d'années avant d'être progressivement mis en lumière. La caractérisation de la réponse de ces semis à l'ouverture du couvert en termes de survie, croissance et morphologie est nécessaire pour développer des itinéraires sylvicoles permettant d'utiliser au mieux le potentiel offert par ces semis.

Une série d'expérimentations a été menée dans des peuplements feuillus mélangés à base de hêtre sur plateau calcaire en Lorraine, pour caractériser la réponse des semis préexistants à une mise en lumière. Nous verrons en effet que, dans ce type de peuplement, les semis préexistants sont très dynamiques. Dans cet article, nous présenterons les principaux résultats issus de ces expérimentations et nous concluons sur l'utilisation possible -ou non- des semis préexistants pour assurer une bonne régénération de ces peuplements. Nous considérons ici comme préexistant tout semis dont la germination a précédé l'ouverture du couvert de la phase de régénération observée.

Les hêtres et les érables sycomore préexistants dominant la régénération dans les trouées

Un inventaire a permis de caractériser le développement de la régénération naturelle dans des trouées de taille variable (de quelques ares à quelques hectares) créées par la tempête de 1989 en FD du Graoully

Éclairage sous couvert et développement de la régénération

■ Éclairage relatif (Balandier *et al.*, même volume)

Seule une fraction de la lumière incidente passe à travers le couvert adulte et arrive à la régénération. Cette fraction peut être exprimée par l'éclairage relatif (ER) qui est le pourcentage de lumière parvenant sous couvert par rapport à l'éclairage incident au-dessus de la canopée (ER = 100 % en plein découvert). La gamme de rayonnement prise en compte dans cette estimation est généralement le rayonnement photosynthétiquement actif, qui pilote la photosynthèse.

Dans les peuplements comprenant des essences à fort pouvoir ombrageant avec un capital sur pied élevé (typiquement des hêtraies matures), l'ER sous couvert est inférieur à 1 %. Ces niveaux de lumière sont très limitants pour la croissance des végétaux.

■ Développement du hêtre sous couvert (Vinkler *et al.*, 2007)

La *croissance en hauteur* de jeunes hêtres est peu affectée par le couvert adulte pour des valeurs d'ER descendant jusqu'à 25 %. En dessous de ce seuil, la croissance est significativement réduite et elle devient très faible en dessous de 10 %.

La croissance en diamètre est plus sensible à la réduction d'ER que la croissance en hauteur, ce qui implique des plants notablement plus frêles aux faibles éclairages. La *survie* des semis est peu liée à la lumière, pour des valeurs d'ER descendant jusqu'à 15 %. Pour des valeurs d'ER en dessous de 10 %, la probabilité de survie diminue fortement. Néanmoins, aux niveaux les plus faibles rencontrés en hêtraie (ER < 1 %), on rencontre encore de nombreux semis capables de survivre pendant de longues périodes (de l'ordre de 10 à 20 ans). Les *valeurs seuils* d'ER indiquées pour la croissance et la survie varient sensiblement avec les conditions stationnelles, notamment la disponibilité en eau.

Les effets de l'ombrage sur la *morphologie* de jeunes hêtres sont très marqués. En situation de couvert fermé, les semis adoptent une morphologie particulière qui permet de maximiser l'interception de la lumière par rapport à la biomasse investie :

- axes fins, donc peu autoportants, et susceptibles d'affaissement ;
- axes (principal et latéraux) plagiotropes, présentant donc de forts écarts à la verticalité ;
- faible dominance de l'axe principal, souvent fortement concurrencé par les axes latéraux.

Les situations de couvert fermé constituent donc un environnement très défavorable à l'obtention de semis de bonne qualité morphologique. Les seuils d'ER pour lesquels ces changements de morphologie s'opèrent sont pour l'instant mal connus.

■ Développement de l'érable sycomore sous couvert (Hein *et al.*, 2008)

À des niveaux d'ER de 25 %, la *croissance en hauteur* de l'érable sycomore est déjà fortement réduite par rapport au maximum en plein découvert. Cette croissance devient très faible pour des ER inférieurs à 10 %. Les seuils d'ER pour la *survie* de petits semis d'érable (H < 50 cm) sont bas : à ER = 10 % la survie est très élevée et l'on trouve de nombreux semis capables de survivre pendant près de 20 ans à des niveaux d'éclairages encore plus faibles (ER < 1 %). Pour des semis plus grands (H > 1 m), la survie est nettement plus faible aux mêmes éclairages.

Les érables poussant sous couvert fermé développent des *morphologies* particulières avec notamment des axes très fins et non autoportants, et de nombreuses fourches qui résultent de la mort des méristèmes apicaux.

(57) (Piboule, 2005). Le peuplement choisi était un ancien TSF sur plateau calcaire, comprenant de nombreuses essences (par ordre d'abondance décroissante : hêtre, érable sycomore, érable plane, chêne sessile, chêne pédonculé et merisier pour les anciennes réserves, charme, érable champêtre, tilleul, alisier torminal et alisier blanc pour l'ancien taillis). Après la tempête, le peuplement n'a subi qu'un très faible prélèvement et aucun travail n'a été réalisé sur la régénération présente dans les trouées. En 2003, soit 13 ans après la tempête, l'éclairage relatif dans les différentes trouées variait de 20 % à 80 % et la surface terrière totale (trouées incluses) du peuplement était de 25,6 m².ha⁻¹. L'inventaire de régénération (tous les arbres de moins de 5 cm de diamètre) réalisé cette même année a donné les résultats suivants.

■ La densité moyenne des semis était de 60 000 semis ha⁻¹ (toutes espèces confondues), et moins de 3 % des placeaux inventoriés étaient vides (tous situés dans des zones très fermées du peuplement, avec des éclairages relatifs de l'ordre de 1 %). La hauteur moyenne de la régénération variait de 0,15 à 5,5 m. Ces résultats sont en accord avec l'observation courante selon laquelle la régénération est globalement aisée dans ce type de peuplement.

■ Les espèces les plus fréquentes dans la régénération étaient le hêtre (32 % des semis inventoriés), l'érable sycomore (31 %), le charme (23 %), l'érable champêtre (6 %) et l'érable plane (5 %), toutes les autres essences réunies représentant moins de 3 % des semis. En particulier, le hêtre et l'érable sycomore dominaient de manière quasi exclusive les collectifs de régénération de plus de 1,5 m de hauteur, et ceci quelle qu'ait été la taille de la trouée autour du placeau. Ces résultats contredisent l'idée selon laquelle les essences héliophiles dominent la régénération dans les trouées de grande taille.

■ L'ensemble des semis avait entre 2 et 35 ans en 2003, 85 % des semis avaient germé avant la tempête et les semis les plus grands (hêtre et érable sycomore) étaient tous préexistants aux ouvertures.

Nous rappelons que cette étude a été menée dans un TSF vieilli sur plateau calcaire riche en essences mais sans frêne. En présence de frênes adultes, la dynamique des semis aurait probablement été différente, avec notamment une installation possible de jeunes frênes. Les observations sur la dynamique spontanée de la régénération hors travaux nous enseignent que :

- l'ouverture du peuplement sans autres travaux permet d'installer une régénération abondante qui sera dominée par les semis préexistants (âgés de 1 à 25 ans en moyenne) de hêtre et d'érable sycomore ;
- si l'objectif est de régénérer le peuplement en conservant la diversité spécifique existante (13 essences dans le peuplement adulte), ouvrir des trouées de taille variable ne suffit pas pour régénérer en nombre suffisant l'ensemble des essences présentes, et des travaux sur la régénération seront nécessaires pour permettre le bon développement des essences autres que le hêtre et l'érable sycomore. Sans ces travaux, la diversité spécifique existant actuellement sera fortement réduite, en une seule génération.

Élimination des essences associées par les hêtres et les érables sycomore préexistants

Les inventaires effectués ont montré que la banque de semis préexistants dans le peuplement fermé contenait également de nombreux charmes, érables planes et érables champêtres, capables eux aussi de persister sous des faibles niveaux d'éclairage. Or, 13 ans après la création des trouées, ces essences étaient quasi-absentes des taches de régénération ou bien fortement dominées. La question se

pose de savoir quand elles ont disparu (ou quand elles se sont fait dominer) : immédiatement après l'ouverture des trouées car incapables de s'adapter rapidement à leurs nouvelles conditions de croissance, ou bien quelques années plus tard car moins compétitives que le hêtre et l'érable sycomore ? Le stade auquel elles sont finalement éliminées conditionne le type de travaux à envisager pour maintenir leur présence dans le collectif de régénération.

Des taches de régénération situées sous couvert fermé (ER inférieur à 5%) et comprenant du hêtre et les trois érables en mélange ont été sélectionnées. Une ouverture du couvert (ER de l'ordre de 30%) a été pratiquée au-dessus de la moitié de ces taches, l'autre moitié étant maintenue sous couvert fermé. La mortalité et la croissance de tous les semis ont été suivies annuellement. Trois années après l'ouverture, la mortalité des semis situés dans les trouées était faible et la reprise de croissance immédiate, pour toutes les essences (figure 1).

Cette phase d'adaptation aux nouvelles conditions n'a donc pas constitué un filtre vis-à-vis de l'érable plane et de l'érable champêtre. Ces essences seront donc éliminées plus tard, probablement en raison de la compétition exercée par le hêtre et l'érable sycomore qui va devenir plus intense à mesure que les semis grandissent. L'expérimentation en cours sera poursuivie encore quelques années, pour tester cette hypothèse. Nous avons également noté la faible mortalité sous couvert fermé des trois érables, qui confirme bien leur capacité à survivre dans ces conditions de très faible éclairage.

Cette expérimentation suggère que, pour maintenir l'ensemble des essences présentes dans la banque de semis préexistants, il est nécessaire de contrôler le développement des semis préexistants de hêtre et d'érable sycomore les plus grands, qui seront très compétitifs vis-à-vis des autres essences quelques années après l'ouverture du couvert. Cette élimination peut être faite dès l'ouverture.

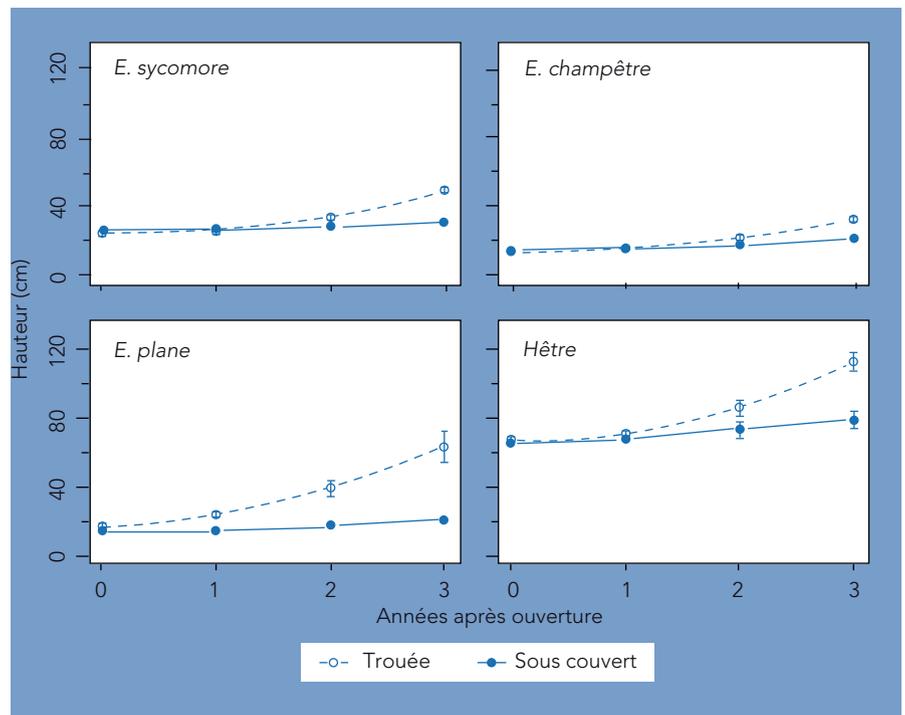


Fig. 1 : croissance en hauteur de semis préexistants de hêtre et d'érable restés sous couvert fermé ou bien mis en lumière (création d'une trouée) Pour toutes les essences, la reprise de croissance en hauteur est significative deux ans après la création des trouées. Forêt du Graouilly (57).

Certains défauts de forme se résorbent après la mise en lumière

Les semis sous couvert fermé développent des morphologies particulières et présentent souvent des défauts de forme importants (voir encadré). Ces défauts paraissent rédhibitoires car ils sont présumés persister après que les semis ont été mis en lumière et ont repris une croissance soutenue. La présence de ces défauts conduit ainsi à l'élimination par le sylviculteur de nombreux semis préexistants dont il estime qu'ils ne pourront jamais former des arbres de qualité satisfaisante. En fait, l'évolution après ouverture du couvert de la morphologie des semis préexistants est inconnue : les défauts observés persistent-ils une fois que les semis ont été mis en lumière ? Pour avancer sur cette question, deux études ont été menées sur hêtre et sur érable sycomore, dans lesquelles nous avons analysé l'évolution, après ouverture du peuplement, des défauts les plus couramment observés sur les préexistants (présence de fourches et grosses branches, défaut de verticalité de l'axe principal).

Amélioration de la forme après ouverture

La première étude (de Boutray, 2005) est basée sur des inventaires réalisés en FD de Saint-Amond (54). Au printemps 2004, deux cents semis de hêtre échantillonnés dans deux parcelles adjacentes, l'une touchée par la tempête de 1999 et l'autre restée indemne ont été décrits. Avant tempête, les peuplements sur les deux parcelles étaient très semblables (peuplement à base de hêtre, $H_o = 33$ m, $G = 27$ m².ha⁻¹). L'âge des semis prélevés variait entre 8 et 30 ans et leur hauteur entre 30 cm et 3 m. Des analyses rétrospectives de croissance ont mis en évidence une bonne reprise de la croissance dans les

quatre années qui ont suivi la mise en lumière pour tous les semis, quels qu'aient été leur âge et leur taille. Nous avons cherché à décrire la réaction des semis en termes de forme à l'aide de quelques variables simples (figure 2). Les semis situés dans la trouée étaient globalement peu inclinés et peu courbés (figure 3). En revanche, les semis restés sous couvert étaient plus penchés et plus courbés, donc avec des silhouettes plus plagiotropes. De plus, les semis mis en lumière montraient sur la partie de la tige mise en place avant 1999 un nombre de fourches et de grosses branches plus faible et avaient un axe principal plus vigoureux et moins concurrencé par des axes latéraux que les semis restés sous couvert (figure 4). En revanche, sur la partie apicale de la tige correspondant à la portion d'axe développée après 1999, le nombre de grosses branches (forcément nouvellement apparues) était plus élevé pour les semis dans les trouées, indiquant que la lumière avait favorisé la production d'axes vigoureux. Cette observation, qui rejoint des résultats classiquement trouvés sur le hêtre, montre que

pour les semis préexistants, tout comme pour les semis nouvellement apparus, il est nécessaire de contrôler l'apparition et le développement des branches dès que les semis se trouvent en pleine lumière, en assurant un gainage latéral des semis par d'autres ligneux.

Ces observations suggèrent un effet bénéfique de la mise en lumière sur l'évolution de la forme des semis. Néanmoins, les analyses rétrospectives telles que nous les avons effectuées sont par nature assez peu performantes quand il s'agit d'évaluer les aspects dynamiques du développement des arbres, et nous avons souhaité consolider ces résultats par une deuxième étude dans laquelle nous avons pu suivre l'évolution de la morphologie de jeunes semis préexistants après ouverture du couvert.

Dynamique du redressement après ouverture

Cette étude a été conduite en FD du Graoully (57) sur des jeunes hêtres et érables sycomores ($0,70$ m < hauteur < $2,5$ m ; 10 ans < âge < 31 ans) suivis pendant quatre an-

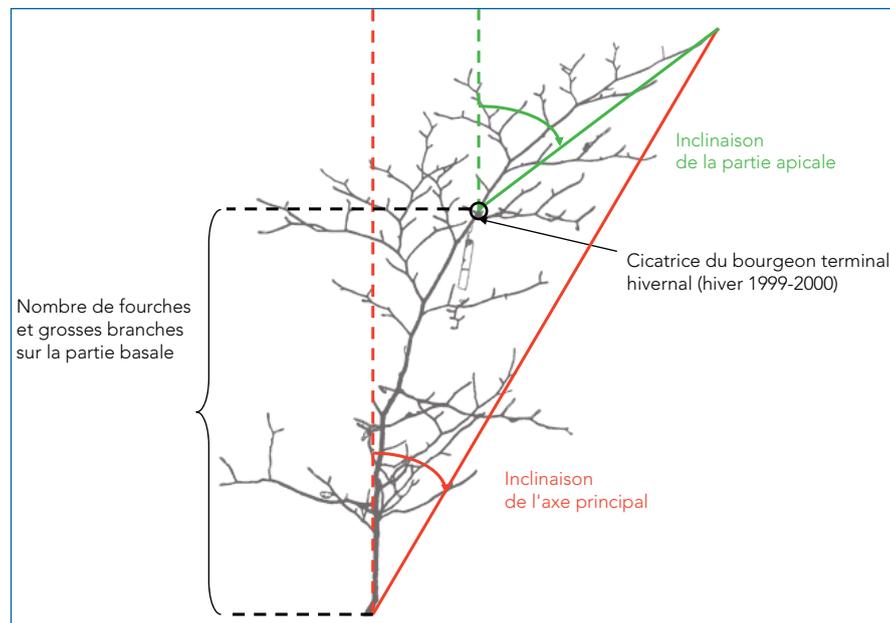


Fig. 2 : variables utilisées pour caractériser la morphologie des semis en 2004, quatre ans après l'ouverture des trouées par la tempête (de Boutray, 2005)

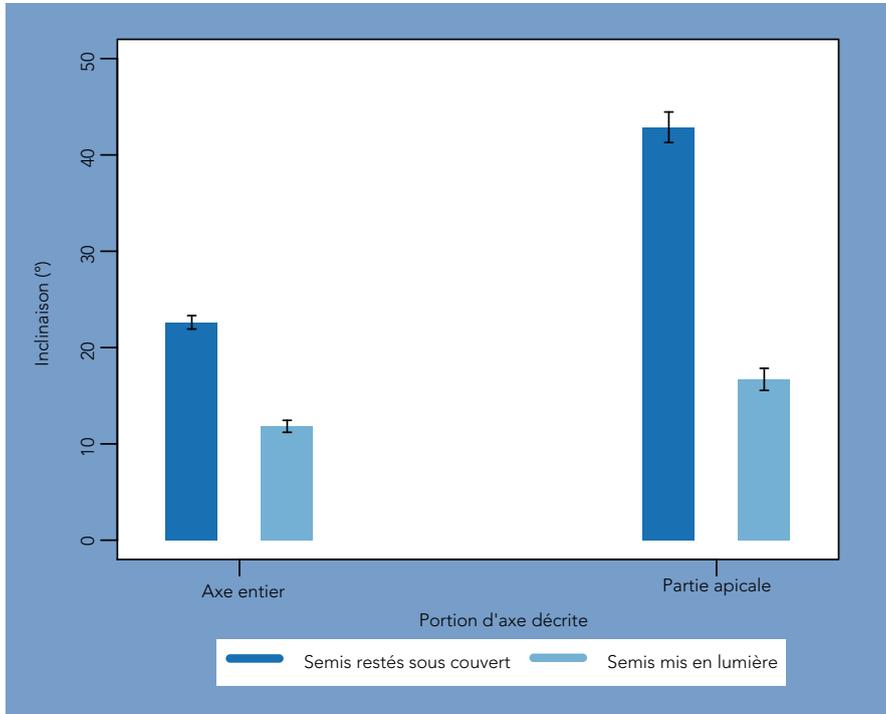


Fig. 3 : inclinaison de l'axe principal estimée 4 ans après la création des trouées sur des semis préexistants de hêtre, restés sous couvert fermé ou bien situés dans les trouées (Forêt de Saint-Amond - 54)

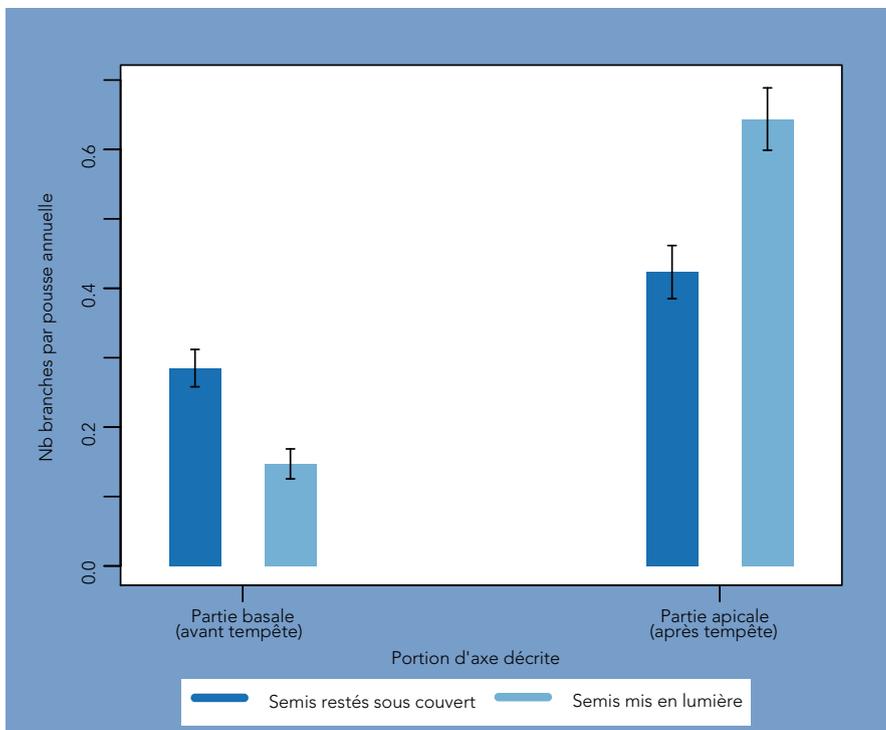


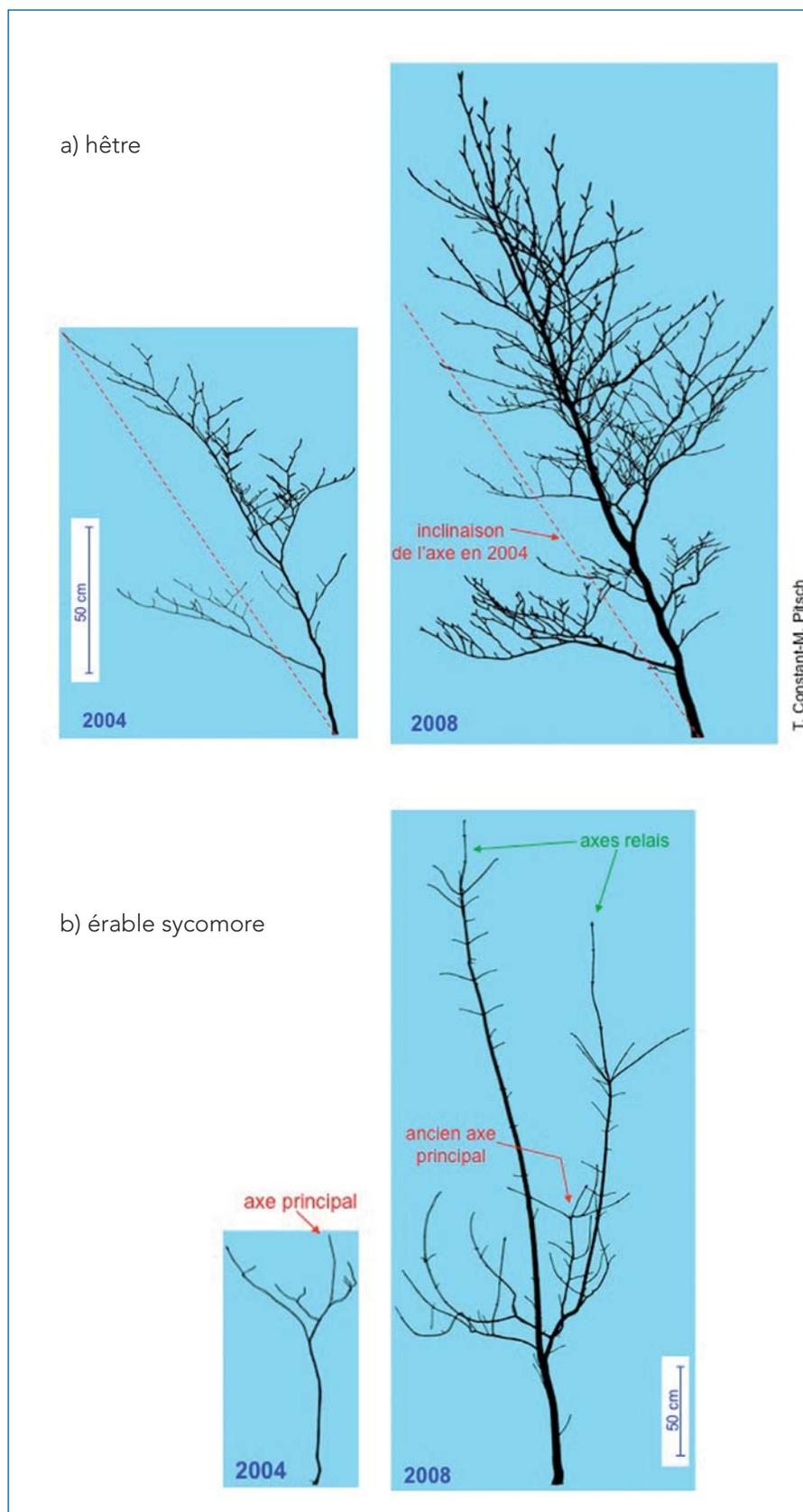
Fig. 4 : nombre de branches latérales observées 4 ans après la création des trouées sur l'axe principal de semis préexistants de hêtre (Forêt de Saint-Amond - 54)

Valeurs moyennes calculées par pousse annuelle classées en 2 parties, basale et apicale, formées respectivement avant et après tempête.

nées après ouverture du couvert (éclairage relatif passant de 3 à 30 %). Après trois ans, les deux essences avaient montré un redressement important de leur axe principal, l'angle par rapport à la verticale étant passé de 32° à 16° pour le hêtre (figure 5a) et de 22° à 12° pour l'érable, en moyenne pour tous les semis. Pour le hêtre, ce redressement était visible dès la première année qui a suivi la création de la trouée. Pour l'érable, il s'est fait plus progressivement et n'a été significatif qu'à partir de la troisième année. De plus, pour l'érable, le retour à une meilleure verticalité a résulté pour un quart des semis de l'apparition de branches verticales très vigoureuses, qui ont pris le relais sur l'axe principal (figure 5b). Pour les semis préexistants qui ont un port parfois fortement plagiotrope, l'acquisition d'une stature plus verticale est une nécessité car, sans elle, le risque d'affaissement de la tige deviendrait de plus en plus important au fur et à mesure que les dimensions du semis augmentent. Ces résultats confirment la capacité de ces deux essences à résorber rapidement certains de leurs défauts morphologiques quand elles reprennent une croissance soutenue.

Utilisation des préexistants pour assurer la régénération

Ces études montrent que les semis préexistants de hêtre ou d'érable réagissent très favorablement à une mise en lumière, même après une longue période de compression sous couvert très fermé : ils reprennent rapidement une croissance forte et leurs défauts de forme se résorbent en partie (pas d'observations sur la forme de l'érable plane et de l'érable champêtre). Sur le plan de la croissance, il apparaît très clairement que presque tous les semis réagissent bien, quels que soient leurs dimensions et leur âge (dans une gamme allant jusqu'à 30 ans)



T. Constant-M. Pfisch

Fig. 5 : semis préexistants de hêtre (a) et érable sycomore (b), avant et quatre ans après ouverture (Forêt du Graoully - 57)

Pour chaque essence, deux photos du même semis à la même échelle et prises du même point de vue. Pour le hêtre il faut observer le redressement de la partie apicale de l'axe principal et pour l'érable sycomore l'apparition de branches relais verticales.

au moment de l'ouverture. En revanche, sur le plan de la forme, il est probable que les défauts les plus marqués (très grosse fourche, fort écart à la verticalité) ne disparaissent que partiellement et pour l'instant nous ne sommes pas en mesure de définir des seuils d'intensité des défauts à partir desquels les défauts persisteront après ouverture. Une fois mis en lumière, les préexistants se comportent comme les semis nouvellement apparus et nécessitent une compression latérale pour contrôler l'apparition de nouveaux défauts. **Dans les hêtraies pures ou mélangées, la banque de semis préexistants étant généralement abondante, elle constitue ainsi un matériel intéressant pour renouveler les peuplements.** Cette banque pourra être utilisée différemment selon le contexte dans lequel se fait la régénération. Dans de nombreux cas, elle permettra d'élargir le champ des itinéraires sylvicoles envisagés.

Dans des contextes d'après tempête, les préexistants constituent souvent une part importante des semis présents (van Couwenberghe et al. 2008). Dans la mesure où ils ne présentent pas de défauts de forme très marqués, ils permettent d'assurer la reconstitution du peuplement même dans les situations où les nouveaux semis sont peu abondants (année de faible fructification). Le recours aux préexistants permet ici d'envisager de suivre des itinéraires basés sur la dynamique de succession naturelle, en évitant des travaux d'installation lourds (travail du sol, plantation).

Dans le cadre d'un scénario de futaie régulière, les préexistants pourraient également être mieux utilisés et apporter ainsi plus de souplesse au système des coupes de régénération. L'utilisation de préexistants peut en effet permettre de raccourcir la durée de régénération conformément aux nou-

veaux itinéraires développés pour le hêtre (Armand et Ningre 2002, ONF, 2005, 2008), tout d'abord en levant la nécessité d'attendre une bonne fructification mais aussi, en fournissant des semis qui ont déjà des dimensions leur permettant de s'affranchir plus rapidement des aléas auxquels sont soumis les jeunes arbres (notamment la compétition exercée par la végétation accompagnatrice, ou l'abroussement dans le cas de l'érable sycomore). Inversement, le recours aux préexistants permet aussi de rallonger la durée de régénération notamment dans le cas où on souhaiterait limiter les sacrifices d'exploitabilité au niveau du peuplement adulte, car les semis peuvent attendre sous le couvert adulte sans trop perdre de leurs potentialités. Ainsi, en utilisant le potentiel que représente la régénération préexistante, le sylviculteur est moins directement dépendant des fructifications pour engager une régénération dans une parcelle, et il peut plus facilement envisager des itinéraires sylvicoles qui s'affranchissent des contraintes liées à la périodicité des fructifications.

Dans les peuplements de structure irrégulière, les semis préexistants sont utilisés de manière courante, mais leur dynamique est souvent un peu différente de celle présentée jusqu'ici. La phase de compression des semis est habituellement longue. Néanmoins les peuplements sont maintenus, par des éclaircies régulières, à des niveaux de surface terrière assez faibles. On peut alors penser que, même si leur croissance est réduite, les semis bénéficient d'un éclaircissement suffisant pour croître régulièrement en attendant d'être mis en lumière lors de la récolte d'un gros bois voisin. Le recours aux préexistants est plus systématique en futaie irrégulière, mais il est également plus aisé du fait de la compression verticale moins forte généralement subie par ces semis.

Dans les hêtraies mélangées, les semis préexistants de hêtre et érable sycomore sont très vigoureux dès qu'ils sont mis en lumière et se révèlent généralement très compétitifs vis-à-vis des autres essences qu'ils éliminent alors rapidement. Cette dynamique est liée à la forte compétitivité générale de ces essences qui est, de plus, fortement accentuée par l'avance en terme de taille que possèdent ces semis sur leurs voisins nouvellement apparus. Dans toutes les situations où le sylviculteur souhaite promouvoir la diversité des essences du peuplement, **il est impératif de contrôler strictement le développement des semis préexistants**, avant ou bien immédiatement après l'ouverture du couvert.

Catherine COLLET

François NINGRE

Thierry CONSTANT

INRA/AgroParisTech Nancy, UMR

1092 – LERFoB

collet@nancy.inra.fr

ningre@nancy.inra.fr

constant@nancy.inra.fr

Antoine DE BOUTRAY

(anciennement LERFoB)

ONF, Agence de Fontainebleau

antoine.de-boutray@onf.fr

Alexandre PIBOULE

(anciennement LERFoB)

ONF, Direction Forêt DT Lorraine

alexandre.piboule@onf.fr

Remerciements

Ces travaux ont été effectués avec le soutien financier de l'INRA (programme ECOGER), de l'ONF (contrat ModelFor) et de la Région Lorraine (programme Jeune Équipe 2005).

Bibliographie

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

de BOUTRAY A., 2005. Effets de la mise en lumière sur la croissance et la forme de semis préexistants de hêtre (*Fagus sylvatica* L.). Mémoire de 3^e année FIF, ENGREF.

HEIN S., COLLET C., AMMER C., LE GOFF N., SKOVSGAARD J.P., SAVILL P., 2008. A review of growth and stand dynamics of *Acer pseudoplatanus* L. in Europe : implications for silviculture. *Forestry*, vol. 22 n° 4, pp. 341-385 ; doi : 10.1093/forestry/cpn043

ONF, 2005. Guide des sylvicultures. Le hêtre en Lorraine. ONF, 88p.

ONF, 2008. Guide des sylvicultures. La hêtraie Nord-Atlantique. ONF, 154p.

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

VAN COUWENBERGHE L., LACOMBE E., GONIN P., MENGIN A., 2008. Les observatoires de dynamiques naturelles après tempête, Forêt-Entreprise n°183 pp. 33-36

VINKLER I., NINGRE F., COLLET C., 2007. Comportement du hêtre sous abri : les intérêts d'une bonne gestion du couvert. Rendez-vous Techniques de l'ONF, hors-série n° 2, pp. 48-58

Dynamique des forêts mélangées sur le Mont-Ventoux : effets de l'altitude et de la gestion

Révolution permanente sur les flancs du Géant de Provence : les essences forestières se déplacent, glissent les unes sous les autres, formant divers mélanges instables, déterminés à la fois par les facteurs stationnels et par la compétition. Deux arbitres dans cette mêlée : le Sylviculteur, qui tire parti autant que possible de ces dynamiques naturelles, en essayant de les orienter, et le Climat, avec une tendance au réchauffement dont les conséquences forestières transparaissent sur le gradient d'altitude des deux versants du Ventoux

Des dynamiques en partie contradictoires...

Comme un peu partout dans l'arrière-pays méditerranéen français, l'une des évolutions forestières les plus marquantes sur le Mont-Ventoux est la dynamique de maturation au sein du complexe pineraies-hêtraie-sapinière à l'étage montagnard, entre 1000 et 1600 m environ (Courdier *et al.* 2005, Dreyfus, 2007) : depuis des décennies, on constate l'apparition ou la réapparition du hêtre et du sapin pectiné sous les peuplements de pins issus essentiellement des boisements de Restauration des Terrains en Montagne. Colonisateur efficace (Dreyfus *et al.* 2005), le hêtre joue dans ce contexte un rôle majeur qui tend à lui donner une place de plus en plus importante en région méditerranéenne (Ladier *et al.* 2007) dans les limites permises par les évolutions climatiques en cours. Cette dynamique progressive marque la réussite de la restauration écologique engagée par la campagne RTM. Cependant, elle complique la tâche du gestionnaire forestier qui souhaite pérenniser les pineraies noires bienvenues et craint de ne pouvoir les régénérer. Sur le versant nord du Ventoux, le sapin pectiné occupe une place



H. Davi, INRA

Hêtre colonisant une futaie de pin noir

assez similaire à celle du hêtre, avec lequel il cohabite souvent. Il est très affecté par les sécheresses ou canicules sévères de cette décennie ; son expansion ne semble pas remise en cause à court terme dans les parties hautes, mais la dynamique de régression qui apparaît à basse altitude dans son aire locale peut contrecarrer et même inverser sa dynamique expansive sous pineraies.

Ces dernières années, les recherches de l'INRA URFM (Avignon) se sont focalisées sur les conséquences du changement climatique. En particulier, la dynamique d'expansion du hêtre et du sapin est étudiée, avec l'ONF, depuis une dizaine d'années (Dreyfus *et al.* 2004, Courdier *et al.* 2005, Pichot *et al.* 2006), depuis la description et la compréhension du phénomène jusqu'à sa modélisa-

tion et sa simulation à des fins prédictives. Le projet « Bases d'une gestion durable des forêts mélangées » (BGDFM) soutenu de 2005 à 2008 par le programme « Écologie pour la gestion des écosystèmes et de leurs ressources » (ECOGER, financé par l'INRA) a fourni récemment des connaissances complémentaires sur l'influence des facteurs écologiques et sur le rôle joué par les interventions humaines. Nous présentons ici une analyse de la situation étudiée sur le Mont-Ventoux, et certains résultats susceptibles d'aider les décideurs en matière de gestion sylvicole.

L'étagement altitudinal des essences et le choix des essences objectif

Il est difficile de distinguer l'influence du climat de celle de l'Homme, qui a toujours tenu compte de la tendance naturelle des essences à se répartir par étages de végétation sur les versants montagneux. Plus généralement, la gestion forestière s'appuie sur les connaissances de l'adaptation des essences aux conditions stationnelles, issues de l'expérience de terrain ou acquises par la recherche.

Le contexte écologique du Mont-Ventoux et des autres montagnes de l'arrière-pays méditerranéen montre à la fois des influences méditerranéennes et des caractéristiques topographiques et climatiques montagnardes. L'opposition adret-ubac et la gamme d'altitude induisent des situations climatiques variées (figure 1) en terme de températures comme de précipitations, conditions auxquelles les essences sont plus ou moins adaptées et dont elles s'accommodent différemment selon les compensations édaphiques.

À l'époque des reboisements RTM, le choix des essences plantées a été fait en fonction de leur « tempérament », tel qu'il était révélé

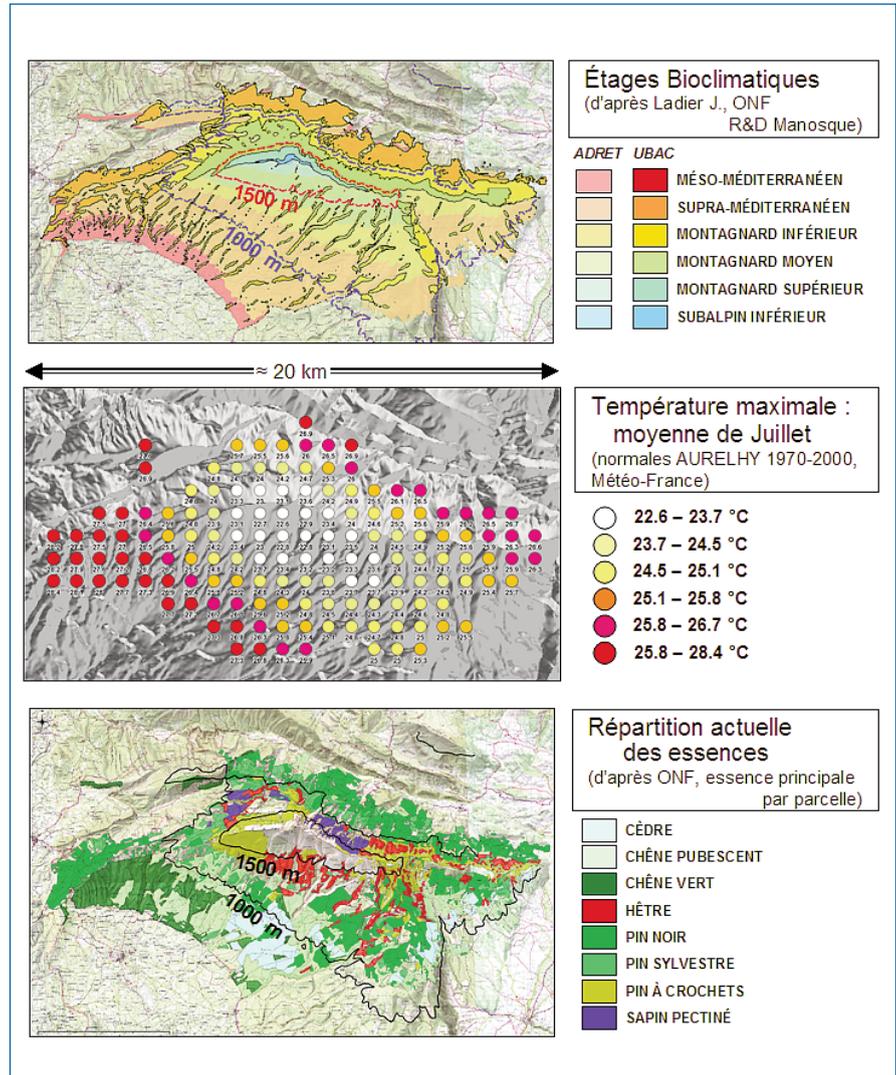


Fig. 1 : répartition altitudinale des conditions climatiques et des essences principales sur le Mont Ventoux

La gamme d'étages bioclimatiques représentés sur ce site est très large, depuis les étages méditerranéens jusqu'au subalpin ; on note le décalage entre les deux versants : l'étage supraméditerranéen, par exemple, n'atteint pas 1000 m en versant nord alors qu'il monte jusqu'à 1200 m côté sud. Altitude et exposition induisent d'importantes différences climatiques (illustrées ici pour la température estivale). Sauf intervention humaine, la répartition des essences suit ces gradients ; ainsi, en versant nord, le sapin n'a subsisté que dans quelques îlots, à l'origine de sa reconquête actuelle dans les pineraies, avec le hêtre ; en versant sud, les boisements de cèdre de la fin du 19^e siècle sont source de dissémination de l'espèce dans les taillis de chêne pubescent.

par leur répartition dans le contexte local ou leur région d'origine. Ainsi, le pin noir, introduit depuis le sud de l'Autriche, a été utilisé d'après sa répartition dans cette région située à l'extrémité nord de son aire naturelle. Depuis lors, dans chaque plan de gestion, le choix des essences objectif se fait notamment en tenant compte de l'adaptation des essences aux tranches altitudinales et se traduit au quotidien lors du marquage des

coupes. Dans le contexte du changement climatique actuel, la gestion continue de régler son action sur cette base. Par exemple, dans la principale forêt communale en versant nord du massif, celle de Beaumont-du-Ventoux, où un objectif de production forestière est maintenu, il a été décidé de ne plus retenir le sapin comme essence objectif en dessous de 1300 m au vu des dépérissements observés.

La régénération naturelle : processus clé de l'évolution des peuplements

Dans le contexte de forte dynamique de colonisation que nous avons décrit en introduction, l'évolution des peuplements est d'abord conditionnée par la régénération naturelle.

Globalement, la répartition de la régénération des principales essences sur le Ventoux à l'étage montagnard (voir Courdier *et al.* 2005) est conforme à celle observée pour les peuplements adultes. Bien qu'elle confirme à la fois nos connaissances autécologiques et les choix des reboiseurs et des aménagistes, cette évidence masque des processus complexes.

D'une part, les effets du gel, du fort pouvoir évaporant de l'air ou du dessèchement des couches superficielles du sol dans les situations trop exposées sont atténués quand un couvert protège d'un ensoleillement direct et tamponne les variations de température. Le climat sous couvert est ainsi moins contraignant qu'au niveau de la canopée, ce qui favorise l'installation et la croissance de semis sur un site alors même que les arbres adultes de la même espèce n'y ont pas leur place. Le dynamisme d'une essence dans une régénération sous couvert n'est donc pas une assurance quant à son aptitude à constituer un futur peuplement adulte. Ceci est particulièrement vrai pour les essences « d'ombre » telles que le hêtre et le sapin pectiné.

D'autre part, cette répartition de la régénération est fonction de la capacité de chaque espèce à produire et disperser des graines. Dans un contexte de colonisation, tel que celui du Ventoux, l'agencement spatial des peuplements semenciers et le processus de dispersion à relativement longue distance jouent un rôle déterminant (Dreyfus *et al.* 2004, Sagnard *et al.* 2007, Amm 2006). Si l'abondance des

tout jeunes semis a naturellement tendance à être plus forte sous ou à proximité de ces semenciers, leur survie à court terme - leur recrutement - dépend des conditions plus ou moins favorables offertes par le sol et la végétation, ainsi que de phénomènes de mortalité juvénile souvent méconnus (purge de consanguinité, Pichot *et al.* 2006) également dépendants de la position des semenciers et de leur degré d'apparement. Enfin, comme nous allons le voir, la croissance dépend fortement du couvert du peuplement qui les accueille.

Gérer les évolutions par la maîtrise de la lumière : illustration par la simulation...

En plus des facteurs liés à l'altitude et au sol, la dynamique de chaque essence dépend de la structure et de la composition des peuplements. Ainsi, l'expansion du hêtre et du sapin est rendue possible par les boisements de pins qui leur offrent, outre un sol reconstitué après la dégradation extrême du 19^e siècle, un couvert protecteur contre l'ensoleillement direct et suffisamment clair pour qu'ils s'y développent. L'influence de la structure et de la composition du couvert sur l'éclairement (Porté *et al.* 2004, pour la dynamique forestière illustrée ici) et l'effet de l'éclairement sur la croissance et le développement des régénérations sont bien connus (voir notamment le numéro spécial « La lumière et la forêt » du Bulletin Technique de l'ONF, n° 34, de 1997).

La gestion sylvicole des peuplements mélangés consiste ainsi en bonne part à régler le degré d'éclairement sous couvert pour favoriser plus ou moins telle ou telle essence, notamment au stade de la régénération, afin de « doser » son importance dans le peuplement futur. Les conséquences de la gestion du couvert sur la croissance

sont bien connues, notamment pour le hêtre (Vinkler *et al.* 2007, Collet *et al.* même volume). Sur le Ventoux, divers dispositifs d'observation ou d'expérimentation livrent leurs enseignements (notamment dans le cadre du projet ECOGER BGDFM) sur plusieurs aspects :

- l'influence du couvert, de sa composition et de sa structure, sur l'éclairement reçu par la régénération ;
- la croissance, la mortalité, la démographie des régénérations de pins, hêtre et sapin en fonction de la densité sous couvert et de la fermeture du couvert ;
- la réaction des régénérations de pin noir et hêtre à diverses modalités de coupes de régénération : croissance des semis en place, apparition de nouveaux semis.

L'influence du couvert est également illustrée par des modèles, dont certains peuvent être utiles au gestionnaire (Goreaud *et al.* 2005, Dreyfus, 2008, Meredieu *et al.* 2009). Les simulations présentées ici montrent l'effet de la sylviculture sur l'évolution des proportions de pins et de hêtre. Elles s'appuient sur un modèle de dynamique forestière lui-même fondé sur des connaissances écologiques (autécologie, compétition interindividuelle y compris en mélange) et des analyses statistiques approfondies. Les données utilisées sont issues en bonne part du site atelier constitué par les dispositifs INRA du Ventoux ; beaucoup d'autres proviennent de l'Inventaire Forestier National sur l'ensemble de l'arrière-pays méditerranéen, des deux côtés du Rhône, et d'études des potentialités stationnelles menées par l'URFM et l'ONF Méditerranée sur l'arrière-pays provençal.

Simulation à l'échelle de la parcelle

La figure 2 montre, à l'échelle d'une petite parcelle (environ 1 ha), l'évolution d'une régénération naturelle mélangée de pin noir et de hêtre, selon le type de

coupe pratiquée dans le peuplement principal de pin noir. Dans ce cas précis, l'installation précoce du hêtre impose, si le pin noir doit rester l'essence objectif à la génération suivante, une ouverture anticipée, bien avant le terme d'exploitabilité fixé. Une coupe par trouées provoque un fort éclaircissement local sur les semis en place et permet au pin noir de prendre le dessus sur le hêtre en terme d'abondance. Par contre, une coupe uniforme induit un éclaircissement plus modéré et diffus, moins favorable aux semis de pin ; la régénération préexistante de hêtre, même en effectif réduit, prospère et prendra une part importante dans le futur peuplement. À noter qu'un vaste dispositif (6 ha) installé par l'ONF en versant sud du Ventoux, suivi conjointement avec l'INRA (appui du projet ECOGER BGDFM), permettra de comparer expérimentalement des modalités de coupe assez proches de celles simulées ici.

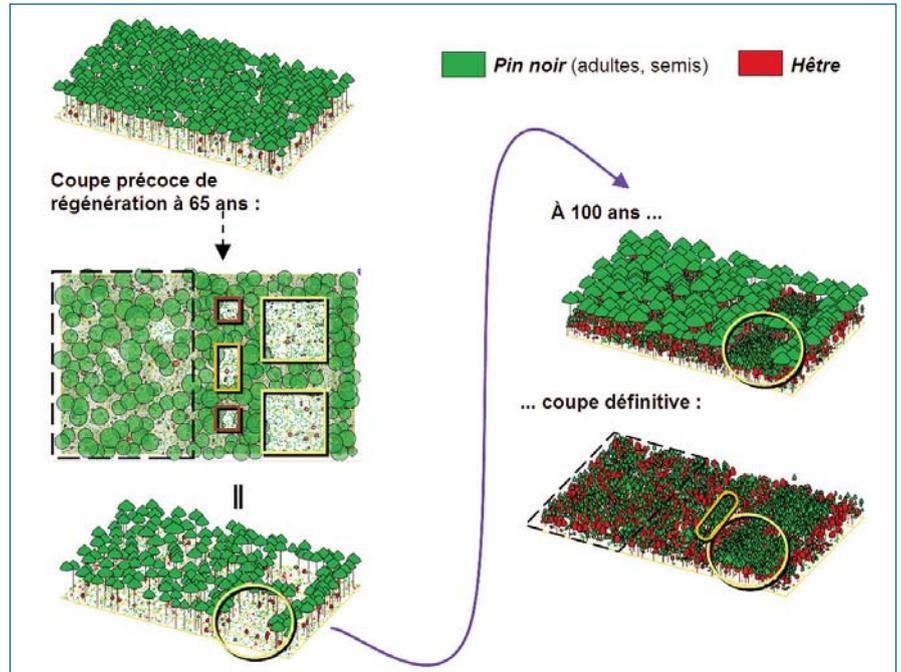


Fig. 2 : simulation de diverses modalités de coupe sur la régénération d'un peuplement de pin noir en cours de colonisation par le hêtre

Sous un peuplement de pin noir de 65 ans, s'est installée précocément une régénération où le hêtre, provenant de semenciers extérieurs et plus tolérant à l'ombrage, est déjà plus grand que les semis de pin. Une coupe de régénération anticipée et réalisée par trouées (ici, de 9 ares pour les plus grandes) permet d'obtenir après la coupe définitive à 100 ans un jeune peuplement à forte dominante de pin. Par contre, si la coupe est uniforme (polygone noir, en tireté), le hêtre fait jeu égal avec le pin noir.

Simulation à l'échelle de la forêt

La figure 3 page suivante illustre l'effet de stratégies sylvicoles lorsqu'elles sont appliquées à l'échelle d'une forêt, en l'occurrence la forêt domaniale du Ventouret, sur le versant sud du Ventoux. À partir de la carte ONF des types de peuplements, complétée par des statistiques sur la densité du hêtre et des pins (noir, sylvestre et à crochets), on a simulé l'évolution de la composition des peuplements sur 60 ans (sans changement climatique). Les deux modes de gestion testés diffèrent uniquement par le type de coupe d'ensemencement : pour la gestion G1, enlèvement uniforme d'un tiers des arbres adultes ; pour la gestion G1_T, suppression supplémentaire de tous les adultes par trouées de 3 ares couvrant un tiers de la surface de la parcelle. La coupe définitive est simulée dix ans plus tard dans les deux cas, sans coupe secondaire. La part prise par les différentes espèces



Sapin colonisant une futaie de pin sylvestre

N. Mariotte, INRA

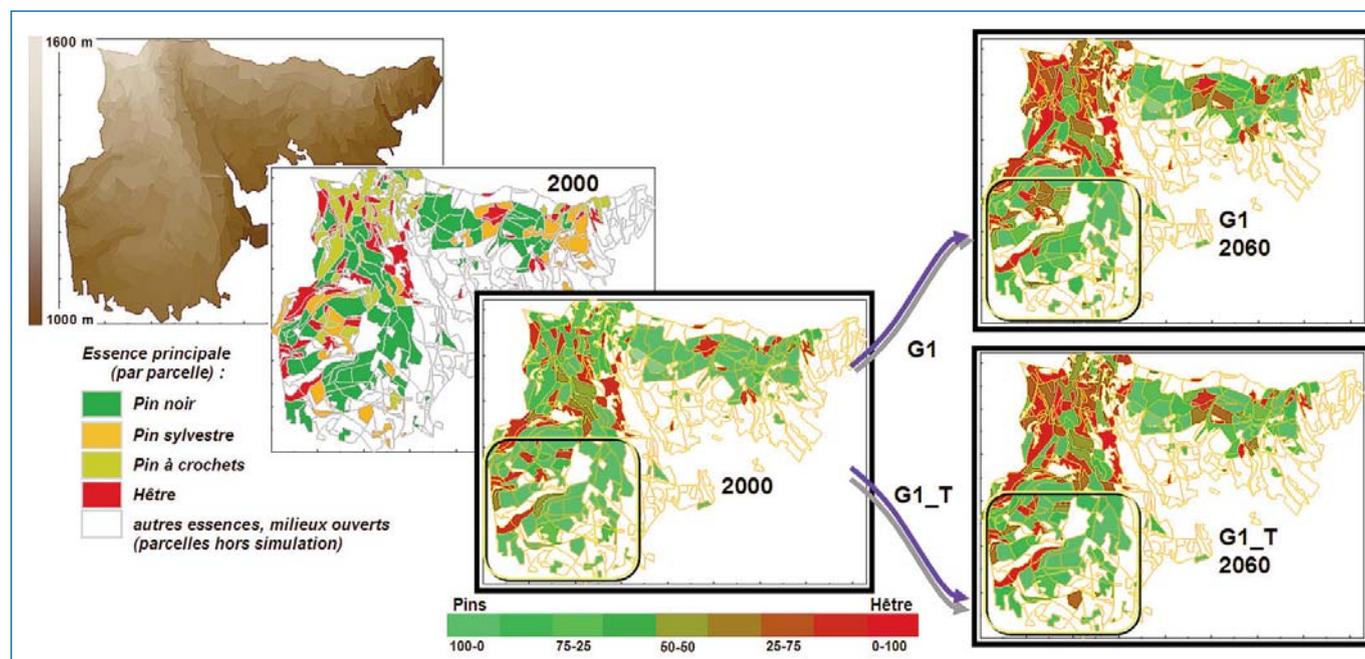


Fig. 3 : simulation de la progression du hêtre dans les peuplements de pins à l'échelle de la forêt (FD du Ventouret, 2650 ha), pour deux gestions qui ne diffèrent que par la coupe d'ensemencement : uniforme ou avec trouées supplémentaires

Gestion G1 : coupe uniforme d'un tiers des arbres adultes. Gestion G1_T : suppression supplémentaire de tous les adultes par trouées de 3 ares couvrant un tiers de la surface de la parcelle. L'évolution de la proportion des pins (les 3 espèces regroupées, toutes en vert) et du hêtre (en rouge), en nombre de tiges dans la partie supérieure du peuplement (hauteur supérieure à la moitié de la hauteur dominante) est indiquée par la couleur des parcelles : noter la différence d'évolution au sud-ouest (partie encadrée en jaune), où le hêtre était initialement peu présent.

est estimée par leurs proportions en nombre de tiges dans la partie supérieure du peuplement, correspondant à une hauteur totale supérieure à la moitié de la hauteur dominante.

Premier constat : quel que soit le mode de gestion, la progression du hêtre est très forte au nord-ouest où il était fortement représenté et où l'essence de reboisement installée, le pin à crochets, a globalement une régénération peu dynamique, notamment par comparaison avec celle du pin noir (Courdier *et al.* 2005). Second constat : au sud-ouest, la progression du hêtre apparaît plus faible pour G1_T que pour G1. Le coup de pouce donné au pin entre les deux coupes de régénération, sur une période pourtant courte, facilite donc son maintien. On peut

imaginer qu'une sylviculture produisant des ouvertures plus précoces, comme simulé précédemment au niveau parcelle (figure 2), si on accepte le sacrifice d'exploitabilité qu'elles induisent, puisse favoriser encore davantage ce maintien.

Dans un contexte climatique en forte évolution, mieux comprendre l'effet des facteurs et processus liés à l'altitude...

Nous venons de voir que les variantes de la dynamique de forêts mélangées telles que celles du Ventoux sont déterminées par les conditions stationnelles actuelles, et qu'elles peuvent être en partie orientées par l'action sylvicole. Mais il est clair - ne serait-ce qu'au vu des dépérissements actuels de

sapin et de pin sylvestre sur le Mont-Ventoux - que ces dynamiques en cours sont d'ores et déjà influencées par l'évolution climatique¹.

Le réchauffement climatique pourrait dans un premier temps favoriser le maintien du pin noir en plaçant l'ensemble des peuplements de pins de la tranche 1000-1200 m dans des conditions plus méditerranéennes qui ne conviennent pas au hêtre. Cependant, ce réchauffement peut aussi placer le pin noir dans une situation difficile, même libéré de la concurrence du hêtre, si de fortes sécheresses empêchant les semis de l'année de passer l'été venaient à compromettre sa régénération. Rappelons que le pin noir d'Autriche trouve sa place dans les étages supraméditerranéen et montagnard infé-

¹ Cette dernière est confirmée par l'examen des données des trente dernières années pour plusieurs postes météorologiques de l'arrière-pays provençal.

rieur. On constate que sa régénération naturelle est plus facile en ubac qu'en adret et dans le supra-méditerranéen que dans le montagnard. Mais, comme la plupart des essences, il est particulièrement sensible aux conditions climatiques la première année.

Dans ce contexte, les recherches menées par l'INRA URFM, notamment au cours du projet ECOGER BGDGM, visent à la fois à identifier et cartographier les facteurs de risque, à comprendre les mécanismes de dépérissement et d'adaptation, et à estimer ce que pourrait être la résultante des dynamiques plus ou moins contradictoires (extension vers l'aval d'essences montagnardes dans un contexte de réchauffement climatique) qui se conjuguent, en fonction des conditions stationnelles, de la composition, de la structure et de l'agencement spatial des peuplements. Ces recherches s'appuient en grande partie sur l'outil que constitue le gradient climatique des versants du Mont-Ventoux (ainsi que sur des dispositifs plus légers dans les vallées de l'Issole (04) et de la Vésubie (06)) : un tel gradient altitudinal est en effet considéré comme la meilleure analogie avec une tendance climatique temporelle d'évolution des températures. Selon cette hypothèse, il permet de représenter à la fois ce que seront les conséquences des changements climatiques et les effets des interactions entre espèces, communautés, populations situées dans diverses tranches d'altitude sur le même site.

En conclusion...

Les dynamiques en cours sur le Ventoux (et plus largement) sont sous-tendues par des courants de colonisation et des régulations climatiques qui évoluent. Les deux phénomènes ont des effets plutôt convergents aux altitudes élevées,

Apports du projet et des modèles développés par l'INRA pour l'élaboration du Guide des Sylvicultures de Montagne pour les Alpes du Sud

Le Guide des Sylvicultures de Montagne pour les Alpes du Sud est un des guides biogéographiques en cours de rédaction à l'ONF. Il traite des forêts de pin noir d'Autriche, pin sylvestre, pin à crochets, mélèze, sapin pectiné, hêtre et chêne pubescent. Nous ne disposons de références solides que pour la sylviculture de la plupart de ces essences en peuplement pur et régulier. Or, la maturation des écosystèmes forestiers est un phénomène général qui se manifeste sous forme de multiples « mélanges » qui sont presque autant de substitutions en cours, à un stade plus ou moins avancé : installation du chêne pubescent dans le pin noir ou le pin sylvestre, retour du hêtre sous ces pins ou dans le chêne, installation du sapin pectiné sous pin sylvestre ou mélèze... Le GSM Alpes du Sud ne peut faire l'impasse sur la gestion de ces peuplements complexes.

Le véritable laboratoire forestier qu'est le Mont-Ventoux nous fournit, grâce notamment au projet ECOGER BGDGM, des éléments précieux pour combler cette lacune, au moins pour les peuplements associant le hêtre ou le sapin et des pins, dans les Préalpes du Sud. Les modèles développés par l'INRA permettront de tester et de conseiller des itinéraires sylvicoles appropriés. Il est également envisagé de réaliser des simulations à la demande sur des cas précis (une forêt, un versant) pour mieux adapter la gestion à une configuration réelle de peuplements et de conditions stationnelles.

où la limitation par le froid devrait s'atténuer, mais ils sont antagonistes vers les altitudes basses, où certains peuplements semenciers de hêtre et de sapin pectiné sont menacés de disparition. Quel en sera le bilan ? Il est difficile de le prévoir puisqu'il dépend indirectement de l'évolution socio-économique globale et du climat qui en découlera.

La gestion sylvicole actuelle s'inscrit dans cette vision à moyen et long termes, intègre les évolutions climatiques en cours, et en tient compte pour le choix des essences objectif. À court terme, elle vise à orienter l'évolution de chaque peuplement, notamment par le contrôle de sa régénération et de sa composition, en fonction non seulement des contraintes stationnelles actuelles et futures, mais aussi des possibilités techniques et économiques. Par exemple, lutter à tout prix contre la co-

lonisation des peuplements de pins par la régénération de hêtre est souvent illusoire, même quand les conditions stationnelles limitent la capacité de ce dernier à constituer un peuplement adulte. Il est sans doute plus économique de favoriser le maintien partiel du pin en provoquant des apports importants de lumière via certains types de coupes. Cela revient à engager une sylviculture qui favorise un équilibre acceptable en jouant sur la densité et la structure horizontale et verticale du peuplement.

Au plan scientifique, l'INRA-URFM développe des travaux répondant au besoin qu'ont les forestiers pour orienter leurs choix quotidiens et élaborer une gestion anticipative. Le modèle utilisé pour les simulations présentées ici, amélioré dans le cadre du projet ECOGER BGDGM, permet de tester des itinéraires sylvicoles. Il devrait

venir appuyer l'élaboration du guide des Sylvicultures de Montagne pour les Alpes du Sud (voir encadré). De tels modèles éco-dendrométriques et démographiques seront bientôt couplés avec des cartes des caractéristiques stationnelles (à l'échelle d'une forêt, d'un petit massif) y compris pour le climat et ses évolutions prévisibles, et avec des cartes de risque (de dépérissement, notamment). Ces cartes sont en cours d'élaboration par l'INRA à Avignon et l'ONF (R & D Méditerranée) et le couplage avec les modèles est amorcé (voir un exemple de simulation « prospective » dans Meredieu *et al.* 2009).

Remerciements

Les auteurs remercient l'ensemble des personnels de l'INRA et de l'Office National des Forêts qui ont contribué à recueillir et analyser les informations nécessaires, en particulier les équipes techniques qui ont installé et suivi les dispositifs, ainsi que toutes les autres personnes (stagiaires, partenaires d'autres équipes, personnel temporaire) qui ont contribué à ces études. Ces travaux ont bénéficié depuis une dizaine d'années de divers soutiens financiers, notamment du GIP ECOFOR et du MEDD (programme « Biodiversité et Gestion Forestière »), du Bureau des Ressources Génétiques, et de l'INRA (programme ECOGER), ainsi que d'importantes contributions de l'IFN à Montpellier (données écologiques et dendrométriques, appui dans les analyses stationnelles).

Philippe DREYFUS

Unité de recherches « Écologie des Forêts Méditerranéennes »
(URFM) INRA Avignon

Jean LADIER

Chargé de développement technique
ONF, DT Méditerranée

Bibliographie

AMM A. 2006. Étude de la dynamique du sapin pectiné (*Abies alba* Mill.), en situation méditerranéenne : Modélisation de la dispersion efficace sur le Mont Ventoux. Master 2 Biodiversité et Écologie Continentale, Aix-Marseille III et INRA URFM Avignon, 39 p. + annexes.

COURDIER J.M., DREYFUS Ph., 2005. Retour du hêtre et du sapin dans les pineraies pionnières de l'arrière-pays méditerranéen. Conséquences pour la gestion et pour la biodiversité. ONF, Rendez-Vous Techniques n° 10 pp. 56-62

DREYFUS Ph., 2007. Les dynamiques en cours et l'impact des pratiques sylvicoles. Forêt Méditerranéenne, tome XXVIII, n° 4, spécial « Le mont Ventoux », pp. 419-426

DREYFUS Ph., 2008. Dynamiques du Sapin, du Hêtre et des Pins dans l'arrière-pays méditerranéen : de la modélisation à l'aide à la gestion. Atelier REGEFOR 2007 – Forêts mélangées : quels scénarios pour l'avenir ? Revue Forestière Française vol. 60, pp. 233-249

DREYFUS Ph., CURT T., RAMEAU J.C., 2005. Le Hêtre : dynamiques de recolonisation. Revue Forestière Française, vol. 57 pp. 189-200

DREYFUS PH., ODDOU-MURATORIO S., 2004. Prévoir l'évolution de la diversité pour différents itinéraires sylvicoles. Rendez-Vous Techniques de l'ONF. Hors-série n°1 « Diversité génétique des arbres forestiers », pp.97-104

GOREAUD F., COLIGNY F. de, COURBAUD B., DHÔTE J.F., DREYFUS Ph., PÉROT T., 2005. La modélisation : un outil pour la gestion et l'aménagement en forêt. Vertigo — La revue en sciences de l'environnement, Vol 6 n° 2, 12 p. < en ligne :

http://www.vertigo.uqam.ca/vol6no2/art6vol6no2/vertigovol6no2_goreaud_et_coll.pdf >

LADIER J., DREYFUS Ph., REBOUL D., 2007. La place du hêtre en région méditerranéenne. Rendez-Vous Techniques de l'ONF, hors-série n° 2 « Gestion des hêtraies dans les forêts publiques françaises », pp. 105-111

MEREDIEU C., DREYFUS Ph., CUCCHI V., SAINT-ANDRÉ L., PERRET S., DELEUZE C., DHÔTE J.-F., COLIGNY F. de, 2009. Utilisation du logiciel Capsis pour la gestion forestière. Forêt-Entreprise n° 186, pp. 32-36

PICHOT Ch., BASTIEN C., COURBET F., DEMESURE-MUSCH B., DREYFUS Ph., FADY B., FRASCARIA-LACOSTE N., GERBER S., LEFEVRE F., MORAND-PRIEUR M.-E., ODDOU S., TESSIER DU CROS E., VALADON A., 2006. Déterminants et conséquences de la qualité génétique des graines et des semis lors de la phase initiale de régénération naturelle des peuplements forestiers. Les Actes du BRG n° 6, pp. 277-297

PORTÉ A., HUARD F., DREYFUS Ph., 2004. Microclimate beneath pine plantation, semi-mature pine plantation and mixed broadleaved-pine forest. Agricultural and Forest Meteorology, vol. 126 n°1-2, pp. 167-174

SAGNARD F., PICHOT C., DREYFUS P., JORDANO P., FADY B., 2007. Modelling seed dispersal to predict seedling recruitment : Recolonization dynamics in a plantation forest. Ecological Modelling vol. 203, pp. 464 – 474

VINKLER I., NINGRE F., COLLET C., 2007. Comportement du hêtre sous abri : les intérêts d'une bonne gestion du couvert Rendez-Vous Techniques de l'ONF, hors-série n° 2 « Gestion des hêtraies dans les forêts publiques françaises », pp. 48-58

Ombre et forêts : pourquoi certaines essences sont-elles plus tolérantes à l'ombre que d'autres lors des phases de régénération ?

La phase de régénération est déterminante pour la composition des peuplements forestiers, et les différences de tolérance à l'ombre entre essences y jouent un rôle très important. Pour le sylviculteur qui cherche à orienter les dynamiques de succession vers les mélanges souhaités en agissant sur l'ouverture du couvert, il est important de connaître les mécanismes biologiques qui expliquent les différences de tolérance à l'ombre. Cet article fait le point des recherches récentes sur la question.

La sylviculture cherche à optimiser la croissance des arbres, au bénéfice des essences souhaitées. Pendant la phase de régénération (phase déterminante pour la composition du peuplement futur), la sylviculture contrôle le degré d'ouverture du couvert et la compétition inter et intra-spécifique entre les semis ou avec la végétation accompagnatrice. Ces différentes formes de compétition ont un lien fort avec la quantité de lumière disponible autour des semis.

De fait, on sait que les exigences en lumière diffèrent sensiblement d'une essence à l'autre. Les «tempéraments» des essences ont été largement décrits et sont utilisés pour piloter les régénérations via le degré d'ouverture des couverts lors des coupes correspondantes. Les exigences en lumière font également partie des traits de vie utilisés pour décrire les caractéristiques de la végétation. On distingue classiquement les espèces dryades, très tolérantes à l'ombre, comme le sapin et le hêtre, d'espèces plus exigeantes en lumière pour leur régénération, comme les chênes, les bouleaux, les pins...



A. André, ONF

L'importance lors de la régénération des différences de tolérance à l'ombre entre essences est particulièrement visible dans les forêts faiblement ou non gérées, comme les forêts tropicales humides. La disponibilité en lumière sous couvert est extrêmement réduite dans ces forêts (de l'ordre de 1 % de la lumière qui atteint la canopée) ; des niveaux d'éclairement aussi faibles ne permettent la survie que d'un petit nombre d'espèces très tolérantes à l'ombre. Ces forêts, très riches en espèces (près de 2000 espèces en forêt tropicale de Guyane !), se régénèrent essentiellement par chablis, créant des trouées qui augmentent fortement la disponibilité locale en lumière et permettent à la fois le développement des individus préexistants au chablis (souvent des essences très tolérantes à l'ombre) et l'installation de nouvelles espèces pionnières et exigeantes en lumière. L'ouverture du couvert est donc bien le pilote de la régénération et de la succession forestière (ONF, 1997).

Ces dynamiques forestières ont été très étudiées en forêt tropicale humide, ainsi que dans les forêts tempérées nord-américaines, assez riches en espèces et pour certaines, soumises à une gestion de faible intensité. Elles l'ont été beaucoup moins dans les forêts tempérées européennes, qui sont souvent dominées par un faible nombre d'espèces et sont pour la grande majorité soumises à un régime d'éclaircies régulières. Cependant, du fait du regain d'intérêt pour les forêts mélangées, de nouvelles recherches ont été entreprises depuis peu pour améliorer notre connaissance des exigences en lumière des espèces européennes pendant la phase de régénération, et des **processus biologiques expliquant les différences de tolérance à l'ombre**. C'est cette dernière question que nous abordons ici, en apportant des éléments de réponse issus de travaux de recherche récents.

Tolérance à l'ombre, plasticité, ontogénie

Tolérance à l'ombre : une affaire de survie !

La lumière est indispensable aux plantes car elle leur fournit l'énergie nécessaire à la photosynthèse et donc à la croissance et la survie. Une faible disponibilité en lumière est impropre à assurer une croissance et un développement suffisants même pour une espèce particulièrement tolérante à l'ombre. Dans des situations de très faible lumière, la plupart des espèces sont capables de germer mais, pour beaucoup d'entre elles, les semis meurent ensuite rapidement.

Quand on compare des espèces entre elles, les espèces les moins tolérantes croissent souvent plus vite que les espèces tolérantes et ce, quel que soit le niveau de lumière. Ainsi, quand on compare des semis de hêtre, d'érable sycomore et de frêne, le classement (par ordre croissant de vitesse de croissance : hêtre-érable-frêne) est identique sur une gamme de niveaux de lumière allant de 5 % à 100 % de la lumière atteignant la canopée. Les différences de tolérance à l'ombre ne s'expriment donc généralement pas par des différences de croissance entre situations d'ombre et de lumière, mais plutôt par des différences dans la survie des semis. Ainsi, **la tolérance à l'ombre est définie comme la capacité de survie à de très faibles niveaux de lumière**, et non comme la capacité à assurer une croissance importante.

Un phénotype qui change selon le climat lumineux : la plasticité

La lumière module le phénotype des arbres : des individus de la même espèce (voire des clones génétiquement identiques) ne présentent pas les mêmes caractéristiques (dimensions, architec-

ture, anatomie, physiologie) selon qu'ils se développent en pleine lumière ou à l'ombre. Ces différences relèvent de ce que l'on appelle la **plasticité phénotypique**, conduisant à des phénotypes d'ombre et des phénotypes de lumière. Les spécificités des phénotypes d'ombre contribuent à améliorer significativement la survie et la croissance des individus dans des situations de faible disponibilité en lumière.

La caractérisation de la plasticité phénotypique comporte des difficultés. L'une d'elles réside dans le fait que certaines des différences observées entre phénotypes d'ombre et de lumière sont uniquement causées par les différences de dimension des individus à âge égal : on parlera de **différences ontogéniques**, c'est-à-dire de différences dues à des décalages dans le programme de développement des individus. En effet, pour toutes les espèces, l'ombre se traduit par un très fort ralentissement de la croissance, les individus développés à l'ombre sont donc beaucoup plus petits à âge égal. Ils présentent de très nettes différences de surface foliaire, sont moins ramifiés et développent comparativement moins de racines : ce sont là des effets en grande partie ontogéniques. D'autres différences sont indépendantes des dimensions et caractéristiques d'un réel impact de la lumière sur d'autres processus que la croissance et l'ontogénèse : on parlera de **plasticité vraie**.

La plasticité phénotypique en réponse à des variations de la disponibilité en lumière, apparaît dans toutes les espèces indépendamment de leur degré de tolérance à l'ombre ; **l'amplitude des réponses plastiques est très similaire dans toutes les espèces testées et ne constitue donc pas un trait identifiant les espèces tolérantes**. Ainsi par exemple, le hêtre

présente une plasticité des caractères architecturaux (développement des branches, développement de l'appareil foliaire) en réponse à une variation de l'éclairement, qui est similaire à celle de l'érable sycomore ou du frêne, contrairement à ce qu'une analyse un peu rapide peut laisser penser. En fait, la plus grande variabilité des caractères architecturaux que l'on observe sur des semis de hêtre poussant en forêt dans des situations contrastées de lumière, résulte uniquement de leur plus forte survie à faible éclairement et des plus grandes dimensions qu'ils atteignent dans ces conditions.

Dans la suite de cet article, nous nous attacherons à toujours identifier les effets liés à l'ontogénie pour pouvoir distinguer la plasticité vraie.

Réponses plastiques à l'ombre : quelques exemples

Pour mettre en évidence la plasticité des réponses à la lumière, on peut travailler en forêt, dans des situations contrastées de disponibilité en lumière. Cependant, entre une clairière et un couvert dense, par exemple, des différences importantes apparaissent aussi pour d'autres facteurs, en particulier la disponibilité en eau et en éléments minéraux du sol. Les différences observées ne sont donc pas dues exclusivement aux différences de disponibilité en lumière. Une alternative est d'utiliser des ombrières artificielles et de cultiver les individus dans des substrats identiques avec des régimes d'irrigation adaptés, afin de minimiser les effets autres que ceux de disponibilité en lumière (Dreyer et al. 2005). Dans ces conditions, les réponses aux conditions contrastées d'éclairement s'observent sans ambiguïté. Certaines des différences observées se voient de façon évidente (croissance, architecture, morpho-

logie foliaire), d'autres nécessitent des mesures physiologiques fines (photosynthèse, transfert d'eau).

Interception de la lumière par les semis : pas de relation entre tolérance et efficacité d'interception de la lumière

Les différences entre semis à l'ombre et à la lumière les plus aisées à observer concernent la morphologie des axes ligneux et de l'appareil foliaire. À dimensions équivalentes, les semis à l'ombre ont généralement des axes ligneux (tige et branches) plus filiformes et plus plagiotropes et l'inclinaison de leurs feuilles est plus proche de l'horizontale.

Par ailleurs, on observe également un degré de recouvrement des feuilles (qui provoque de l'auto-ombre) plus faible chez les semis à l'ombre, et une hypothèse logique serait que les semis à l'ombre optimisent la géomé-

trie du feuillage pour améliorer l'interception de la lumière. Delagrangé et al (2006) ont testé cette hypothèse en numérisant la disposition (position et orientation) des feuilles de semis de différentes espèces qui s'étaient développés sous trois régimes lumineux. Le résultat est relativement clair : le principal facteur modulant l'interception de lumière est la surface foliaire totale développée par les individus. À surface équivalente, aucune différence entre les semis des trois traitements n'est apparue : la plasticité de l'efficacité d'interception s'est essentiellement exprimée par le biais de la modulation de la croissance totale (figure 1). Ces effets sont donc essentiellement ontogéniques. Des différences significatives sont apparues entre espèces et le hêtre, l'espèce la plus tolérante à l'ombre de l'expérimentation, présentait l'efficacité la plus faible !

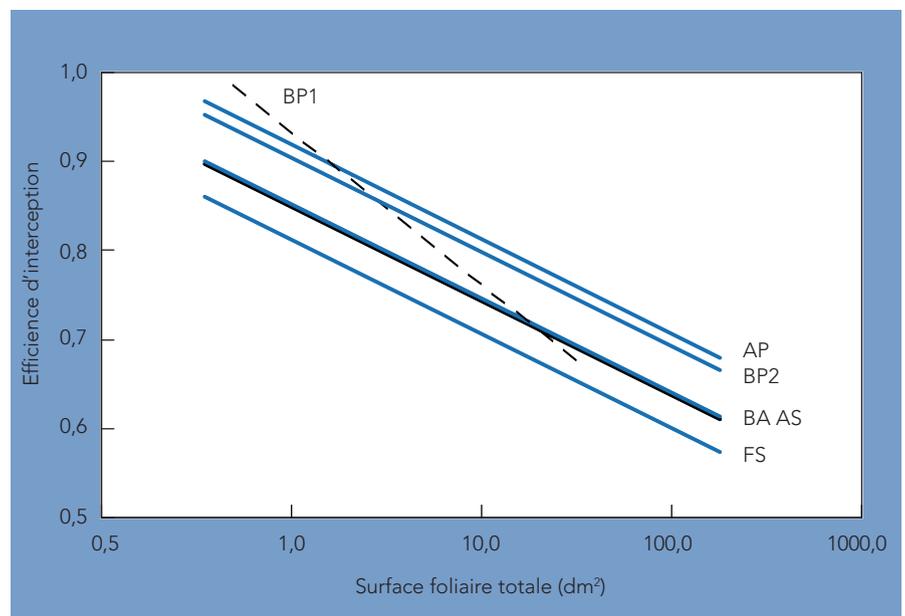


Fig. 1 : efficacité d'interception de la lumière en fonction de la surface foliaire totale de jeunes plants de 1 et de 2 ans cultivés sous différents niveaux de lumière

Les traitements de lumière n'ont induit aucune différence et ne sont donc pas indiqués. Les différences entre espèces sont significatives. AP : érable sycomore ; AS : érable à sucre ; BA : bouleau jaune ; BP1, BP2 : bouleau verruqueux en 1^e et 2^e année ; FS : hêtre d'Europe. À surface foliaire équivalente, l'efficacité d'interception du hêtre est la plus faible. D'après Delagrangé et al. 2006.

Plasticité des feuilles et de la photosynthèse : une capacité de photosynthèse plus faible pour les feuilles d'ombre

Les feuilles des phénotypes d'ombre sont plus fines, présentent une masse surfacique (rapport entre la biomasse des feuilles et leur surface foliaire) plus faible mais sont plus riches en chlorophylles par unité de masse. Il en résulte une capacité de photosynthèse par unité de surface plus faible que pour les feuilles des phénotypes de lumière, alors que cette même capacité ramenée à la masse foliaire reste relativement constante. Ces différences observées sur des jeunes semis installés le long de gradients horizontaux de disponibilité de lumière sont analogues à celles que l'on peut observer sur un même arbre adulte dans un transect vertical entre les feuilles de lumière du haut de la canopée et celles d'ombre du bas de la canopée. En général, les feuilles d'ombre présentent plus de stomates que les feuilles de lumière, et développent également une résistance plus élevée à la diffusion du CO₂ utilisé par la photosynthèse (Montpied et al. 2009). L'augmentation des teneurs en chlorophylles permet également de légèrement mieux utiliser la lumière interceptée par les feuilles.

Un coût de construction qui diffère entre feuilles d'ombre et feuilles de lumière

De toute manière, un investissement important dans des structures photosynthétiques ne serait guère rentable sous les faibles éclaircissements auxquels sont soumises ces feuilles, qui ne permettent qu'une photosynthèse très réduite. Des études récentes ont abordé la question du « coût de construction » des feuilles, c'est-à-dire de l'investissement en énergie (sous forme de glucides produits par la photosynthèse) nécessaire pour installer les structures foliaires et, en parallèle, du temps de retour sur investissement de la construction de ces

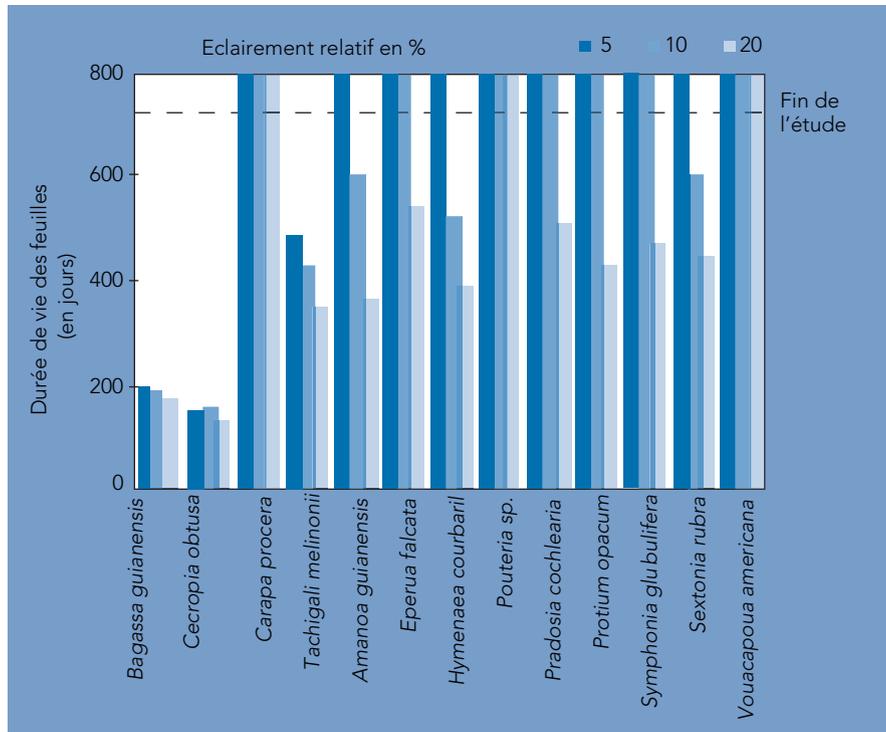


Fig. 2 : durée de vie de feuilles de 13 espèces de forêt tropicale humide cultivées sous trois régimes lumineux à Kourou ; la durée de vie diminue quand la lumière augmente, avec des différences interspécifiques très nettes (Coste et al. 2010)

Certaines espèces sont pionnières comme Bagassa guianensis et le bois canon (Cecropia obtusa), d'autres sont tolérantes à l'ombre comme Vouacapoua americana ou Symphonia globulifera. Dans bien des cas, la durée de l'expérimentation a été trop courte pour permettre une estimation de la durée de vie des feuilles !

feuilles, qui risque d'être plus long sous faible lumière. Le coût de construction dépend essentiellement de la composition biochimique des tissus et de la masse surfacique (la quantité de tissus à installer par unité de surface). Les feuilles de lumière et d'ombre présentent des compositions biochimiques assez différentes ; cependant, ces différences se compensent et, à masse équivalente, la formation des tissus est aussi exigeante en énergie pour les feuilles d'ombre que pour les feuilles de lumière. De ce fait, le coût de construction d'une feuille est fortement conditionné par la masse surfacique, à travers un large gradient de conditions de lumière. Ce point a été vérifié sur une série d'espèces tempérées (Barthod and Epron 2005) et tropicales (Coste et al. 2010).

Une durée de vie sensiblement plus longue pour les feuilles d'ombre

De manière plus surprenante, la durée de vie des feuilles est également sensible à la disponibilité en lumière. Pour les espèces décidues tempérées, la durée de vie des feuilles est fortement conditionnée par l'alternance saisonnière ; on sait qu'elle augmente actuellement du fait des changements climatiques (Lebourgeois et al, 2008). Ce n'est plus vrai pour les essences sempervirentes, et encore moins pour des espèces de forêt tropicale humide soumises à un régime microclimatique quasi stable. Des données récentes obtenues en Guyane (Coste 2008 ; Coste et al. 2009) montrent que la durée de vie des feuilles de semis cultivés sous différents régimes d'ombre est fortement modulée par la disponibilité en lumière

(figure 2). Elle est très sensiblement plus longue à l'ombre. Les différences sont de l'ordre du simple au double, et affectent aussi bien les espèces pionnières à forte croissance et à faible durée de vie des feuilles que les espèces d'ombre. La durée de vie des feuilles de certaines espèces a largement dépassé les 3 ans de l'étude. Des observations de terrain montrent également que des semis sous ombre intense ont pu conserver leurs feuilles pendant plus de 6 ans, alors qu'en pleine lumière ils les perdent au bout de 2-3 ans. Les conséquences d'un prolongement de la vie des feuilles sont évidentes : cela permet d'augmenter la quantité de carbone assimilée par rapport au coût initial de la feuille.

Un investissement moindre de semis d'ombre dans les structures de transfert d'eau

Sous ombre, les jeunes arbres sont soumis, à surface foliaire équivalente, à une demande transpiratoire plus faible qu'en pleine lumière (moins de rayonnement reçu, hygrométrie plus élevée). On peut se demander si le système de transport d'eau (le xylème et les tissus spécialisés) s'ajuste à cette demande réduite. Un premier ajustement est la réduction du développement racinaire à surface foliaire équivalente, communément observée sur les individus se développant à l'ombre. Un autre ajustement est la baisse de conductance hydraulique observée également à surface foliaire équivalente chez les individus poussant à l'ombre qui développent proportionnellement moins de structures conductrices qu'à la lumière (Barigah et al. 2006). Plus encore, la vulnérabilité à la cavitation, c'est-à-dire le risque de perte de fonctionnalité de transfert de sève brute dans les vaisseaux conducteurs quand la tension dans ces vaisseaux augmente, est sensiblement plus élevée à l'ombre. De fait, le risque pour les individus d'ombre d'être soumis à contrainte

hydrique est plus faible qu'en pleine lumière, et ils investissent donc moins dans les structures de transfert d'eau et dans leur «solidité» (Barigah et al. 2006 ; Cochard et al. 1999 ; figure 3).

Finalement, quelles différences de plasticité entre espèces selon leur tolérance à l'ombre ?

On pensait initialement que les différences entre phénotypes

d'ombre et de lumière étaient de plus forte ampleur pour les espèces tolérantes qui auraient présenté ainsi une plus forte capacité à ajuster leur phénotype aux conditions de faible lumière. Il semble cependant qu'il n'en est rien : la plupart des traits étudiés pour l'instant présentent la même plasticité pour les espèces tolérantes que pour les espèces intolérantes.

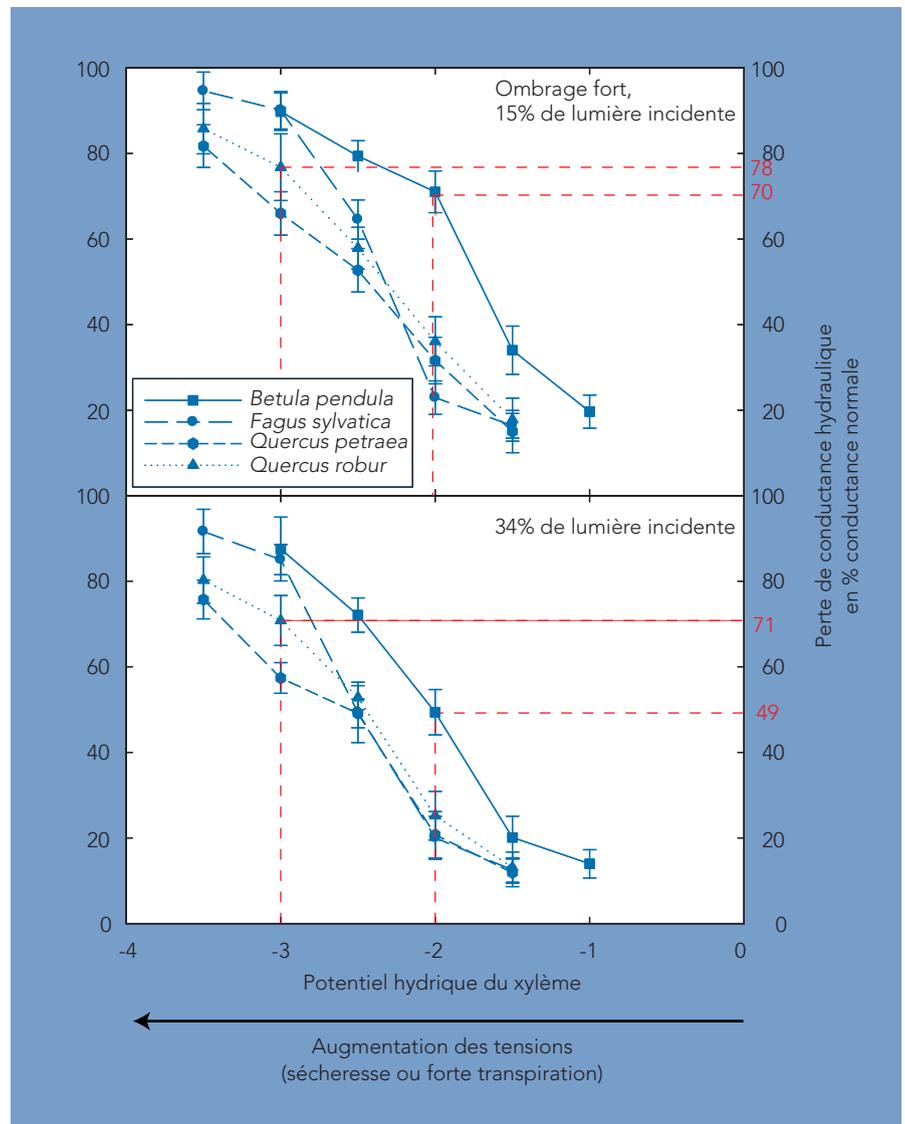


Fig. 3 : évolution de la perte de conductance hydraulique en fonction des tensions (potentiel hydrique du xylème) dans des rameaux de l'année de semis de chêne, hêtre et bouleau cultivés sous deux niveaux d'ombre. On constate (i) que le bouleau est plus vulnérable que les trois autres espèces et (ii) qu'à potentiel équivalent, la perte de conductance des 3 espèces est plus grave sous ombrage fort (exemples en rouge). Cela traduit une plus forte vulnérabilité à la cavitation dans les phénotypes d'ombre. Barigah et al. 2006.

Bilan de carbone et tolérance à l'ombre

Nous venons de voir que la plasticité des semis en réponse à l'ombre s'exprime à travers un ensemble de traits qui paraissent assez disparates. Il nous faut maintenant intégrer ces différents traits pour comprendre comment ils permettent d'expliquer les différences de tolérance entre espèces. Pour cela, nous allons décrire une base théorique permettant d'expliquer pourquoi les phénotypes d'ombre sont mieux à même de survivre sous faible lumière que les phénotypes de lumière. L'idée centrale est que pour survivre, les individus doivent assimiler par photosynthèse au moins autant de carbone qu'ils n'en perdent (respiration pour maintenir les tissus en vie, abscission des feuilles et des racines, herbivorie).

Maintenir l'équilibre photosynthèse-respiration

Dans une première approche, nous allons nous intéresser à l'équilibre entre assimilation photosynthétique et respiration. L'assimilation photosynthétique de carbone dépend notamment de la quantité de lumière interceptée, qui augmente avec la surface foliaire développée et la lumière disponible ; la respiration dépend essentiellement de la biomasse vivante présente. Sous forte lumière, les feuilles interceptent habituellement assez de lumière pour fournir l'énergie nécessaire à la maintenance des tissus vivants et à la mise en place de nouveaux tissus (feuilles, tiges, racines). Dans ces conditions, les semis parviennent à maintenir un bilan positif entre l'assimilation et la respiration, même quand ils sont de grande taille et ont des niveaux de respiration élevés. Sous faible éclairage, cela devient beaucoup plus problématique. L'assimilation est alors fortement réduite et, pour les semis de grande taille qui ont une respiration élevée, le bilan de carbone devient négatif.

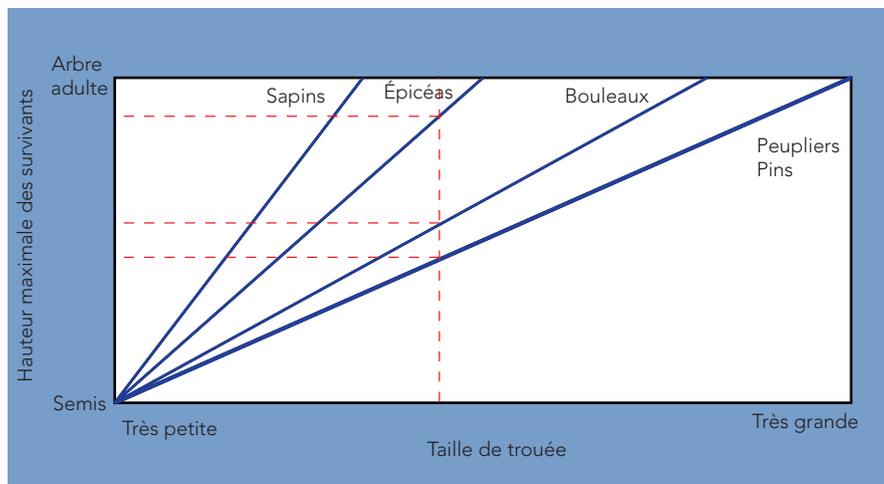


Fig. 4 : hauteur maximale atteinte par les survivants dans des trouées en fonction de la dimension des trouées, donc de la disponibilité en lumière (études sur des groupes d'espèces dans les forêts mélangées d'Amérique du Nord (Messier et al. 1999)

Pour une même taille de trouée, les essences tolérantes (sapins, épicéas) peuvent atteindre une hauteur plus élevée (avec un âge plus avancé) que les essences intolérantes (bouleaux, peupliers, pins).

La solution pour maintenir un bilan de carbone positif sous faible lumière est alors d'augmenter la surface foliaire en diminuant les structures de support ou de maximiser le rapport surface foliaire/structures de support. Un système racinaire de dimension limitée, des rameaux de petit diamètre portant des feuilles qui ne se superposent pas (pour augmenter l'efficacité d'interception de lumière), une dimension d'ensemble faible, voilà autant de caractéristiques qui participent au maintien d'un bilan de carbone positif malgré la faible lumière. Les espèces capables de produire des individus de petite taille, avec des structures de support réduites sont bien entendu favorisées par rapport à celles qui ont une croissance rapide et qui finissent généralement par dépérir.

Une vérification indirecte de ce modèle théorique a été fournie par les études démographiques en forêt, au cours desquelles les chercheurs essentiellement nord-américains ont analysé les dimensions que peuvent atteindre des jeunes sujets sans dépérir dans différentes condi-

tions d'ouverture de la canopée. Ils ont ainsi constaté que pour chaque espèce il existait une dimension maximale des survivants, et que cette dimension maximale augmentait avec le niveau de lumière reçue. À niveau de lumière donné, les dimensions maximales sont plus fortes pour les espèces tolérantes que pour des espèces intolérantes (Messier et al. 1999) (figure 4) ; la raison en est que les espèces tolérantes maintiennent un rapport surface foliaire/structure de support élevé, ce qui leur permet de survivre à de faibles niveaux de disponibilité en lumière qui limitent fortement la photosynthèse.

Une conséquence directe de ce modèle est la diminution de la tolérance à l'ombre avec l'âge des arbres, couramment observée par les forestiers pour de nombreuses espèces. Cette constatation est clairement expliquée par le modèle : en effet, avec l'âge les dimensions des arbres augmentent et, avec les dimensions, le rapport surface foliaire/structure de support diminue. Il faut donc des quantités plus importantes de lumière pour assurer la survie de ces individus.

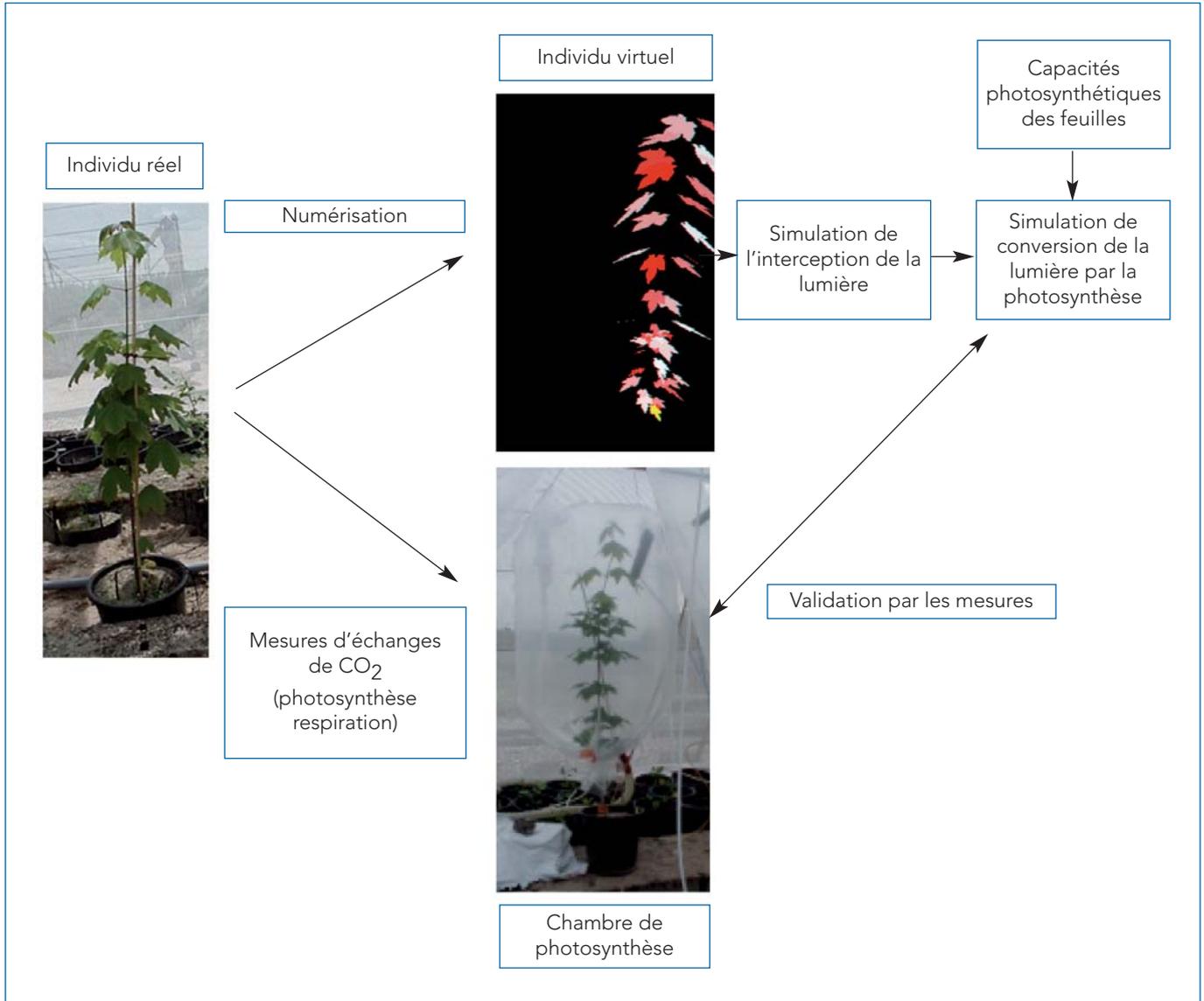


Fig. 5 : procédure utilisée pour estimer le bilan de carbone de jeunes arbres (méthodes INRA PIAF, Clermont-Ferrand)

Un individu est numérisé pour constituer une maquette informatique utilisée ensuite pour un calcul d'interception de lumière. À partir de la quantité de lumière interceptée par chaque feuille, on estime l'assimilation nette de CO₂ et on l'intègre dans le temps et à l'échelle de l'individu. La nuit, l'individu respire et dégage du CO₂. Les valeurs simulées peuvent être comparées avec des valeurs mesurées dans des chambres de photosynthèse.

Maintenir un bilan de carbone positif

Cette première approche est simplificatrice puisqu'elle se base uniquement sur l'assimilation photosynthétique, estimée à travers la surface foliaire totale du semis, et sur la respiration, estimée à travers la biomasse totale. Une deuxième approche, qui passe par une modélisation fonctionnelle du bilan de carbone, permet de prendre en compte de manière plus complète les paramètres qui déterminent la tolérance à l'ombre.

Des modèles qui intègrent la plasticité dans la morphologie de l'appareil foliaire, et les flux de CO₂ à l'échelle de jeunes plants pour les parties aériennes (figure 5) et pour les racines (Delagrangue *et al.* 2006) ont été développés. Des modèles intégrant les coûts de construction et de maintenance des différents organes, leur durée de vie, ainsi que les différents facteurs qui affectent l'assimilation photosynthétique (disponibilité en eau, température de l'air...) ou encore la dynamique des réserves carbonées, sont en

cours d'étude. L'établissement de tels modèles nécessite l'acquisition d'importants jeux de données pour estimer l'ensemble des paramètres des modèles. Ils permettront d'effectuer des bilans de carbone de semis sous différentes conditions de lumière et de comparer, pour les différentes espèces, les seuils de lumière permettant le maintien d'un bilan de carbone positif. Par leur approche globale, ces modèles permettront d'estimer l'importance relative des différents traits liés à la tolérance à l'ombre.

Transition ombre et lumière : un délai dans la reprise de croissance ?

Les semis des espèces tolérantes peuvent persister sous fort ombre pendant de longues périodes, et ainsi atteindre des âges avancés tout en conservant des dimensions très faibles. Leur croissance ne reprend en général que lorsque la disponibilité en lumière augmente significativement suite à un chablis ou à une éclaircie : les individus survivants (les « préexistants » de Collet *et al.*, ce numéro) bénéficient d'un avantage par rapport à des espèces pionnières qui doivent d'abord s'installer, c'est-à-dire produire des graines, germer, démarrer leur croissance. Cet avantage de régénération anticipée permet le maintien des espèces tolérantes alors qu'en général elles présentent des niveaux de croissance plus faibles que les espèces de lumière et sont moins compétitives au jeune stade en situation de plein éclaircissement. Ce processus a fait l'objet de nombreuses études (Messier *et al.* 1999).

Si la reprise de croissance des semis préexistants après ouverture est maintenant bien documentée, les ajustements fonctionnels nécessaires à cette reprise sont moins bien connus. Les semis en situation d'attente mettent en place des phénotypes d'ombre présentant toutes les caractéristiques citées ci-dessus. Lors de l'ouverture de la canopée, ces semis sont brutalement soumis à des conditions environnementales globalement beaucoup plus favorables à la croissance (éclairage, alimentation hydrique et minérale fortement augmentés), mais aussi plus contraignantes sur certains points (températures maximales plus élevées, demande évaporative plus forte). Pour augmenter la photosynthèse et par suite la croissance, les semis doivent ajus-

ter leurs structures conductrices, former de nouveaux vaisseaux, et consolider leurs structures de soutien. Ils doivent ainsi passer d'une structure adaptée à l'ombre à une structure adaptée à la croissance en pleine lumière. Cela se traduit par un temps de latence dans la reprise de croissance, qui peut atteindre quelques années (Collet *et al.* 2002), et par des ajustements graduels dans la structure des systèmes conducteurs, dans l'anatomie des feuilles, etc. (Caquet 2008; Caquet *et al.* 2009). Ces délais de croissance et de réajustement aux nouvelles conditions n'ont fait l'objet que de relativement peu de travaux et sont encore mal connus pour beaucoup d'espèces.

Tolérance à l'ombre et gestion forestière

La tolérance à l'ombre est un concept couramment utilisé par les forestiers pour décrire le comportement des différentes espèces dans les jeunes stades et en déduire les itinéraires sylvicoles les plus propices à leur bon développement en croissance et en qualité (ex. niveaux de surface terrière lors de la coupe d'ensemencement et des coupes secondaires ; vitesse des régénérations ; niveaux de surface terrière après coupe en futaie irrégulière). Les connaissances acquises sur les bases biologiques de la tolérance à l'ombre ne permettent pas encore d'affiner de tels itinéraires sylvicoles. Elles permettent en revanche de mieux comprendre les observations habituellement faites sur le comportement d'espèces bien connues, comme le hêtre et, par là, de prédire leur réaction dans des contextes plus inhabituels (notamment dans différents types de mélange). Ensuite, et c'est là tout l'intérêt de l'approche biologique, elles permettent d'anticiper le comportement des essences moins

connues ou sujettes à controverse, comme par exemple l'alisier torminal ou le tilleul, en indiquant les paramètres et les processus qu'il est nécessaire de bien caractériser pour pouvoir déterminer la tolérance à l'ombre de ces espèces. Enfin, et c'est un point important, elles permettent d'anticiper certains impacts possibles des changements climatiques sur la tolérance à l'ombre des différentes essences, en fournissant un modèle d'étude théorique qui permet d'intégrer certains des changements attendus (augmentation des températures, diminution de la disponibilité en eau).

De notre point de vue, les principales notions à retenir dans le concept de tolérance à l'ombre et le modèle théorique qui lui est associé sont les suivantes :

- La tolérance à l'ombre des jeunes arbres est liée à leur capacité de survie sous ombre et non à leur capacité de croissance. De fait, pour un jeune arbre, la meilleure stratégie pour assurer la survie dans des conditions de faible lumière est de limiter la croissance pour éviter d'augmenter les dépenses en carbone, minimiser la superposition des feuilles et parfois augmenter significativement la durée de vie des feuilles lorsque cela est possible.

- Il en résulte une dimension maximale que les semis peuvent atteindre dans un environnement lumineux donné, pour chaque espèce en fonction de son degré de tolérance à l'ombre. L'établissement des relations entre lumière disponible et taille maximale des semis peut fournir une base intéressante pour quantifier le rythme d'enlèvement du couvert dans les régénérations, et plus particulièrement dans les régénérations mélangées où l'on cherche obtenir une composition spécifique bien déterminée.

■ La tolérance à l'ombre est déterminée par la capacité à maintenir un bilan de carbone positif et tout facteur qui affecte les gains ou les pertes de carbone (par ex. diminution de la disponibilité en eau, ou herbivorie) la modifie directement.

■ La stratégie de développement des espèces tolérantes leur assure certainement une survie prolongée sous couvert, mais n'est pleinement efficace que si l'individu ainsi contraint est capable de reprendre très vite une croissance rapide lors de la mise en lumière. En effet, dans la situation d'ombre il n'a en général que peu de concurrents ; mais lors de la mise en lumière, la concurrence par la végétation herbacée et par les essences de lumière devient forte. L'avantage acquis par le développement modeste sous ombre doit alors être valorisé par une croissance rapide.

Erwin DREYER

INRA Nancy, UMR 1137 – EEF
dreyer@nancy.inra.fr

Pierre MONTPIED

INRA Nancy, UMR 1137 – EEF

Daniel EPON

Nancy-Université, UMR 1137 – EEF

Catherine COLLET

INRA Nancy, UMR 1092 — LERFoB

Bibliographie

BARIGAH T.S., IBRAHIM T., BOGARD A., FAIVRE-VUILLIN B., LAGNEAU L.A., MONTPIED P., DREYER E., 2006. Irradiance-induced plasticity in the hydraulic properties of saplings of different temperate broad-leaved forest tree species. *Tree Physiology* vol. 26, pp.1505-1516

BARTHOD S., EPON D., 2005. Variations of construction cost associated to leaf area renewal in saplings of two co-occurring temperate tree species (*Acer platanoides* L. and *Fraxinus excelsior* L.) along a light gradient. *Annals of Forest Science*, vol. 62 pp.545-551

CAQUET B., 2008. Réactions de semis naturels de hêtre (*Fagus sylvatica* L.) et d'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus* L.) à l'ouverture du couvert : croissance et ajustements fonctionnels. Thèse Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie Ressources Procédés Produits Environnement. Nancy : Université Henri Poincaré, 140 p.

CAQUET B., BARIGAH T.S., COCHARD H., MONTPIED P., COLLET C., DREYER E., EPON D., 2009. Hydraulic properties of naturally regenerated beech saplings respond to canopy opening. *Tree Physiology*, vol. 29 pp. 1395-1405

COCHARD H., LEMOINE D., DREYER E., 1999. The effects of acclimation to sunlight on the xylem vulnerability to embolism in *Fagus sylvatica* L. *Plant, Cell & Environment*, vol. 22 pp.101-108

COLLET C., LANTER O., PARDOS M., 2002. Effects of canopy opening on the morphology and anatomy of naturally regenerated beech seedlings. *Trees*, vol. 16 pp. 291-298

COSTE S., 2008. Diversité et plasticité des traits foliaires en forêt tropical humide. Thèse Ecole

Doctorale Ressources Produits Procédés Environnement. Nancy : AgroParisTech, 324 p.

COSTE S., ROGGY J.C., SCHIMANN H., SONNIER G., EPON D., DREYER E., 2009. Irradiance-elicited plasticity of construction costs and leaf life-span in tropical rainforest trees: a cost/benefit analysis. soumis

COSTE S., ROGGY J.C., SONNIER G., DREYER E., 2010. Similar irradiance-elicited plasticity of leaf traits in saplings of 12 tropical-rainforest tree species with highly different leaf mass-to-area ratio. *Functional Plant Biology*. In press

DELAGRANGE, S., HUC F., MESSIER C., DIZENGREMEL P., DREYER E., 2006. *In vivo* and *in situ* rhizosphere respiration in *Acer saccharum* and *Betula alleghaniensis* seedlings grown under contrasting light regimes. *Tree Physiology*. vol. 26 pp.925-934

DREYER E., COLLET C., MONTPIED P., SINOQUET H., 2005. Caractérisation de la tolérance à l'ombrage des jeunes semis de hêtre et comparaison avec les essences associées. *Revue Forestière Française*, vol. 57 pp.175-188

MESSIER C., DOUCET R., RUEL J.-C., CLAVEAU Y., KELLY C., LECHOWICZ M.J., 1999. Functional ecology of advance regeneration in relation to light in boreal forests. *Canadian Journal of Forest Research*. vol. 29 pp. 812-823

MONTPIED P., GRANIER A. DREYER E., 2009. Seasonal time-course of gradients of photosynthetic capacity and mesophyll conductance to CO₂ across a beech (*Fagus sylvatica* L.) canopy. *Journal of Experimental Botany*, vol. 60 pp. 2407-2418

ONF, 1997. La lumière et les forêts. Office National des Forêts-Bulletin technique n° 34 pp.1-167

Comment estimer la lumière dans le sous-bois forestier à partir des caractéristiques dendrométriques des peuplements ?

La lumière pilote de nombreux processus en forêt. Son dosage est souvent à la base de la sylviculture. Elle n'est cependant pas facilement appréhendable ou mesurable sur le terrain. C'est pourquoi son estimation, par exemple en établissant des relations entre la lumière sous couvert et les caractéristiques dendrométriques des peuplements, serait une aide précieuse pour définir différents itinéraires techniques. Dans quelle mesure cela est-il possible ? Cet article fait le point des connaissances actuelles en la matière, en peuplements réguliers puis irréguliers et/ou mélangés.

La lumière pilote de nombreux processus en forêt

La lumière (voir encadré 1) a un rôle biologique fondamental. Elle a probablement été un facteur essentiel de la formation et du développement de la vie sur terre, tant par le maintien d'une température ambiante favorable que par les réactions photochimiques qu'elle permet, notamment la photosynthèse. En forêt la lumière traverse une structure complexe constituée d'éléments (feuilles, branches, troncs) ayant des propriétés optiques spécifiques, qui tour à tour la réfléchissent, l'absorbent ou la transmettent. Sa quantité et sa qualité sont fortement modifiées au fur et à mesure de sa traversée de la canopée. De plus, l'hétérogénéité du couvert crée de nombreuses taches d'ombre ou de lumière, de tailles variables et se déplaçant avec le temps, depuis les petites taches centimétriques jusqu'aux grandes trouées décamétriques. En fonction de leur dimension, elles reçoivent un éclairage direct sur des durées variant de quelques secondes à plusieurs heures. Les effets de la saison ou des conditions météorologiques du moment (journée ensoleillée ou bien nuageuse) sur les caractéristiques de l'éclairage incident ne sont pas moindres.

C'est la combinaison de tous ces facteurs qui va déterminer la quantité et la qualité de la lumière parvenant au niveau du sol et donc le microclimat du sous-bois, la composition et la dynamique de la flore (Balandier et Pauwels, 2002), les possibilités de régénération des arbres et les habitats de la faune et de la microfaune. Les plantes, et en particulier les jeunes arbres forestiers, réagissent souvent très vite aux modifications de l'environnement lumineux (voir Collet, ce même numéro). Quand la lumière est réduite, elles entrent en compétition pour accéder à cette ressource devenue limitante. Elles adaptent leur appareil foliaire pour capter le maximum d'énergie lumineuse ainsi que leur croissance et leur forme pour continuer à accéder à la lumière. De la même façon, à l'échelle des communautés végétales, les populations évoluent en fonction de la lumière disponible : apparition ou disparition d'espèces, changement de leur proportion relative ou de leur recouvrement, en fonction de leur tolérance à l'ombrage. Pour beaucoup d'espèces, nous possédons un certain nombre de données pour quantifier (au moins de façon grossière) ces diverses relations. Pour les grandes

essences forestières, on dispose de valeurs seuils de quantité de lumière nécessaire à la survie, à la croissance et au bon développement des arbres dans les jeunes stades (Dreyer et al., 2005 ; Vinkler et al., 2007). Ces valeurs diffèrent fortement entre les essences et le dosage de la quantité de lumière parvenant au sol permet de contrôler leur développement relatif.

La sylviculture vise à doser la quantité de lumière dans le sous-bois

Pour toutes ces raisons le forestier a de tout temps cherché à doser la quantité de lumière parvenant au sol, par le biais de la sylviculture pratiquée et plus spécifiquement des éclaircies. Si les niveaux de lumière requis pour diriger la dynamique des différents processus dans une direction souhaitée sont plus ou moins bien connus, il manque encore au sylviculteur des outils qui lui permettent d'estimer les niveaux de lumière régnant sous le couvert. Mesurer directement la lumière dans le sous-bois n'est pas aisé à cause de la grande variabilité spatiale et temporelle de sa distribution, mais aussi parce que les systèmes de mesure existant actuelle-

1 - Lumière, loi de Beer-Lambert et transmittance du couvert

Le spectre solaire correspond à la répartition des ondes du rayonnement électromagnétique du soleil. Le rayonnement solaire est modifié quantitativement et qualitativement lors de son passage dans l'atmosphère ; cette dernière l'absorbe et le disperse sélectivement, changeant le flux et le spectre atteignant la terre. Le rayonnement solaire parvenant au sol est appelé rayonnement global. Il est constitué de deux types de rayonnement :

- le rayonnement direct, qui parvient directement du disque solaire après la traversée de l'atmosphère.
- le rayonnement diffus, qui provient de la diffusion dans l'atmosphère d'une partie du rayonnement solaire ; il parvient de l'ensemble de la voûte céleste.

La qualité du rayonnement global incident résulte de l'importance relative de ces deux composantes et dépend donc de la latitude, de l'heure, de la saison, de l'altitude du lieu et des conditions atmosphériques.

Le spectre solaire s'étale entre 300 et 3 000 nanomètres (nm). La lumière est l'ensemble des rayonnements électromagnétiques visible par l'œil humain, dont les longueurs d'onde sont comprises entre 380 et 780 nm. Le rayonnement photosynthétiquement actif (RPA) correspond à la fraction du rayonnement utile pour la photosynthèse (400 – 700 nm).

La loi de Beer-Lambert décrit la diminution exponentielle d'un rayonnement lors de sa traversée d'un milieu trouble. Par analogie on peut appliquer cette loi aux canopées végétales. On considère alors les houppiers comme remplis uniformément et aléatoirement de petites particules de feuilles ayant une densité D (figure ci-dessous). Soit un rayon incident I_0 parvenant à la surface d'un houppier. Sa probabilité d'interception par le houppier est fonction de la longueur L du trajet dans le houppier et de sa densité foliaire D . I est le rayon finalement transmis par le houppier.

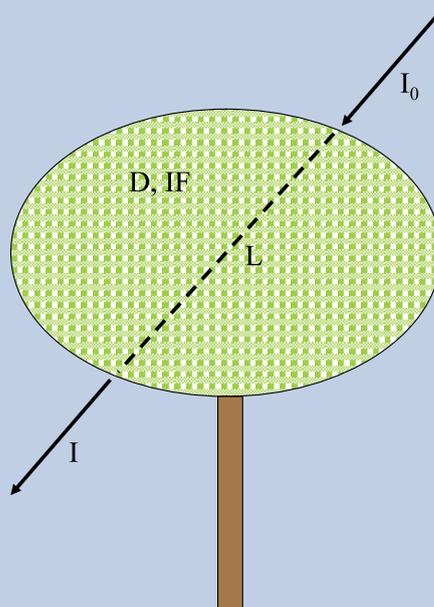
La relation de Beer-Lambert s'écrit alors :

$$I = I_0 \cdot \exp(-k \cdot L \cdot D),$$

k étant le coefficient d'extinction du couvert. I/I_0 définit la transmittance T du couvert, c'est-à-dire la proportion de lumière parvenant au sol. En pratique elle peut s'estimer par la mesure sous la canopée de I et simultanément de I_0 dans un lieu à découvert proche du peuplement forestier. D et L ne se mesurent pas facilement. C'est pourquoi on utilise plus fréquemment l'indice foliaire IF qui correspond à la surface foliaire de la canopée par unité de sol (m^2 de feuille par m^2 de sol) qui prend en quelque sorte en compte D et L . La relation s'écrit alors :

$$T = I/I_0 = \exp(-k \cdot IF).$$

Comme l'indice foliaire n'est lui-même pas toujours facilement mesurable, on lui substitue souvent des variables plus facilement appréhendables, comme par exemple la surface terrière, avec lesquelles il est lié.



ment sont fragiles, coûteux, et souvent lourds à mettre en œuvre. Une alternative est de disposer de relations liant le niveau de lumière sous couvert à certaines caractéristiques dendrométriques du peuplement, que le sylviculteur pourrait aisément mesurer. Ces relations permettraient ainsi d'estimer assez simplement la lumière. Dans cet article, nous présentons certaines relations obtenues entre différentes caractéristiques dendrométriques et la quantité de lumière disponible en sous-bois et nous discutons des perspectives ouvertes par cette approche et de ses principales limitations, notamment pour les peuplements irréguliers et/ou mélangés.

La surface terrière est un bon indicateur de l'éclairement en peuplement régulier

En peuplement pur et régulier, dans lequel les arbres appartiennent à une même strate et ont une répartition relativement uniforme dans le peuplement, la distribution de la lumière dans le sous-bois peut être assez facilement appréhendée par des variables dendrométriques simples. Le pourcentage de couvert, la densité du peuplement, le facteur d'espacement, parfois la hauteur des arbres sont des variables pertinentes pour estimer la lumière. Cependant, la variable la plus simple qui permet d'estimer avec une assez bonne précision la lumière dans le sous-bois est encore la surface terrière du peuplement, G ($m^2 \text{ ha}^{-1}$). La surface terrière rend assez bien compte de l'indice foliaire du peuplement (voir encadré 1), tout au moins en absence de perturbations récentes. Par analogie à la loi de Beer-Lambert on montre alors que la transmittance moyenne journalière T décroît de façon exponentielle quand la surface terrière du peuplement augmente : $T = \exp(-k \cdot G)$, k étant le coefficient d'extinction du peuplement (voir Sonohat *et al.*, 2004 et Balandier *et al.*, 2006 pour le détail des calculs). Le paramètre k est dif-

férent d'une espèce à une autre ; à surface terrière égale elles n'interceptent donc pas toutes la lumière de la même façon (figure 1).

L'existence d'une bonne relation entre la surface terrière et la transmittance suppose que la relation qui lie la surface terrière du peuplement à son indice foliaire, à la base de l'interception de la lumière, soit stable dans le temps. Dans le cas contraire, il est nécessaire d'introduire dans l'équation des variables supplémentaires, qui permettent de tenir compte de ces variations temporelles. Ainsi, la prise en compte de l'âge du peuplement ou bien des caractéristiques de la dernière éclaircie (temps écoulé depuis la dernière éclaircie et intensité d'éclaircie) peuvent améliorer sensiblement la prédiction de la transmittance (Sonohat *et al.*, 2004). L'âge rend compte d'une augmentation de la surface foliaire des arbres dans le jeune âge et d'une diminution progressive avec leur vieillissement, toute proportion gardée par rapport à leur surface conductrice de tronc et indépendamment de la densité du peuplement. Les caractéristiques de la dernière éclaircie ont un peu un rôle semblable mais sur le court terme (quelques années).

La lumière n'est jamais uniforme sous le couvert

La lumière transmise dans le sous-bois présente une forte variabilité temporelle et spatiale autour de la moyenne. La variabilité temporelle intègre différentes échelles de temps : des variations journalières déterminées essentiellement par la trajectoire du soleil, des variations saisonnières (diminution très rapide de la transmittance avec la mise en place des feuilles en début de saison, notamment pour les essences feuillues, puis augmentation significative dès le mois d'août lorsque les feuilles sénescents commencent à tomber) et enfin des variations interannuelles déterminées par les épisodes d'ouverture et de ferme-

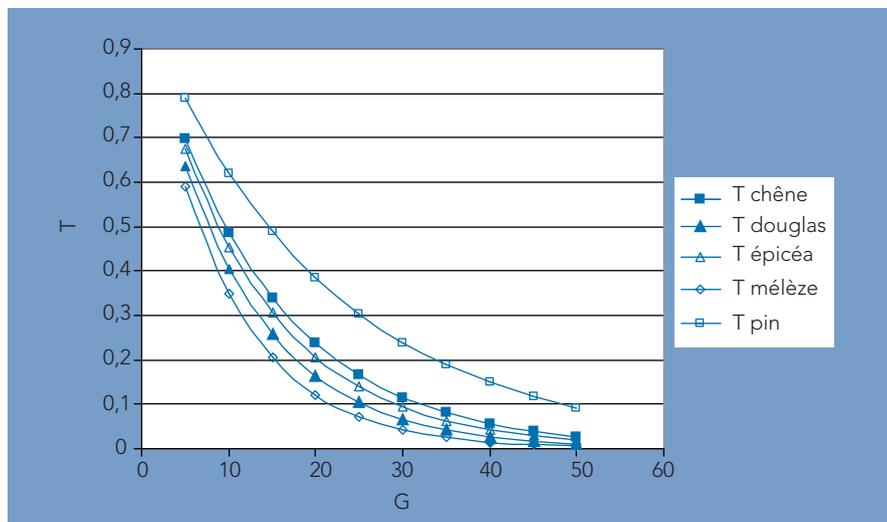


Fig. 1 : décroissance exponentielle de la lumière moyenne journalière transmise dans le sous-bois (T, transmittance), au milieu de la saison de végétation, par diverses essences en peuplements réguliers en fonction de leur surface terrière G (m² ha⁻¹)

ture du couvert (chablis, coupes...). Sur le plan de la variabilité spatiale, même en peuplement pur et régulier, la lumière transmise présente une variabilité significative. Cette variabilité, mesurée par le coefficient de variation ((écart-type/moyenne)*100) s'établit autour de 20 %, quelle que soit la parcelle considérée et sa surface terrière.

La variabilité spatiale augmente très fortement en peuplement hétérogène

En peuplement hétérogène, c'est-à-dire présentant une forte variabilité de structure spatiale verticale ou horizontale (présence d'arbres de différentes espèces, de différentes dimensions, de trouées de dimensions et de formes variées), la variabilité spatiale de la lumière transmise au sol augmente très fortement. En moyenne à l'échelle d'une placette la transmittance peut être prédite par la surface terrière du peuplement (voir encadré 2) mais cette moyenne n'a guère de sens quand la transmittance mesurée à quelques mètres de distance peut varier de plus de 120 %. Cette variabilité est forte pour tous les niveaux de surface terrière (sauf bien sûr en peuplement complètement fermé).

Les variables caractérisant des grandeurs moyennes de peuplement ne suffisent donc plus pour prédire un éclaircissement local. Cependant, même des variables reflétant la structure locale du peuplement ne permettent pas de bonnes prédictions de la lumière, ou bien demandent des mesures trop lourdes pour pouvoir être utilisées en routine (surface de houppier des arbres par exemple, voir encadré 2). Par ailleurs les variables dendrométriques qui pourraient être utilisées sur une parcelle ne le seront pas forcément pour une autre. Il est aussi intéressant de signaler que la distance sur laquelle les variables du peuplement décrites localement permettent d'estimer la lumière dépend de la fermeture du couvert local, et donc de la quantité de lumière transmise. Ainsi dans une étude sur la forêt de Lorris (voir encadré 2) les mesures montrent qu'à faible niveau de transmittance (0,0-1), la densité des arbres précomptables sur un rayon de 6 m centré sur la zone d'intérêt a donné une bonne indication de la lumière, alors qu'à fort niveau de transmittance (0,2-1), c'est la densité sur un rayon de 20 m qui fournit le meilleur estimateur.

2 - Prédire la lumière en peuplement hétérogène : des résultats contrastés

Dans le cadre du projet ECOGER sur les forêts mélangées, 11 placettes présentant différents niveaux d'hétérogénéité du couvert et réparties dans la chaîne des Puys, en forêt d'Orléans et sur le Mont-Ventoux, ont été sélectionnées pour étudier les relations entre structure du couvert et éclairage transmis. Une caractérisation dendrométrique fine de leur structure (cartographie des arbres, de leur diamètre, hauteur, longueur et surface de houppier) et des mesures de lumière selon un maillage régulier ont été faites. Sur l'ensemble des sites, les essences considérées, souvent en mélange, étaient principalement le pin noir, le pin sylvestre, le chêne sessile, le bouleau, le hêtre, l'alisier torminal et le sapin. La surface terrière moyenne variait de 14 à 54 m², avec parfois de très fortes hétérogénéités locales. La transmittance moyenne par placette a varié de 0,05 à 0,54 et l'application de la relation liant la transmittance à la surface terrière du peuplement, $T = \exp(-k \cdot G)$, donne une prédiction correcte ($R^2 = 57\%$). Cependant cette moyenne n'a pas vraiment de sens si l'on considère la très forte variabilité spatiale au sein même des placettes (coefficient de variabilité dépassant parfois les 120 %). Sur une parcelle du Mont-Ventoux nous avons par exemple relevé des transmittances s'échelonnant de 0,006 à 0,56 sur les 64 points de mesure. Nous avons tenté de relier la transmittance mesurée par un capteur à différentes variables dendrométriques relevées sur des disques de rayons variables (de 0,5 à 2 fois la hauteur de l'arbre moyen) centrés sur la mesure de lumière. Parmi les différentes variables testées, la somme des surfaces des houppiers, la densité des arbres ou la surface terrière sont les variables rendant le mieux compte de la transmittance mais avec une prédictibilité moyenne à faible ($R^2 = 62\%$, 50% et 24% , respectivement). La prise en compte de l'azimut des arbres apporte un gain de précision ($R^2 = 38\%$) mais cette variable n'est pas aisée à mesurer en routine. Il faut noter qu'en fonction des placettes et de leur structure spatiale, ce ne sont pas les mêmes variables qui donnent les meilleurs résultats.

En forêt d'Orléans, massif de Lorris, 40 placettes circulaires ont été implantées dans des peuplements mélangés à base de chêne et de pin sylvestre pour étudier la croissance de semis et gaules de pin sylvestre dans des conditions de luminosité contrastées. Une mesure de lumière a été réalisée par un capteur positionné au centre de la placette, à une hauteur variable correspondant à la

hauteur totale du pin étudié, soit entre 0,5 et 6 m. Le peuplement environnant a été décrit (essence, diamètre, hauteur du plus gros arbre) sur trois disques concentriques emboîtés de rayon égal à la hauteur du pin, égal à 6 m ou bien égal à 20 m. La transmittance mesurée varie de 0,03 à 0,93 pour une gamme de surface terrière allant de 8 à 31 m². Dans ce contexte de peuplements hétérogènes présentant une forte variabilité horizontale, la surface terrière mesurée sur 20 m explique peu les variations de la lumière transmise ($R^2 = 28\%$). L'introduction de la proportion de chêne et de pin n'améliore pas l'estimation, contrairement à ce que l'on aurait pu attendre compte tenu des différences entre les coefficients d'extinction des deux espèces (figure 1). Les variables mesurées sur un cercle plus restreint – surface terrière sur 6 m, densité totale sur 6 m, distance à l'arbre précomptable le plus proche — utilisées seules, ne sont pas plus performantes. Il est nécessaire d'associer plusieurs variables pour obtenir une indication satisfaisante de la lumière transmise : surface terrière du peuplement environnant, hauteur de mesure de la lumière, nombre de tiges du sous-étage, distance à l'arbre précomptable le plus proche et surface terrière locale (6 m) ($R^2 = 68\%$).

En forêt du Graouilly (57), dans un ancien TSF contenant de nombreuses essences en mélange, nous avons étudié les relations entre structure du couvert et éclairage transmis. Une description de l'ensemble du peuplement (1 ha) a été effectuée (localisation, hauteur, diamètre et dimensions des houppiers de tous les arbres). Un modèle de transmission de lumière a été appliqué sur une maquette du peuplement. Les valeurs fournies par le modèle ont été mises en relation avec différentes variables dendrométriques caractérisant la structure locale du peuplement : surface terrière ou somme des surfaces de houppier, calculées sur des cercles de rayon variable (de 10 à 50 m) et sur différents secteurs angulaires (est, ouest, nord, sud) et pondérées ou non par les hauteurs de houppiers. Les différents indices dendrométriques calculés ont montré que la surface terrière ou la somme des surfaces de houppiers avaient un lien évident avec la quantité de lumière transmise. Néanmoins, ces variables se sont révélées insuffisantes pour prédire de manière satisfaisante la lumière transmise en un point donné du peuplement (Piboule, 2005).

Définir l'hétérogénéité du peuplement

Un problème majeur est donc de quantifier l'hétérogénéité d'un peuplement et la valeur seuil d'hétérogénéité où l'utilisation de variables représentant des grandeurs moyennes calculées à des échelles locales ou plus larges ne permet plus de prédire la lumière transmise en un point du peuplement. Or, la structure spatiale de peuplements hétérogènes est difficile à décrire. La définition même de ce qu'est une trouée et comment la mesurer reste assez polémique. Si l'on dispose d'une cartographie des arbres (leur localisation au sol), la structure spatiale en deux dimensions du peuplement peut être caractérisée par des indices mathématiques, par exemple basés sur les distances entre arbres. On peut alors situer le peuplement par rapport à des distributions théoriques régulières, aléatoires ou agrégées (Goreaud et al., 2007). L'utilisation d'un tel indice de structure spatiale, en complément du couvert par strate ou de la surface terrière permet d'améliorer la prédiction par les modèles de la lumière moyenne au sol et de sa variabilité. Cependant une difficulté supplémentaire s'ajoute lorsque la structure verticale du peuplement est également hétérogène. Il faut alors obtenir une description en trois dimensions du peuplement.

Peut-on utiliser facilement l'outil de modélisation pour prédire la lumière ?

S'il est difficile d'utiliser directement des variables dendrométriques pour calculer la lumière en un point donné, une alternative est l'utilisation de maquettes informatiques de peuplement et des modèles de transmission de lumière simulant la distribution de l'éclairement sous le peuplement (figure 2).

Cette approche est très coûteuse en termes de données à acquérir pour constituer les maquettes. Néanmoins, elle constitue un outil pour étudier les relations entre structure du couvert et éclairement transmis et pour analyser les conséquences de modification du couvert sur l'éclairement (éclaircies, chablis, dépérissement). Par exemple Gauquelin et al. (2008) utilise de telles approches pour simuler un marteloscope (voir ci-contre). La simulation des interventions proposées par les participants débouche généralement sur des distributions d'éclairement au sol très variables suivant les stratégies d'éclaircies : éclaircies par pied d'arbre ou par trouées, détournement d'arbres d'avenir. En analysant *a posteriori* le résultat de différentes interventions, les participants acquièrent progressivement une meilleure appréciation de l'effet de la sylviculture sur l'éclairement.

Cependant ces démarches de modélisation ne sont fonctionnelles que si l'échelle de description du peuplement est suffisamment fine, par exemple description des houppiers des arbres, cartographie de l'emplacement des arbres. Or, comme précédemment, ces variables ne sont pas mesurées en routine par le forestier et la méthode utilisant la modélisation a donc ses limites.

Vers de nouveaux outils

Des pistes sont cependant possibles. D'une part, utiliser l'outil de modélisation en lui-même pour tester la pertinence de différentes variables dendrométriques, et les retenir ou non, dans l'estimation d'un éclairement réaliste localement. D'autre part, à partir des outils de la statistique spatiale, développer des méthodes de reconstruction de peuplements virtuels réalistes (Goreaud et al., 2007). Il s'agit de générer une liste d'arbres définis par leur position, hauteur, diamètre, à partir d'un jeu de données limité pris sur un échantillon d'arbres et en vérifiant certaines contraintes de structure. Le peuplement (virtuel) obtenu ne correspond pas à la répartition spatiale réelle des arbres mais en présente les mêmes propriétés structurelles (présence d'agrégats, ou au contraire de trouées, etc.) Ces voies sont en

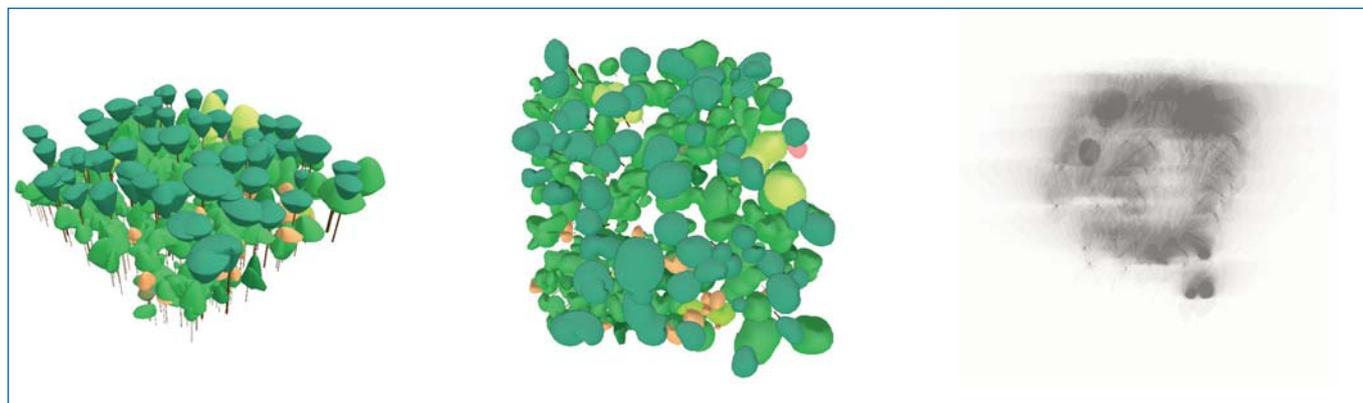


Fig. 2 : reconstitution informatique d'une placette mélangée essentiellement à base de pin sylvestre et de chêne (vue de 3/4 et de dessus) et simulation de la carte d'éclairement (Da Silva, 2008)

Utilisation pratique d'un modèle de croissance simulant la distribution de la lumière Application en martéloscope

par Xavier Gauquelin, ONF-DTCB

Dans le cadre de formations sur la sylviculture en forêt de montagne, l'ONF Rhône-Alpes utilise depuis l'année 2000 un réseau de martéloscopes, dont certains ont été couplés au modèle de croissance SAMSARA pour les peuplements irréguliers des Alpes du nord. Sur ces placettes ont été notés pour chaque arbre : essence, diamètre, hauteur, hauteur de la base du houppier, quatre rayons du houppier.

Les simulations d'interventions proposées par les stagiaires sont saisies :

- sur un tableur permettant d'analyser les caractéristiques quantitatives (nombre de tiges, surface terrière et volume prélevés ; dimensions de l'arbre moyen martelé) et qualitatives (évolution du mélange et du type de peuplement, nature de la coupe) du martelage fictif ;
- sur le logiciel CAPSIS en utilisant le modèle SAMSARA, pour apprécier la répartition spatiale des arbres martelés (pied à pied, par grandes ou petites trouées) et l'évolution probable du peuplement sur 20 à 25 années (croissance, mortalité, régénération).

L'évolution du peuplement est principalement simulée sur la base de la lumière reçue par chaque houppier d'arbre (qui commandera croissance ou mortalité), mais aussi de la lumière reçue au sol (qui permettra ou non l'installation de semis).

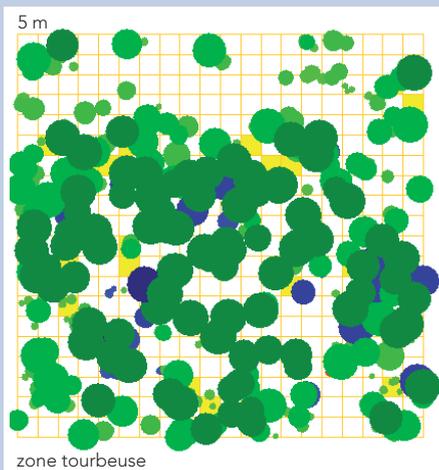
L'illustration ci-dessous donne l'exemple d'un exercice sur le martéloscope de Crest-Voland (Savoie). L'intervention fictive a permis :

- la mise en place de 3 petites trouées (dimensions moyennes de 25 à 40 m) apportant localement une lumière importante ;
- la récolte privilégiée de gros bois de qualité (diamètres 50 à 70 cm).

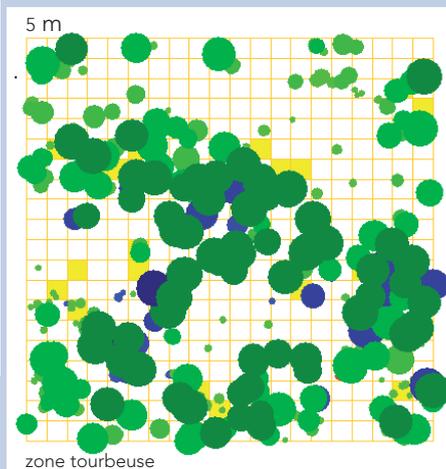
Après 25 années, le renouvellement du peuplement est assuré par l'obtention d'une régénération acquise d'Épicéa dans les seules trouées créées ; la structure irrégulière du peuplement est ainsi maintenue. Sans attendre jusque-là, une nouvelle récolte analogue est envisageable 15 à 20 ans après cette première intervention.

*Martéloscope de Crest-Voland (Savoie) - Evolution probable du peuplement
(Utilisation du modèle SAMSARA sous le logiciel CAPSIS)*

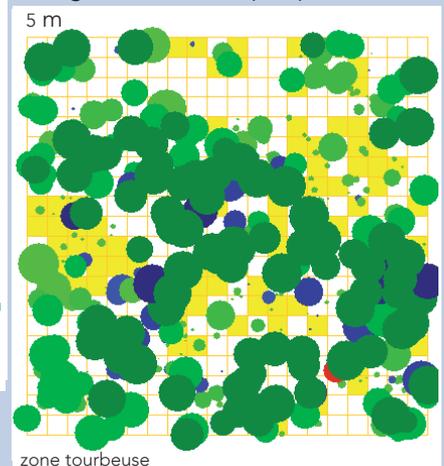
Année 0
Avant intervention



Année 0
Après coupe de 100 m³/ha,
en 3 trouées de 5 ares environ



Année 25
Régénération installée
dans les trouées ;
irrégularisation du peuplement



Légende

- Vert** : Epicéa
- Bleu** : Sapin
- Rouge** : Sorbier

La densité des couleurs correspond à la hauteur des 4 strates observées (strate haute : couleur foncée ; strate basse : couleur claire)
Carrés jaunes : présence de régénération inférieure à 1,30 m

Conditions stationnelles du site

Etage subalpin (1 600 m d'altitude)
Pente faible (0 à 30%) - Exposition nord-est
Alternance de zones rocheuses (Pessière très acidiphile) et de zones tourbeuses (tourbière de pente partiellement boisée)

cours d'évaluation. Enfin, utiliser les nouvelles technologies comme le laser scanner terrestre ou le LIDAR pour obtenir des descriptions réalistes des peuplements. Ces appareils permettent d'obtenir une « photographie » en trois dimensions des peuplements. Ces « photographies » pourraient alors être à la base des maquettes informatiques pour simuler l'interception de la lumière. Ces techniques sont également en cours d'évaluation.

En pratique

La prédiction de l'éclairement sous couvert forestier à partir de variables dendrométriques simples, prises en routine lors d'inventaires, est possible en peuplements réguliers. L'éclairement y est en effet peu variable, de sorte que le forestier peut calculer, par exemple, une surface terrière moyenne qu'il faudrait enlever en éclaircie pour favoriser la régénération de certaines espèces, favoriser certaines structures végétales pour créer des habitats particuliers ou bien d'autres processus dont nous connaissons l'optimum lumineux. La situation est plus complexe en peuplements mélangés et/ou irréguliers puisque la variabilité de l'éclairement conduit à une mosaïque d'optimum lumineux correspondant à divers processus ou objectifs. Localement tel éclairement peut favoriser la régénération d'une espèce donnée mais quelques mètres plus loin, l'éclairement sera suffisamment différent pour favoriser une autre espèce. Dans ce type de peuplement le forestier doit donc plus raisonner en terme de distribution de l'éclairement (pourcentage de surface du peuplement recevant 5, 10 ou x % de lumière) plutôt qu'en terme de moyenne. La mesure de variables dendrométriques simples ne peut pas répondre à cet objectif. En revanche, différents outils (statistiques, LIDAR), actuellement en cours d'étude et qui sont basés sur des approches de modélisation, permettront sans doute d'estimer la

distribution de la lumière dans un peuplement à partir de variables dendrométriques caractérisant sa structure.

Philippe BALANDIER

Cemagref Nogent-sur-Vernisson
Unité Écosystèmes Forestiers
et INRA Clermont-Ferrand
UMR547 PIAF
philippe.balandier@cemagref.fr

André MARQUIER

INRA Clermont-Ferrand
UMR547 PIAF

Sandrine PERRET

Cemagref Nogent-sur-Vernisson
Unité Écosystèmes Forestiers

Catherine COLLET

INRA/ AgroParisTech Nancy
UMR1092 - LERFoB

Benoît COURBAUD

Cemagref Grenoble
Unité Écosystèmes Montagnards

Bibliographie

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 Wallonne n° 61, pp. 9-13

BALANDIER P., SONOHAT G., SINOQUET H., VARLET-GRANCHER C., DUMAS Y., 2006. Characterisation, prediction and relationships between different wavebands of solar radiation transmitted in the understorey of even-aged oak (*Quercus petraea*, *Q. robur*) stands. *Trees*, vol. 20, pp. 363-370

DREYER E., COLLET C., MONTPIED P., SINOQUET H., 2005 Caractérisation de la tolérance à l'ombrage des jeunes semis de hêtre et comparaison avec les espèces associées. *Revue Forestière Française* vol. 57, pp. 175-188

DA SILVA D., BOUDON F., GODIN C., SINOQUET H., 2008. Multiscale framework for modeling and analyzing light interception by trees. *Multiscale Modeling and Simulations* vol. 7, n° 2, pp. 910-933

GAUQUELIN X., COURBAUD B., 2006. Guide de sylviculture des forêts de montagne - Alpes du Nord françaises. Cemagref - CRPF Rhône-Alpes - Office National des Forêts, 289 p.

GAUQUELIN X., COURBAUD B., FAY J., BERGER F., MERMIN E., 2008. Conduite de peuplements mélangés en forêt de montagne : exemple d'un transfert chercheurs-gestionnaires. *Revue Forestière Française* vol. LX, pp. 207-214

GOREAUD F., RÉGIS A., COURBAUD B., NGO BIENG M.A., PÉROT T., PIROCHE J.N., 2007. Simuler des peuplements de structures variées pour faciliter l'utilisation des modèles «arbre» spatialisés. *Revue Forestière Française* vol. LIX, pp. 137-161

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

ONF, 1997. La lumière et la forêt. Office national des forêts, Bulletin Technique n°34, 167 p.

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

VINKLER I., NINGRE F., COLLET C., 2007. Comportement du hêtre sous abri : les intérêts d'une bonne gestion du couvert. *Rendez-vous Techniques de l'ONF*, hors-série n° 2, pp. 48-58

Modélisation de la croissance des peuplements mélangés chêne - pin : des enseignements importants pour la sylviculture de ces peuplements

Les hêtraies sont au centre des travaux du programme fédérateur ECOGER sur les « Bases d'une gestion durable des forêts mélangées », mais le domaine est bien plus vaste. L'équipe Forêts Hétérogènes du Cemagref Nogent-sur-Vernisson, par exemple, étudie les peuplements mélangés chêne et pin, bien présents dans la région Centre : les travaux conduits par Thomas Pérot sur la modélisation apportent sur l'écologie des mélanges chêne sessile - pin sylvestre des résultats qui intéressent les sylviculteurs.

Thomas Pérot a soutenu fin juin 2009 une thèse sur la modélisation de la croissance des peuplements mélangés chêne - pin. Sous la direction de Christian Ginisty, François Goreaud et Jean-François Dhôte, et dans le cadre de la convention ONF-Cemagref « Sylviculture en forêt de plaine », il s'agissait de construire une famille de modèles de croissance à différents niveaux de détail et de les comparer en cherchant à déterminer, en fonction du contexte d'utilisation, le niveau approprié pour décrire et simuler la dynamique de croissance des peuplements mélangés.

Cette question a une grande importance pratique : les modèles détaillés représentent *a priori* mieux la diversité des situations de compétition, ils sont donc souvent présentés comme la solution incontournable pour les peuplements mélangés et/ou irréguliers ; en revanche, ils peuvent présenter une sensibilité exagérée et fournir des prédictions divergentes ou déraisonnables quand on pousse les simulations sur plusieurs décennies. Les modèles plus simples sont plus stables et plus faciles à contrôler, mais ils peuvent manquer de souplesse pour rendre compte des différentes configura-

tions rencontrées *in situ* (par exemple, la production du mélange dépend-elle de la répartition spatiale, plus ou moins agrégée, des espèces en présence ?).

Thomas Pérot a traité cette question de manière pragmatique, à partir de données récoltées dans des peuplements équiennes mélangés de chêne sessile et pin sylvestre en forêt domaniale d'Orléans (massif de Lorris). Au-delà des résultats concernant les modèles eux-mêmes, les analyses statistiques fouillées, réalisées pour les calibrer et les tester, apportent plusieurs résultats intéressants sur l'écologie de ces mélanges.

Ce compte rendu a pour objectif de faire ressortir les principaux résultats importants pour la sylviculture des mélanges chêne-pin. Il provient de notes prises lors de la soutenance et d'éléments repris du manuscrit de thèse (notamment les figures).

Les données de la forêt domaniale d'Orléans, massif de Lorris

Les données proviennent de peuplements de 60 à 90 ans, et plus précisément de 9 placeaux sélectionnés parmi ceux que Marie-Ange

Ngo Bieng avait déjà étudiés (2005-2007) pour la « Construction de modèles de structure spatiale permettant de simuler des peuplements virtuels réalistes », thèse précédemment soutenue par l'ONF. Ces placeaux, d'environ 1 ha chacun, avaient été mesurés et cartographiés en détail pour restituer finement la structure spatiale horizontale et verticale des peuplements. L'ensemble des 9 placeaux retenus pour étudier la croissance compte 2 731 tiges de chêne, 975 de pin et 502 tiges de feuillus divers (charme, bouleau et alisier torminal principalement), lesquels ne représentent que 4 % environ de la surface terrière totale.

La croissance a été étudiée grâce à des carottes prélevées sur un échantillon d'arbres (30 par essence par placeau), uniformément répartis dans les classes de diamètres, la sélection maximisant la variabilité de la compétition locale (en terme d'essences, tailles des compétiteurs et pression de compétition).

La construction des modèles

Il existe plusieurs types de modèles (représentations mathématiques) pour décrire la croissance des peu-

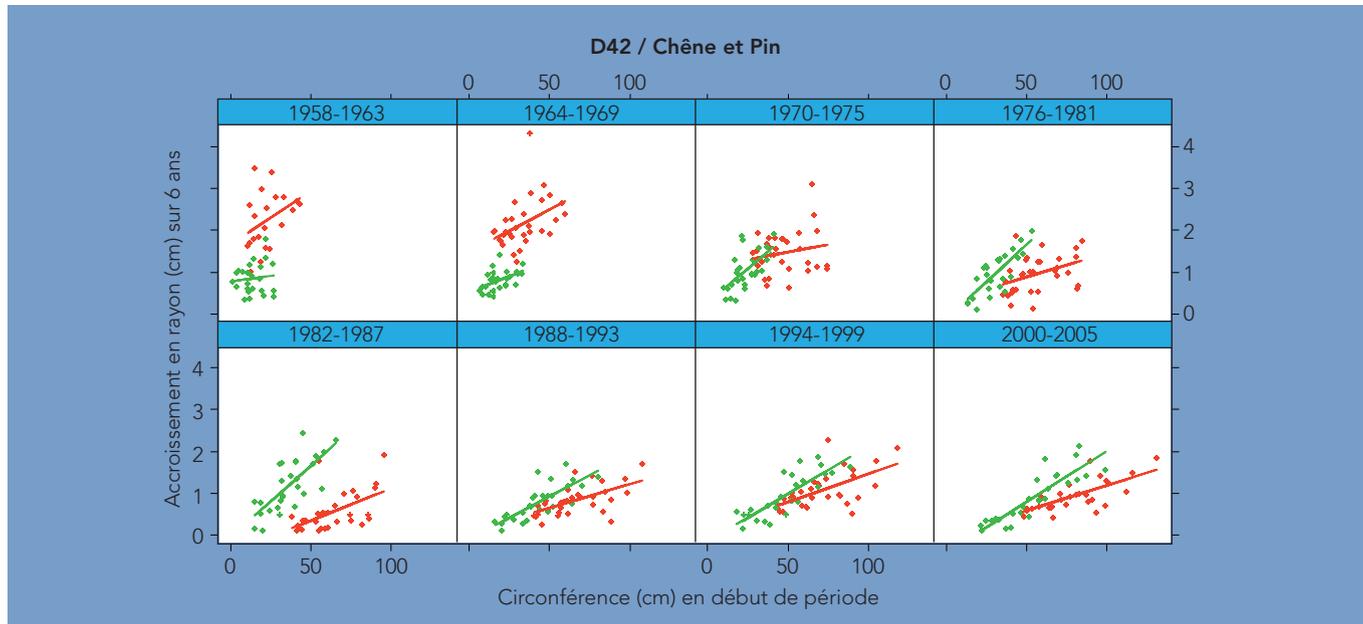


Fig. 1 : accroissement en rayon en fonction de la circonférence pour le plateau D42 sur 8 périodes de croissance de 6 ans allant de la période 1958-1963 à la période 2000-2005 ; chêne en vert, pin en rouge

peuplements sensiblement équiennes. Ce sont des ensembles d'équations dont il faut déterminer les paramètres selon les caractéristiques des peuplements concernés (essence(s), en particulier), en collationnant et en analysant rigoureusement des données de terrain. Ainsi construits ou « calibrés », ils doivent encore être testés. C'est pourquoi les données réunies par Thomas Pérot ont été partagées en deux jeux indépendants : l'un pour la calibration et l'autre, soit 1/3 des données sélectionnées par tirage aléatoire, pour évaluer la qualité prédictive (validité des simulations).

Le type le plus simple en principe est le modèle *peuplement* qui, à l'instar des tables de production, résume schématiquement le peuplement par sa densité N et ses caractéristiques moyennes. Plus complexes, les modèles individu centrés ou modèles *arbre* décrivent N individus différents : pour le modèle *arbre indépendant des distances* (MAID), c'est une simple liste d'arbres avec des critères de densité et de structuration sociale, tandis que le modèle *arbre dépendant des distances* (MADD) rend compte d'un environnement différent autour de chaque arbre.

L'un et l'autre exigent (pour la calibration) des analyses statistiques, qui aident à comprendre les mécanismes de la croissance. Pour voir comment les phénomènes décrits par le MADD ou le MAID se traduisent globalement dans le comportement des peuplements (et étudier/prédire la croissance à ce niveau), ces modèles individu centrés peuvent être « agrégés » en modèles *peuplement*.

Un modèle d'Arbre Indépendant des Distances (MAID)

Un premier modèle MAID a été construit en établissant une relation entre l'accroissement en rayon et la taille initiale des arbres. L'analyse montre en effet (figure 1) qu'à taille donnée, l'accroissement en rayon des pins est plus rapide dans le jeune âge que celui des chênes, tandis que la situation s'inverse aux âges élevés. Sur la période de croissance 2000-2005 ce modèle permet d'expliquer 43,3 % de variabilité pour les chênes contre 15,5 % pour les pins.

Un travail a été fait pour relier les paramètres calculés pour chaque plateau à des variables explicatives globales (hauteur dominante, densité, âge, etc.) et rendre le modèle

plus général. S'il apparaît clairement que ces paramètres évoluent avec le temps (avec l'âge du peuplement), le travail n'a pas pu aller jusqu'à produire un modèle général chêne-pin valide sur tout un cycle sylvicole. Néanmoins, ce premier modèle permet d'ores et déjà de faire des simulations dans des contextes proches (station, âges, structures des peuplements) et se prête bien à la comparaison avec des modèles plus ou moins détaillés (peuplement ou arbre dépendant des distances).

Un modèle d'Arbre Dépendant des Distances (MADD)

Un modèle MADD a ensuite été construit pour expliquer la variation subsistant autour du modèle précédent, en supposant qu'elle est due à des différences de compétition locale ou de composition du voisinage.

Plusieurs indices de compétition (ex : surface terrière locale) ont été testés à cette fin. Il s'avère que ceux basés sur les voisins distants de moins de 10 m sont les plus pertinents, et aussi que **la compétition intraspécifique est systématiquement plus forte que la compéti-**

tion interspécifique : pour les chênes, la compétition des chênes voisins est 1,5 à 3 fois plus forte que celle exercée par les pins voisins, tandis que pour les pins, la compétition des chênes voisins n'est pas significative. Il est possible d'affirmer que ce résultat ne traduit pas seulement un effet de stratification sociale, mais bien un effet d'interactions différenciées entre les espèces. Ce premier résultat, en soi, est assez original (il y a peu de travaux qui en ont réellement fait la démonstration).

Par rapport au modèle précédent (MAID), ce modèle MADD avec indices de compétition locaux permet d'expliquer 14,8 % de variabilité supplémentaire pour les chênes et 5,7 % pour les pins. Cependant, en comparant le MADD et le MAID sur des données d'évaluation indépendantes le MADD ne donne pas de meilleurs résultats que le MAID pour prédire les accroissements individuels. Cela veut dire que les paramètres liés aux indices de compétition estimés sur le jeu de données de calibration ne sont pas transposables au jeu de données d'évaluation. La variabilité des accroissements serait mieux décrite par le MADD, mais le coût du calibrage de tels modèles est énorme pour représenter toute la gamme d'environnements locaux des arbres.

Les enseignements sur la dynamique du mélange

Mise en évidence d'une compensation entre essences

L'étude rétrospective de la croissance du chêne et du pin en mélange réalisée avec le MAID, a permis de mettre en évidence un phénomène de compensation de croissance entre les deux essences, lorsque l'une d'elles est affectée par un problème phytosanitaire. Ceci est illustré par l'attaque du Lophyre (*Diprion pini*) sur pin en 1981 : jusqu'en 1981, la croissance des deux essences est assez bien synchronisée, tandis qu'après

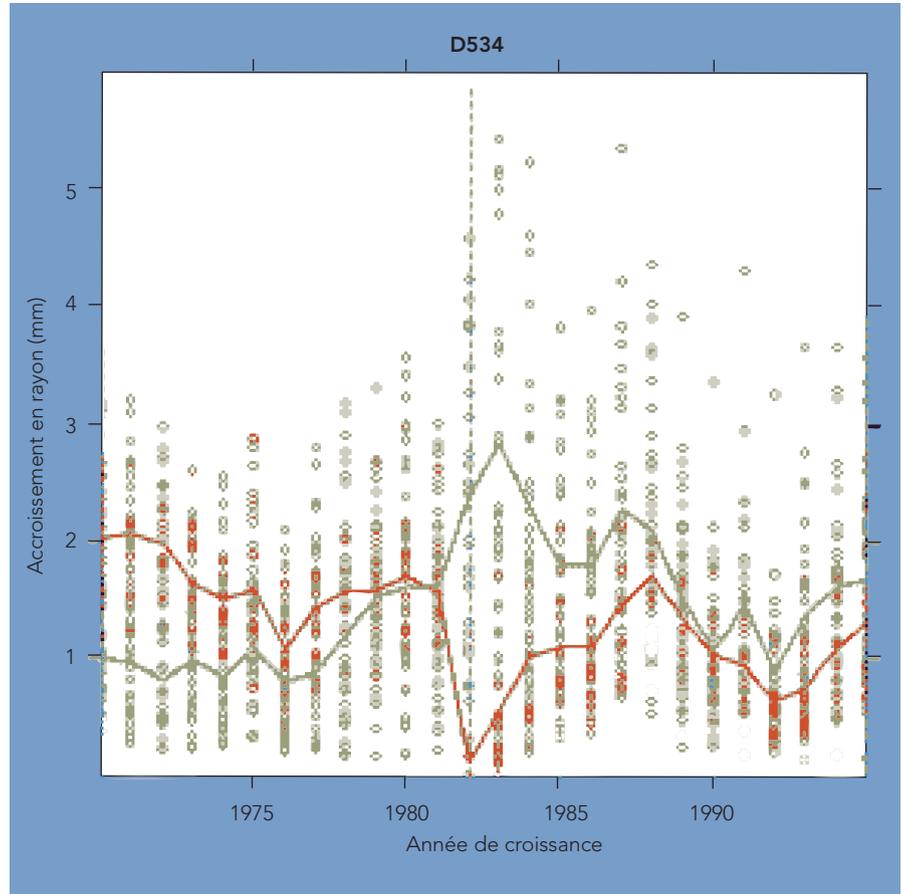


Fig. 2 : accroissement en rayon pour chaque arbre et pour chaque année dans le plateau D534 ; les lignes brisées représentent les courbes moyennes pour chaque espèce, la ligne verticale en pointillés représente l'année 1982, chêne en vert, pin en rouge

cette année, le pin subit une forte crise de croissance au profit du chêne (figure 2). Quelques années après le système revient à l'équilibre et les courbes sont à nouveau mieux synchronisées. Pendant la crise, la croissance des pins est fortement diminuée, celle des chênes nettement stimulée.

Les arguments climatiques pouvant être écartés, cette séquence traduit l'effet positif sur le chêne de la baisse de compétitivité du pin, pendant la gradation de l'insecte. Cela implique que les ressources du milieu restent bien utilisées, avec prise de relais par l'espèce non sensible pendant environ 5 ans. Sur le plan écologique et sylvicole, le phénomène observé illustre le bénéfice qu'on

peut retirer d'un mélange, dans cette situation (tamponner les effets des perturbations).

Ce phénomène de prise de relais par l'espèce non sensible, lors de dégâts d'origine biotique, n'est pas un cas isolé. Il a notamment été mis en évidence lors d'épisodes de pullulations de la tordeuse des bourgeons de l'épinette dans les forêts mélangées résineux-feuillus du Québec (Saucier, 1997).

Influence du taux de mélange sur la productivité

L'approche MADD permet de creuser un peu la question du gain obtenu par les mélanges du fait d'une compétition intraspécifique plus forte que la compétition interspécifique. À partir du modèle MADD

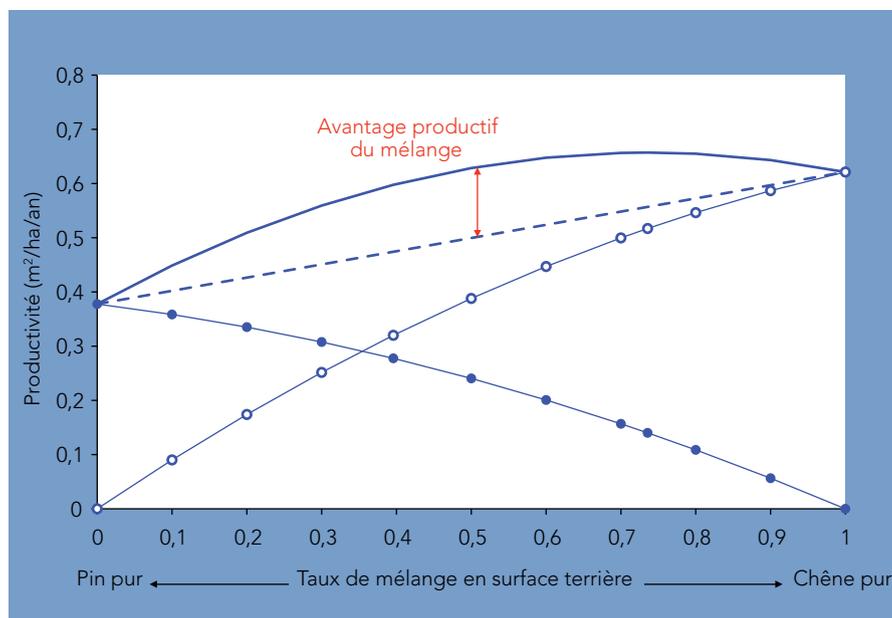


Fig. 3 : étude de la productivité en surface terrière (exemple du plateau D563 sur la période 2000-2005) du peuplement chêne-pin en fonction du taux de mélange, à l'aide du modèle peuplement obtenu par agrégation du MADD

La proportion du chêne augmente de gauche (0 %) à droite (100 %), ainsi que la productivité correspondante (courbe à points creux), et inversement pour le pin (courbe à points pleins). La droite représente ce que serait la productivité pour une même composition (x % chêne et y % pin), mais séparée en peuplements purs juxtaposés occupant respectivement x et y % de la surface ; on peut aussi désigner cette situation comme un mélange neutre (les espèces coexistent sans s'influencer).

agrégé au niveau peuplement, Thomas Pérot a calculé la façon dont la productivité totale répond au taux de mélange.

Quel que soit le plateau considéré, il constate que la productivité du peuplement passe par un optimum, dont le niveau est supérieur à la productivité de chacune des espèces constituantes en peuplement pur (figure 3). Théoriquement, cela signifie que, **dans les contextes chêne-pin étudiés, le mélange a un effet bénéfique sur la productivité.** En l'état actuel des travaux, ce résultat bien mis en évidence doit être interprété de manière qualitative, et pas comme une prédiction quantitative.

Dans la bibliographie, les situations où un mélange permet de surpasser la meilleure des espèces sont assez rares ; elles correspondent en général à des couples

d'espèces très complémentaires dans leur usage du milieu (soit en explorant des niches différentes, soit en présentant des phénologies décalées au cours de la saison). Quand les espèces sont plus fortement redondantes, il est possible d'observer le résultat contraire : la compétition est exacerbée par le mélange et la productivité du mélange peut être inférieure à celle d'un mélange neutre.

Conclusions

Finalement Thomas Pérot a construit plusieurs types de modèles, il en a ensuite agrégé certains pour obtenir des modèles peuplements. Ces outils ne sont pas actuellement directement opérationnels pour faire des simulations de croissance de mélanges chêne-pin autres que ceux observés dans la thèse, faute de lien entre les pa-

ramètres des modèles et des variables indépendantes (âge ou stade de développement, station...). D'autre part, on peut constater que les modèles testés (MAID ou MADD) sont assez performants pour expliquer la croissance du chêne mais ils le sont moins pour expliquer la croissance du pin. D'autres pistes devront être recherchées pour modéliser la croissance du pin sylvestre en mélange. Cependant ces modèles sont des outils très prometteurs. Ils permettent déjà de quantifier les relations chênes-pins : le MAID permet d'étudier de façon rétrospective la croissance du chêne et du pin en mélange, tandis que le MADD permet d'étudier la compétition entre espèces et par agrégation au niveau peuplement, la productivité en fonction du taux de mélange.

Christine MICHENEAU
Christine DELEUZE-BREZINS
Jean-François DHOTE
Myriam LEGAY
 ONF – Département Recherche

Bibliographie

PEROT T., 2009. Quel est le niveau de détail pertinent pour modéliser la croissance d'une forêt mélangée ? Comparaison d'une famille de modèles et application aux peuplements mélangés chêne sessile – pin sylvestre. Thèse de Doctorat Sciences agronomiques et forestières, Cemagref - AgroParistech. 232 p. < en ligne : <http://pastel.paristech.org/5459/01/ManuscritTheseTPerotVF.pdf> >

SAUCIER J.-P., 1997. Modélisation de l'accroissement radial des quatre principales essences des peuplements mélangés de bouleau jaune et résineux soumis à des perturbations naturelles (Québec). Thèse de Doctorat ENGREF, Nancy, 201 p.

Évolution de l'exploitation forestière et actions de l'ONF

Le 11 septembre 2009, les associations des amis des forêts tenaient à Compiègne un séminaire sur le thème de la mécanisation en forêt ; l'ONF y était invité à présenter ses actions en matière d'exploitation forestière. Didier Pischedda développe ici cet exposé, à l'intention des forestiers : il retrace l'évolution des activités liées à la mobilisation du bois, rappelle les « défis » du Grenelle de l'environnement, et montre comment l'ONF agit, avec l'ensemble du secteur, pour y faire face.

La récolte du bois est le moteur de toute la filière de transformation de bois ronds vers des produits utilisables pour un grand nombre de secteurs : le bâtiment, la menuiserie, l'ameublement, le papier et le carton, l'emballage, l'énergie, la chimie verte, la vinification... Ainsi pour la France, c'est près de 500 000 personnes qui travaillent dans la filière forêt-bois-papier, soit plus que dans la filière automobile pourtant bien représentée dans notre pays.

Une des particularités des activités liées à la mobilisation du bois est de s'exercer en milieu naturel forestier, dont les rythmes sont complètement différents de ceux des activités humaines. La forêt est gérée selon des principes sylvicoles adaptés aux longs termes ; la récolte de la production forestière est quant à elle liée aux rythmes et contraintes économiques des entreprises utilisatrices, elles-mêmes tributaires de la demande des consommateurs finaux, c'est-à-dire nous tous. Ainsi la récolte du bois se trouve à l'interface entre la gestion à long terme des forêts et la demande variable en produits bois suivant les évolutions des marchés et du jeu de l'offre et de la demande.

Une autre caractéristique est le cadre ouvert de ces activités de récolte, avec des contraintes particulières liées

non seulement au respect de la biodiversité mais aussi aux fonctions de protection ou d'accueil du public. De la même manière, l'accessibilité de la coupe ou plus simplement les arrêts liés aux intempéries donnent à ce lieu de travail une singularité pleine de complexité par rapport à d'autres secteurs d'activité.

Cet article vise ainsi à présenter :

- le contexte et les évolutions des activités liées à la récolte de bois ;
- les actions engagées par l'ONF pour s'adapter à ces évolutions ;
- et les perspectives que nous présentons, notamment en terme de technologies.

Les activités d'exploitation : contexte, évolutions

Sur les treize millions de m³ vendus par l'ONF en 2008, 64 % l'ont été sur pied et 36 % bord de route (bois façonnés). Autrement dit, les acteurs de la gestion forestière ne sont traditionnellement pas dans notre pays ceux de la récolte même si cette situation est en train de changer (cf. Contrat État-ONF).

À l'échelle de la parcelle ou du chantier, le choix du système d'exploitation¹ résulte d'abord d'une réflexion d'ordre économique qui prend en compte les produits à récolter, l'orga-

nisation et la logistique à mettre en place ainsi que l'état des marchés du bois (figure 1). Mais le système d'exploitation est aussi en étroite interaction avec le milieu forestier, ce qui implique de définir des règles de « bonnes pratiques » et de faire en sorte qu'elles soient respectées. Or les systèmes d'exploitation ont connu ces dernières années des évolutions sans précédent, ouvrant pour l'ONF un « chantier » considérable : diagnostic des nouveaux impacts, définition des bonnes pratiques, actualisation du cadre contractuel...

Du point de vue économique, la mobilisation du bois représente aujourd'hui environ 50 % du chiffre d'affaire de l'industrie de première transformation (scierie). L'efficacité économique de ce poste influence donc fortement la compétitivité des produits bois sur un marché fortement mondialisé. De même, quand le bois est vendu façonné, le coût de mobilisation pour l'ONF varie de 15 à 40 €/m³ soit une proportion de 1 à 3 suivant les régions, le degré de mécanisation et les difficultés de mobilisation, avec une moyenne de 22 €/m³, soit 25 à 60 % du prix de vente moyen suivant les produits. Par ailleurs les entreprises de première transformation, fragilisées par l'évolution des marchés, ont plus que jamais besoin de sécuriser leurs approvisionnements

¹ Un système d'exploitation forestière est l'ensemble des processus de la récolte de bois (méthode, équipement, organisation) depuis l'abattage des arbres sur pied jusqu'au dépôt bord de route ou à la livraison usine.

Evolution bûcheronnage/abattage

Bûcheronnage manuel

- 1955 : 400 – 500 m³/homme/an
- 1975 : 800 m³/homme/an
- 1985 : 1 200 m³/homme/an
- 2000 : 2 500 à 3 000 m³/homme/an



De la tronçonneuse à 2 hommes (1925)
à un modèle d'aujourd'hui

Bûcheronnage mécanisé

- 1980 : Début des machines de bûcheronnage françaises et scandinaves
- 1990 : Ordinateur de bord contrôlant les découpes
- 1995 : Dispositifs anti-pollution (début des huiles biodégradables)
- 2000 : Informatique pour la maintenance et systèmes de communication embarqués (GPS, GSM...)



D. Pischredda, ONF

Machine de bûcheronnage

Evolution du débardage

- 1900 : Chariots à roues de bois cerclées de fer, trinqueballes tirés par des chevaux ou des bœufs
- 1920 : Quelques rares tracteurs agricoles
- 1950 : Utilisation de matériels militaires (GMC...)
- 1955 : Tracteurs de débusquage 4x4 à châssis rigide (Latil, Agrip)
- 1960 : Débusqueurs à châssis articulé équipés de treuils
- 1970 : Porteurs à châssis articulé équipés de grues
- 1998 : Débusqueurs à châssis articulé équipés de pince ou à de grues
- 2008 : Porteur à 10 roues



D. Pischredda, ONF

Débusqueur à câble



John Deere

Porteur

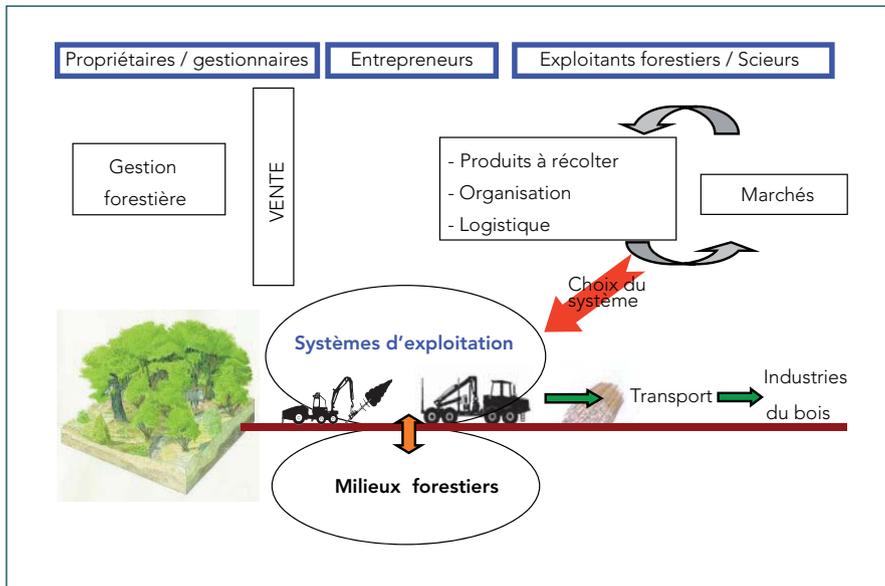


Fig. 1 : le choix du système d'exploitation est la résultante d'une réflexion sur les marchés, les produits à mobiliser et l'organisation à mettre en place

pour pouvoir faire les investissements nécessaires. D'où un autre « front » pour l'ONF, largement tributaire de la santé de ce secteur : s'organiser en amont pour contribuer à la régularité des approvisionnements (prévisions de récolte, suivi des flux, contrats d'approvisionnement...).

Évolutions des techniques de mobilisation du bois

Depuis l'apparition au milieu du siècle dernier des premières tronçonneuses, manipulées par deux hommes, la productivité du **bûcheronnage manuel** a été multipliée par 5 à 6, avec de grosses améliorations des conditions de travail et d'ergonomie. Le **bûcheronnage mécanisé** n'a quant à lui qu'une trentaine d'années à peine, mais de très grosses évolutions ont déjà été constatées. Initialement prévues pour la récolte des petits bois, les machines de bûcheronnage (ou abatteuses) ont beaucoup évolué pour abattre aujourd'hui des arbres jusqu'à 70 cm de diamètre et sont donc devenues incontournables, du moins pour la récolte des résineux. La productivité actuelle est en moyenne de 17 000 m³/machine/an avec des variations de 15 000 à 40 000 m³ suivant le type de coupe

et d'essence. Le prix d'achat d'une machine de bûcheronnage est toutefois de 250 000 à 400 000 euros.

Avant la seconde guerre mondiale, le **débardage** se faisait majoritairement par traction animale, avec quelques rares tracteurs agricoles. Le développement de la mécanisation dans ce domaine est donc récent. Après l'emploi de matériels militaires en forêt, les tracteurs 4x4 à châssis rigide font leur apparition (Latil, Agrip) puis rapidement, pour s'adapter aux conditions de travail, viennent les tracteurs à châssis articulé équipés de treuils, toujours en usage aujourd'hui. Par ailleurs, le succès de la méthode des bois courts ou en billons amène le développement d'engins spécialisés, des porteurs équipés d'une grue. Ces dernières années, des engins combinant plusieurs de ces fonctions ont vu le jour avec entre autres des tracteurs à pince puis à grue améliorant l'ergonomie du poste de travail. La productivité du débardage est aujourd'hui de 10 000 à 35 000 m³/an suivant le type de coupe. Le prix d'achat d'un tracteur débusqueur, appelé aussi skidder, est de 190 000 à 260 000 euros. Celui d'un débardeur ou porteur est plutôt de 200 000 à 280 000 euros.

Mais s'ils sont de plus en plus performants, les engins sont aussi souvent de plus en plus lourds, et peuvent occasionner des dégâts au sol voire aux arbres restants. Fatalité ? Non. Les constructeurs adaptent leurs gammes, comme en témoigne le cas des porteurs : d'abord 4x4, ils ont évolué vers des 6x6 puis aujourd'hui des 8x8 améliorant la portance et diminuant donc les impacts au sol. La dernière innovation date de 2008 avec un porteur 10x10 développé en Finlande en coopération entre un constructeur et un établissement de gestion forestière ; l'objectif était de pouvoir améliorer la récolte de pins sylvestre sur les sols tourbeux du nord du pays où la période de gel a diminué sensiblement ces dernières années.

Les grandes tendances du secteur d'activité Exploitation

Malgré des efforts pour la réduction de la pénibilité du travail, la main-d'œuvre forestière s'est réduite considérablement ces trente dernières années (perte de la moitié des effectifs depuis les années 70) alors que la récolte en France s'est stabilisée depuis le milieu des années 1980, sauf pour les années suivant les tempêtes de 1999 (figure 2).

Le taux de mécanisation a progressé depuis le début des années 90 mais c'est surtout depuis les tempêtes de 1999 où un cap a été franchi pour mobiliser au plus vite les millions de m³ renversés (figure 3). Pour les résineux il est de 50 %, ce qui montre bien que la mécanisation fait aujourd'hui partie du quotidien. Par contre, il n'est pour les feuillus que de 4 % vu les difficultés inhérentes à ce groupe d'essences (branchaison, cépées, flexuosité). Cependant il tend à progresser, notamment pour les éclaircies de chêne et de hêtre ainsi que les coupes de châtaignier, mais de façon très différenciée suivant les régions. Les raisons essentielles de ce développement sont liées à la rentabilité dans un contexte d'aug-

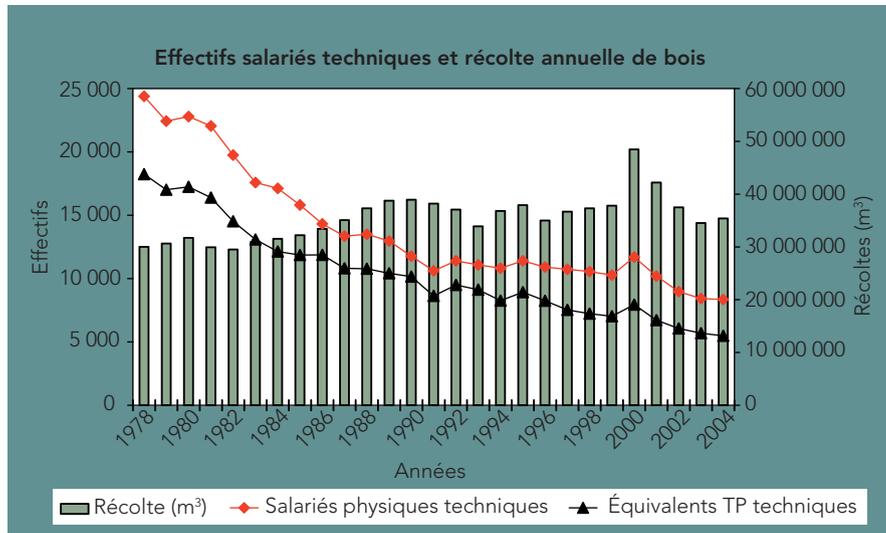


Fig. 2 : évolution comparée des effectifs et de la récolte annuelle (Source FCBA)

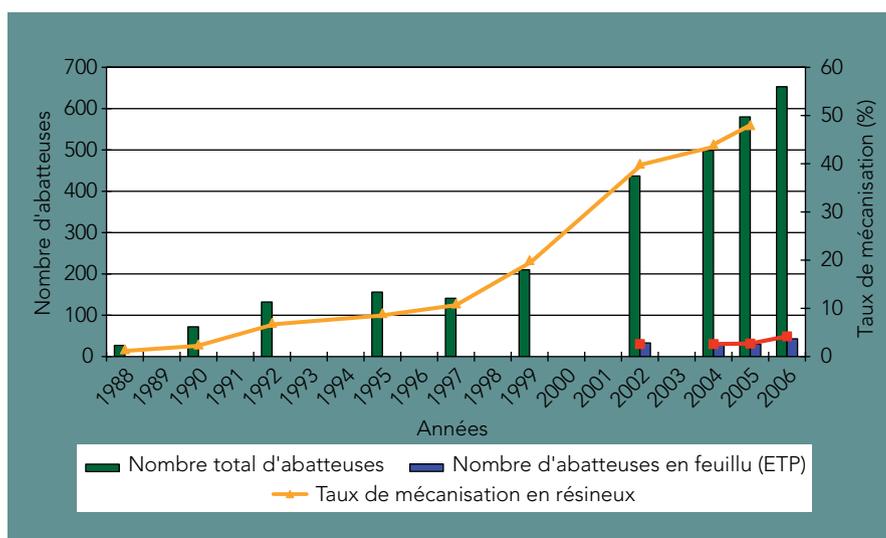


Fig. 3 : évolution en France du parc d'abatteuses et du taux de mécanisation en résineux et en feuillus (Source FCBA)

mentation régulière du coût du travail alors que la valeur de la matière première stagne, voire recule. Pour autant il ne faut pas négliger les améliorations de confort et d'ergonomie des postes de travail correspondants par rapport aux méthodes manuelles.

Mais il faut souligner une fragilité : elle vient de ce que les métiers de la mobilisation sont dévalorisés dans notre société. Cela se sent particulièrement dans les centres de formation forestière où le recrutement est de plus en plus difficile. Or la main-d'œuvre nécessaire au pilotage, à la maintenance et à l'en-

tretien des engins d'exploitation doit être de plus en plus qualifiée. Un chauffeur d'abatteuse n'est pas seulement un conducteur de machine : il lui faut aussi des compétences parfois très pointues en hydraulique, en électricité, en informatique, en mécanique mais aussi en sylviculture et en connaissance du milieu naturel.

Les défis du Grenelle de l'environnement

Le Grenelle de l'environnement (2007) puis des Assises de la forêt ont abouti à un accord, conclu entre France Forêts et France Nature Environnement, sur la nécessité pour

la forêt française de « produire [donc récolter] plus de bois tout en préservant mieux la biodiversité ». S'y ajoutent des objectifs qui prévoient une augmentation de la récolte en France de + 12 millions de m³ d'ici 2012 et + 20 millions de m³ d'ici 2020.

Au-delà du débat de statisticiens sur le détail et la validité des chiffres de cette mobilisation supplémentaire, le plus important sera, vu la désaffection actuelle de la main-d'œuvre, de faire en sorte que les ressources humaines soient bien au rendez-vous pour permettre une augmentation effective de la récolte. Le FCBA a estimé (tableau 1) que pour mobiliser 12 millions de m³ supplémentaires, il fallait 5 000 personnes de plus que les 15 000 actuelles (soit + 35 %), non compris les techniciens forestiers, animateurs sylvicoles, cadres forestiers qui devront permettre la mise en marché de ces volumes par les propriétaires et mettre en place la logistique nécessaire.

En ce qui concerne la ressource en forêt publique, les volumes supplémentaires sont situés en grande partie dans les forêts en pente et de montagne qui tendent à la surcapitalisation en raison de problèmes d'accessibilité donc de coût de mobilisation. Il y a là un défi à relever.

Enfin, l'augmentation de la mobilisation s'inscrit dans les engagements nationaux au titre du Protocole de Kyoto (et dans les projets de l'après Kyoto) : elle contribue à régénérer la forêt et par ce fait à augmenter sa capacité à stocker du carbone ; via le secteur aval, elle prolonge le stockage (dans des produits de longue durée) et participe à l'amélioration du bilan carbone (bois énergie, bois matériau de substitution). En revanche, il faut veiller à ce que la fertilité des sols ne pâtisse pas des « exportations » correspondantes, en particulier de celle des menus bois (laquelle pose aussi de nouvelles questions en matière de système d'exploitation).

Types d'opérateurs	Production de 37,5 Mm ³	Production supplémentaire de 12 Mm ³	Production totale 2012 47,5 Mm ³
Bûcherons	8 200	2 012	10 212
Débardeurs skidder	1 150	495	1 645
Débardeurs porteur	1 350	455	1 805
Conducteurs machine de bûcheronnage + abatteuse	1 100	105	1 205
Conducteurs déchiqueteuse	Env 50	265	315
Câblistes (conducteur + accrocheur)	Env 20	540	560
Autres conducteurs d'engins forestiers	100	47	147
Autres conducteurs d'engins de manutention	/	116	116
Total bûcherons	8 200	2 012	10 212
Total conducteurs	3 770	1 953	5 723
Total	11 970	3 965	15 935
Camionneurs	3 200	1 395	4 595
TOTAL GENERAL	15 170	5 360	20 530

Tab. 1 : effectifs actuels (2007) de salariés et effectifs supplémentaires nécessaires d'ici 2012 pour répondre aux objectifs du Grenelle (Source FCBA)

Les actions de l'ONF

Après la période difficile de l'après tempête de 1999, avec les conséquences tant sur la filière bois que sur l'établissement, l'ONF s'est mis en devoir de répondre aux évolutions du contexte de l'exploitation forestière. Cette tempête a été un élément déterminant au sens où elle a provoqué une accélération de la mécanisation en même temps qu'une prise de conscience des problèmes associés (problèmes de main-d'œuvre, dégâts environnementaux), et de la nécessité impérieuse de revoir un cadre technico-juridique devenu obsolète.

Que ce soit pour le cadre contractuel, les « bonnes pratiques » d'exploitation, les implications aval sur la filière, toutes les actions entreprises sont conduites en étroite concertation ou partenariat avec l'ensemble des acteurs concernés, avec une forte volonté d'amélioration continue. Conformément aux principes de la gestion durable, elles s'inscrivent en outre dans la

politique environnementale de l'ONF, liée à la certification ISO14001 et PEFC. Cette politique est définie en 5 grands axes (biodiversité, eau, sol, paysage, éco-responsabilité) assortis d'objectifs que le plan d'action environnemental traduit en opérations concrètes ; le travail entrepris en matière d'exploitation y figure parmi les actions de tel ou tel axe (sol, eau...) ou comme contribution à des actions transversales.

Cadre contractuel : le règlement national d'exploitation forestière

Un travail d'harmonisation complète et d'actualisation du cahier des charges « qualitatif » de l'ONF a été réalisé suite à une large concertation interne et externe avec nos partenaires institutionnels et professionnels (ministères de tutelles, FNCO-FOR, FNE, FNB, Fédération des Pâtes, Entrepreneurs des Territoires, syndicats ONF). Il a abouti au règlement national d'exploitation forestière (RNEF), en vigueur depuis 2008 et téléchargeable sur le site : <http://www.onf.fr> (filiale bois).

Ce règlement (qui se substitue aux prescriptions des anciennes clauses communes générales et territoriales de vente) est une étape importante du plan d'action environnemental : il intègre toutes les nouvelles réglementations (sur l'eau, le sol... et aussi sur le travail en forêt) et transpose concrètement les engagements de l'ONF dans le cadre contractuel qui lie l'Établissement aux intervenants de l'exploitation forestière. Il s'applique à tous les intervenants en forêts publiques, quel que soit leur statut, ce qui est une avancée notable : ses exigences doivent être respectées à la fois par les professionnels (ETF ou exploitants forestiers) intervenant dans le cadre d'un contrat d'achat (bois vendu sur pied) ou de prestation de service (bois vendu façonné) mais aussi par les personnels de l'ONF. C'est ainsi un outil adapté pour le pilotage de « la qualité de l'exploitation forestière ».

Il est construit autour de trois chapitres, selon une approche thématique pour les deux premiers et une approche métier pour le troisième. Certains sujets relèvent des deux approches. Le chapitre 1 traite du respect du milieu naturel forestier avec notamment :

- des prescriptions générales sur la protection de la biodiversité, des sols, et de l'eau ;
- une « clause R » (respect de la régénération) harmonisée pour l'ensemble du territoire métropolitain sur la base de 4 modalités type ;
- l'obligation d'utiliser les biolubrifiants dans les zones naturelles sensibles et son extension à l'ensemble des forêts publiques d'ici fin 2011.

Le chapitre 2 traite du respect des biens et des personnes ; il rappelle notamment les exigences pour la sécurité des personnes (utilisation des Équipements Individuels de Protection par exemple), ainsi que les obligations liées à la présence des autres usagers (un chantier forestier étant un chantier ouvert

contrairement au BTP - signalisation et signalement). Quant au chapitre 3, il détaille les conditions générales d'exploitation, en ce qui concerne les modalités d'organisation du chantier et les bonnes pratiques professionnelles.

Par ailleurs, des concertations se poursuivent pour améliorer les modes de contractualisation avec les entreprises de travaux forestiers et faciliter le respect des dispositions du RNEF. Il peut s'agir de valider certains points concernant la zone géographique sur laquelle peut être pratiquée la prestation, la volumétrie minimale de la prestation à réaliser, la méthodologie de description des caractéristiques de chantier...

Bonnes pratiques : le guide « PROSOL » et des notes de cadrage technique (2009)

À l'issue d'un programme de démonstration de 4 ans, l'ONF et le FCBA ont publié en 2009 le guide « PROSOL - Pour une exploitation forestière respectueuse des sols et de la forêt ». Ce guide a été réalisé avec l'ensemble des partenaires forestiers publics et privés, les organismes de recherches sur les sciences du sol ainsi que les entrepreneurs des travaux forestiers ; il a été diffusé à l'ensemble des représentants des professionnels ainsi qu'aux organismes de formation². C'est le premier pas d'une culture partagée, base de progrès technique pour consolider la gestion durable et satisfaire aux objectifs du Grenelle de l'environnement.

D'après l'état des connaissances sur les sols, l'interaction sol machine et les conséquences du tassement (chapitre 1), l'objectif principal est de donner des éléments concrets aux gestionnaires pour diagnostiquer la sensibilité des sols forestiers (chapitre 2), installer des cloisonnements d'exploitation (chapitre 3) et choisir le système de récolte le plus adapté (chapitres 4 et 5).

La même année l'ONF a précisé par notes de service les cadrages nécessaires en forêt publique sur :

- la protection physique des sols et de leurs propriétés (sur les bases du Guide PROSOL) ;
- la valorisation de la biomasse et la récolte raisonnée des menus bois au regard de la fertilité.

Pour la protection physique des sols, il est indispensable de **généraliser l'installation des cloisonnements d'exploitation** partout où on utilise un système d'exploitation terrestre. Il s'agit de permettre la mécanisation des interventions, en limitant la surface circulée par les engins forestiers : sachant que 80 % du tassement se produit dès les 2-3 premiers passages, il n'est pas concevable de laisser circuler les machines sur l'ensemble de la surface des parcelles. Ceci étant, pour être vraiment efficaces les cloisonnements doivent rester praticables d'une coupe à l'autre, donc ne pas subir eux-mêmes de dégradation sévère : d'où l'utilité d'y déposer des rémanents pour les protéger, et l'importance de diagnostiquer les seuils de sensibilité pour déterminer les périodes d'exploitation (circulation) possibles ou non (voir la fiche technique, dans ce même numéro).

La mise en place des cloisonnements nécessite une démarche globale qui prend en compte les réseaux de desserte en place, la pente, le réseau hydrographique et le paysage. Leur largeur est de 4 m leur espacement est fonction de la situation des peuplements et du type d'intervention.

La récolte des menus bois a fait l'objet de préconisations permettant de valoriser la biomasse forestière tout en préservant la richesse et la fertilité des sols. À partir d'une étude de l'ADEME, trois niveaux de sensibilité vis-à-vis de l'exportation des branches et feuil-

lage sont identifiés en fonction de la texture et du type d'humus. Pour les sols très sensibles, l'exportation est exclue. Pour les autres, les possibilités sont strictement définies par type de peuplement, assorties de recommandations comme :

- récolter les menus bois de feuillus en hiver ;
- si l'exploitation se fait en feuille, laisser sécher sur la parcelle avant broyage en plaquettes ;
- ne pas abattre les feuillus en montée de sève si la récolte des menus bois est prévue ;
- dans tous les cas, consigner explicitement ces récoltes au sommier de la forêt pour en garder trace.

Ces premières dispositions n'abordent pas les moyens techniques à utiliser, mais le choix du système d'exploitation dépend aussi du fait qu'il faille ou non récolter les menus bois. La veille technique apportera des réponses en fonction des évolutions des matériels.

Progresser avec les secteurs de l'exploitation et de la première transformation

Les entrepreneurs de travaux forestiers travaillent depuis quelques années à mettre en place une qualification reconnue de leurs entreprises comme il en existe dans d'autres secteurs, le bâtiment par exemple. En tant que client, l'ONF y a participé depuis fin 2006. Le système de qualification, appelé QualiTerritoires, est désormais opérationnel et les premières entreprises ont été qualifiées courant 2009. L'attestation correspondante garantit que tout est en ordre au niveau juridique, social et fiscal ; c'est un atout important, pour accéder aux marchés des secteurs agricoles, forestiers ou ruraux, d'autant que cela répond à l'exigence des clients. D'autre part, les entreprises qui se lancent dans la démarche sont à la pointe des bonnes pratiques forestières.

² Le guide PROSOL est maintenant disponible à la librairie du FCBA (20 €)

En montagne, pour faire suite au Grenelle de l'environnement (produire plus tout en préservant mieux), l'ONF a défini une stratégie de mobilisation qui se décline dans les Alpes et les Pyrénées via :

- une démarche de soutien au milieu professionnel câbliste dans les Alpes avec un plan d'action d'augmentation de la mobilisation par câbles téléphériques ;
- le démarrage d'une équipe ONF de débardage par câble dans les Pyrénées en concertation étroite avec les instances régionales et professionnelles ;
- une action de coopération avec nos homologues autrichiens concernant leurs bonnes pratiques métier.

Concernant l'industrie du sciage, l'ONF a déployé une autre stratégie innovante avec le développement des contrats d'approvisionnement en bois des outils industriels français. Le contrat État-ONF 2007-2011 propose d'ailleurs une augmentation progressive de ces contrats, qui doivent atteindre 35 % des volumes vendus en forêt domaniale et 25 % en communale. Ces évolutions ont des effets positifs en retour car en développant le bois façonné l'ONF se met en mesure de mieux maîtriser le calendrier des exploitations par rapport aux sensibilités potentielles des parcelles en raisonnant sur un portefeuille plus grand et donc de mieux répondre à sa politique environnementale.

Rester vigilant

Ainsi, l'ensemble de ces actions permet de mieux cadrer voire même d'influencer le choix du système de mobilisation et d'améliorer la qualité de travail pour le respect du milieu naturel en particulier. Une boucle d'amélioration continue est mise en place soit par les retours d'expérience du terrain soit par de nouveaux résultats de la recherche (figure 4), ce qui entre tout à fait dans le cadre de notre démarche de certifications ISO 9001 ou 14001.

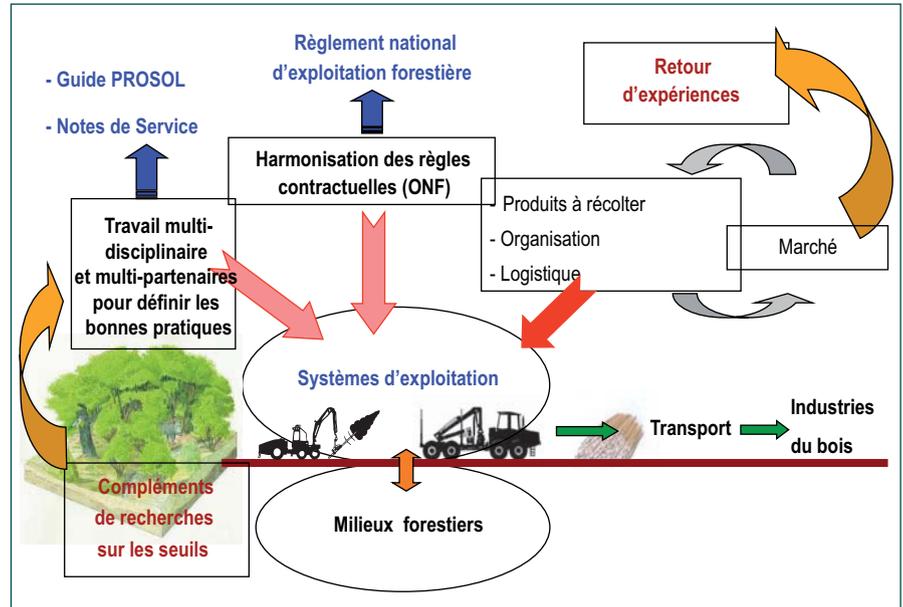


Fig. 4 : dispositif ONF d'amélioration de l'exploitation par des actions sur le cadre contractuel (via le RNEF) et qualitatif (via le guide PROSOL et les NdS de cadrage)

Perspectives

Concernant la protection des sols, des travaux de recherche se poursuivent pour permettre de préciser les seuils critiques de sensibilité potentielle des sols forestiers et pour créer une boucle d'amélioration continue en apportant des réponses pratiques aux questions en suspens comme par exemple : i) les périodes optimales de récolte en fonction des conditions du milieu et ii) les adaptations possibles pour les systèmes d'exploitation forestière à mettre en œuvre.

Concernant les aspects économiques et sociaux, des réflexions entre les partenaires économiques sont à l'étude en permanence pour mieux cadrer les coûts des interventions au travers de l'organisation du travail, l'enchaînement des processus, la rotation des tâches, l'autonomie des opérateurs etc. L'ONF en tant que gestionnaire des forêts publiques et intervenant est associé à ces réflexions. En interne, la Direction Technique et Commerciale Bois développe des outils de suivi des flux de bois dans la chaîne de production des bois façonnés depuis les

arbres sur pied jusqu'à leur livraison : le but est d'améliorer notre efficacité globale à la fois vis-à-vis de nos clients (respect des délais de livraison, du cahier des charges produits etc.) mais aussi pour diminuer les charges internes, tout en améliorant notre performance environnementale.

Par ailleurs, le développement de technologies telles que le SIG (système d'information géographique) ou des logiciels de simulation se poursuit pour répondre à de nombreux besoins de terrain. Toutes les opérations forestières y compris la récolte de bois ont une composante géographique. Une application SIG adaptée aux besoins de gestion courante (Canopée) a d'ores et déjà été déployée vers chaque agent patrimonial de l'ONF pour des utilisations à l'échelle de son triage (figure 5). Mais le SIG permet aussi de raisonner à une échelle beaucoup plus macroscopique, concernant entre autres la localisation de la ressource. Ainsi un projet nommé Cartuvi est en cours sur les zones de montagne pour lier la ressource, l'accessibilité et le système de mobilisation (figure 6).

Également pour la montagne, l'ONF travaille à un autre projet, en cours de développement, un outil de simulation (Simulcâble 3D) pour le positionnement des câbles de débardage ainsi que de la desserte (figure 7). Il s'agit ici d'optimiser les phases de montage de ces installations dont dépend une bonne partie du coût de revient. Suivant le profil du terrain, la position des pylônes terminaux et intermédiaires est déterminée de manière à engendrer le moins possible de forces et effets sur les éléments mécaniques du système de débardage et augmenter ainsi la sécurité des opérateurs. On peut alors chercher sur le terrain les arbres susceptibles d'être utilisés comme pylônes sur ces positions ou, à défaut, prévoir d'emmener des pylônes métalliques nécessaires ; l'organisation du chantier s'en trouve d'autant facilitée.

Enfin, l'établissement suit de près les nombreux projets en cours sur la traçabilité des produits de la filière forêt-bois, notamment à l'échelle européenne. En effet, grâce aux apports des nouvelles technologies de l'information (puces RFID biodégradables, encres à nanoparticules, échanges électroniques d'informations - EDI, etc.) il est concevable d'optimiser l'utilisation du bois sur toute la chaîne de transformation et donc d'être encore plus « durable ».

Ainsi, par l'ensemble de ces actions et de ces démarches, l'ONF développe les outils de cadrage du 21^e siècle pour permettre une gestion durable des forêts publiques qui concilie la biodiversité et la production du matériau renouvelable qu'est le bois.

Didier PISCHEDDA

ONF, expert national en exploitation forestière et logistique
didier.pischedda@onf.fr

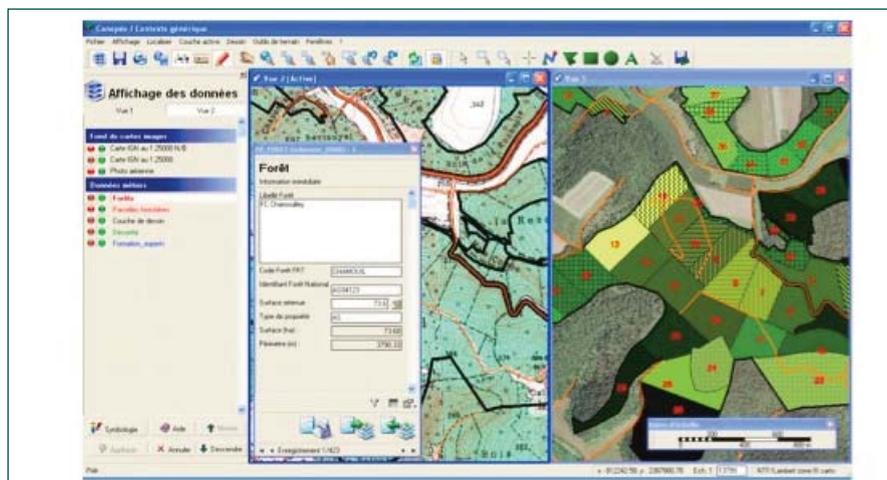


Fig. 5 : exemple de représentation des parcelles forestières dans l'outil Canopée

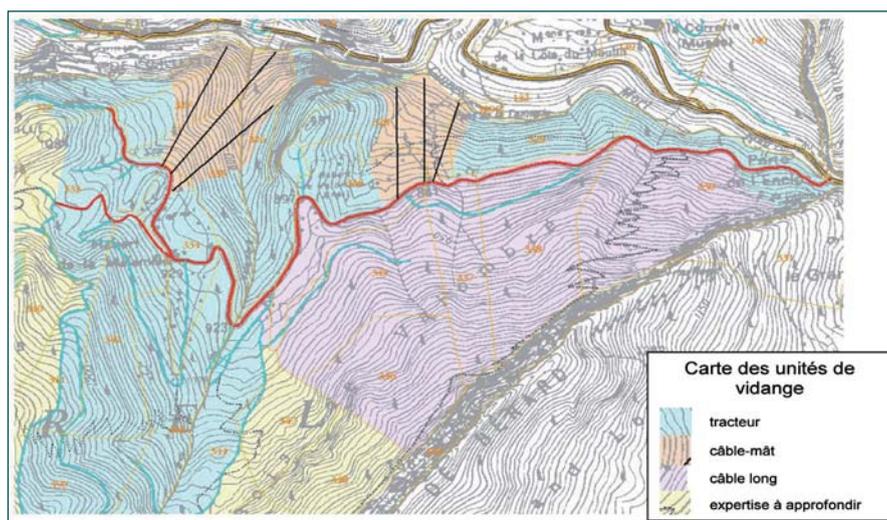


Fig. 6 : Exemple de visual de l'application Cartuvi qui permet de distinguer les zones de vidange par système d'exploitation

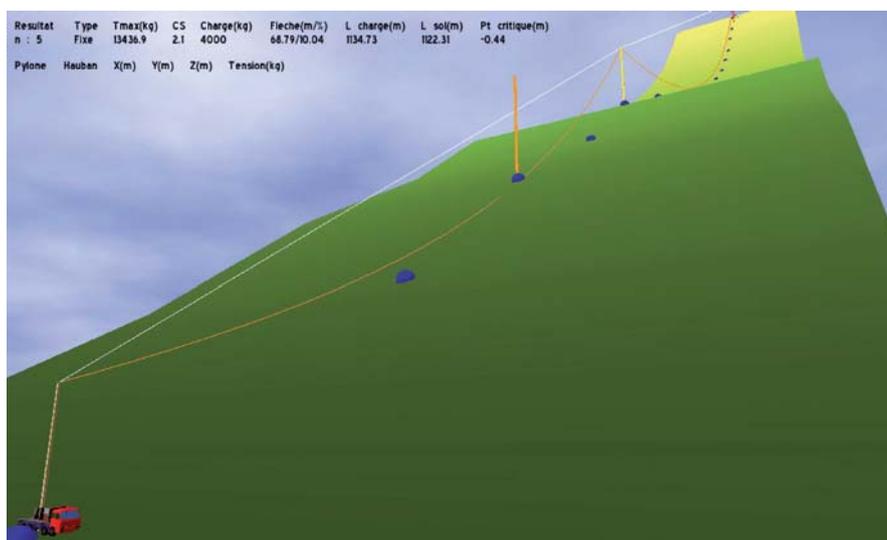


Fig. 7 : exemple de visual de l'application Simulcâble 3D



n°2 | Hiver 2009

Fiche technique - Sol

Diagnostiquer la sensibilité du sol au tassement



Travaux sylvicoles ou d'exploitation et protection des sols

La note de service 09-T-297 "Travaux sylvicoles ou d'exploitation et protection des sols" constitue une déclinaison opérationnelle de l'accord partenarial "Produire plus de bois tout en préservant mieux la biodiversité" conclu entre la Fédération France Nature Environnement, la FNCofo, les Forestiers Privés de France et l'Office national des forêts dans le cadre du Grenelle de l'environnement.

> Elle traduit les engagements pris en matière de politique environnementale dans le cadre de la certification ISO 14001 de l'ONF dont l'axe 3 concerne le sol. Son objectif prioritaire est de limiter le tassement des sols lors des activités réalisées par l'ONF ou ses prestataires.

> Elle précise les conditions d'organisation qui permettent la mécanisation des travaux sylvicoles et d'exploitation tout en limitant leur impact sur la structure des sols forestiers, en fonction de leur sensibilité physique au tassement.



Source : FCBA



Objectif prioritaire : limiter le tassement des sols

Sur sols sensibles, les phénomènes de tassement provoqués par des travaux mal conduits peuvent induire une déstructuration dommageable pour l'ensemble du milieu forestier (réduction de la capacité de drainage naturel, phénomènes d'engorgement, diminution de l'activité biologique et du développement racinaire...).

Le tassement correspond à une diminution du volume par suite d'efforts de compression verticaux, due à une réduction de la porosité avec expulsion de l'air, puis expulsion de l'eau si la pression se maintient. Ce tassement provoque une augmentation de la masse volumique.

Cette nouvelle fiche technique constitue un outil pédagogique et reprend, en les détaillant, les dispositions de la note de service 09-T-297 concernant le diagnostic de sensibilité des sols au tassement :

> elle explique comment réaliser ce diagnostic, en accomplissant trois actions :

- un diagnostic initial de la sensibilité potentielle à l'échelle de la forêt, à réaliser dans le cadre du suivi des aménagements ;

et lorsque le sol s'avère sensible au tassement :

- la réflexion préalable au choix du ou des systèmes potentiels d'intervention ;
- la conservation, sur les sols sensibles, de la praticabilité des cloisonnements, en évitant leur détérioration.

> elle fournit les méthodes pour répartir les sols en trois classes :

Sensibilité du sol au tassement	
Non sensible	
Sensible	
Très sensible	

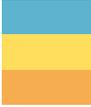
Eléments du diagnostic

Tout diagnostic de sensibilité d'un sol au tassement doit être réalisé en prenant en compte des facteurs :

- > **constants dans le temps** : pierrosité, texture et hydromorphie ;
- > **variables dans le temps** : engorgement et humidité.

1. Pierrosité

C'est la teneur en éléments grossiers (particules de diamètre > 2 mm, incluant cailloux, graviers et gravillons) ; cette teneur peut être déterminée selon deux méthodes :

Méthodes	Critères	Sensibilité au tassement
Tarière	<ul style="list-style-type: none"> Bloquée systématiquement malgré plusieurs essais Non bloquée systématiquement lors de plusieurs essais (peut être bloquée lors d'un essai par des cailloux, même en faible quantité) 	<p>Pierrosité forte (taux d'éléments grossiers $\geq 50\%$) ⇒ Sensibilité au tassement nulle ou faible mais, en période d'engorgement, les sols caillouteux alluviaux ou de fond de vallon peuvent perdre leur structure sous le passage d'engins</p> 
Examen d'un profil pédologique existant ou creusé à la pioche	<ul style="list-style-type: none"> Les éléments grossiers se touchent Les éléments grossiers ne se touchent pas 	<p>Pierrosité faible (taux d'éléments grossiers < 50%) ⇒ Sensibilité au tassement variable</p> 

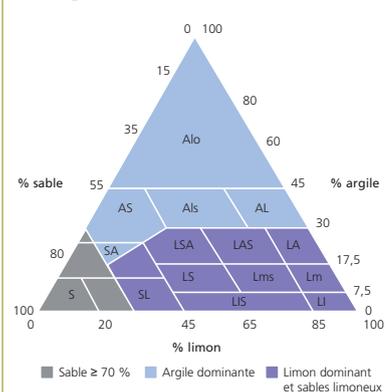
2. Texture

Les classes de textures peuvent être estimées au toucher sur le terrain, la texture d'un sol étant déterminée en utilisant l'outil "Triangle des textures".

- Les sables grossiers (> 0,2 mm) "grattent" les doigts et sont nettement sensibles au toucher.
- Les sables les plus fins (< 0,1 mm) sont peu sensibles au toucher mais crissent à l'oreille.

Classe de textures des sols	Propriétés	Sensibilité potentielle au tassement
Sables dominants	Peuvent constituer un squelette très portant en période humide, ne se tassent pas et ne fluent pas sous le poids des engins	nulle 
Argiles dominantes	Permettent une fissuration par alternances de gonflement/retrait, indispensables à la structuration du sol ; mais une couche de sol argileuse mal structurée ou déstructurée par le tassement devient très vite imperméable	faible risque de formation d'une nappe d'eau temporaire 
Limons dominants	Cumulent l'incapacité de gonflement/retrait des sables et l'imperméabilité des argiles en cas de mauvaise structuration ou de déstructuration	moyenne à forte 

Triangle des textures (Jamagne 1967, modifié)



- Alo Argile lourde
- AS Argile sableuse
- Als Argile limono-sableuse ou argile
- AL Argile limoneuse
- LA Limon argileux
- Lm Limon moyen
- LI Limon léger
- LmS Limon moyen sableux
- LIS Limon léger sableux
- LS Limon sableux
- SL Sable limoneux
- S Sable
- SA Sable argileux
- LSA Limon sablo-argileux
- LAS Limon argilo-sableux

Méthodes et savoir-faire

3. Hydromorphie

L'hydromorphie se repère par des traces de décoloration beige clair ou gris clair (perte de fer) et rouille (accumulation d'oxyde de fer), liées à la stagnation d'une nappe d'eau. La

profondeur d'apparition de traces d'hydromorphie témoigne du niveau qu'une nappe d'eau atteint périodiquement dans le sol.

Un sol est considéré **hydromorphe** si ces traces recouvrent plus de 10 %

de la surface du profil ou de la carotte de sol extraite à la tarière. Les nappes circulantes sont toutefois oxygénées et ne laissent donc pas de traces, même s'il y a engorgement (cas des sols alluviaux).

4. Engorgement

Un sol est **engorgé** si le trou creusé à la tarière le jour même de l'observation se remplit rapidement d'eau jusqu'à la profondeur d'apparition de la nappe.

Si la nappe d'eau est permanente et située à moins de 50 cm de la surface, le sol est toujours très sensible, quelle que soit sa texture.

5. Humidité

Hormis le cas des sols engorgés en permanence (ci-dessus), on peut établir un diagnostic de la sensibilité du sol en croisant sa texture et son état d'humidité.

On distingue au toucher l'état **sec, frais ou humide** de chaque horizon du sol. Les propriétés permanentes du sol et son humidité peuvent varier selon la profondeur du sol. Ainsi, sur un point

d'observation donné, si plusieurs horizons de sol de sensibilités différentes sont superposés, il convient de retenir la plus forte sensibilité observée sur les 50 premiers cm.

Texture dominante voir triangle des textures	Etat d'humidité du sol		
	Sol sec	Sol frais	Sol humide
Sable sable grossier à sable fin	Peu de différences selon l'état d'humidité de l'échantillon. Un échantillon sec ne tient pas dans la tarière, alors qu'un échantillon humide peut éventuellement se mouler (tel un château de sable)		
Sable limoneux et sable argileux	La présence de sable est dominante mais l'échantillon laisse une poudre sur les doigts (sable limoneux)	Il se tient un peu quand on essaie de le modeler Il s'effrite facilement (sable limoneux) ou colle légèrement (sable argileux)	Il se disperse très facilement comme le limon, mais "gratte" nettement. Une faible quantité d'argile rend l'échantillon collant à l'état humide mais il ne se tient pas
Limon sableux	L'échantillon a un comportement équivalent aux limons mais il "gratte" quelque peu	L'échantillon a un comportement équivalent aux limons mais il "gratte" quelque peu	L'échantillon a un comportement équivalent aux limons mais il "gratte" quelque peu
Limon limon léger, limon léger sableux, limon moyen sableux, limon moyen	Il est poussiéreux, pulvérulent, dessèche les doigts Les petites mottes soumises à la pression éclatent complètement (pulvérisation) L'échantillon ne se modèle pas	Il est doux au toucher et peu collant (aspect de talc) Il se modèle bien (boudin) mais s'effrite facilement à la pression entre le pouce et l'index et forme, au mieux, des écailles sur le pouce	Il a un aspect savonneux Il s'écrase totalement entre les doigts et se disperse intégralement dans l'eau (perte de consistance, aspect de boue)
Limon argileux limon argileux, limon argilo-sableux, limon sablo-argileux.	L'échantillon s'écrase facilement sa pulvérisation n'est pas totale (différence avec le limon)	Il est doux au toucher, s'écrase facilement (il ne reste qu'une fine lamelle écaillée entre le pouce et l'index), colle peu, se modèle très bien avec une très bonne tenue du boudin (consistance de pâte à modeler)	Sa tenue est très faible Il se disperse facilement dans l'eau (meilleure tenue pour l'argile limoneuse, proche des argiles)
Argile argile limoneuse, argile lourde, argile, argile sableuse	Elle forme des petits blocs très durs et fortement cohérents (ils peuvent parfois être confondus avec des sables grossiers) On peut briser ces blocs en morceaux plus petits mais non les réduire en poudre à la main	L'échantillon résiste à la pression et se modèle (consistance de pâte à modeler) : on peut en faire un boudin assez fin, collant fortement aux doigts. Par pression entre le pouce et l'index, on peut former une lamelle d'autant plus fine que l'échantillon est argileux	Il reste plastique, très collant et résiste toujours à la pression se déforme mais ne se délite pas (ne se fragmente pas, ne se désagrège pas)
		Attention toutefois aux échantillons très argileux, frais à humides, pour lesquels la confection d'une lamelle n'est pas toujours possible ; l'argile forme un "masque" lisse sur la peau (absence "d'écailles")	

Méthodes et savoir-faire

Sol : diagnostiquer la sensibilité du sol au tassement

Pour résumer, c'est l'état d'humidité du sol qui constitue le facteur déterminant de sa sensibilité au tassement,

traduite dans le schéma synthétique suivant :

Texture au sol	Etat d'humidité du sol			
	Sol sec sur 50 cm de profondeur	Sol frais	Sol humide	Nappe d'eau à moins de 50 cm de la surface
Sol très caillouteux (éléments grossiers \geq 50 %)	[bleu]			[orange]
Sol très sableux (sable \geq 70 %)	[bleu]		[jaune]	[orange]
Sol à argile dominante	[bleu]	[jaune]		[orange]
Sol à limon dominant et sol sablo-limoneux	[bleu]	[jaune]	[orange]	[orange]



Mise en œuvre du diagnostic

Action 1 : réaliser un diagnostic initial à l'échelle de la forêt

L'**objectif** est de doter progressivement les forêts à enjeu moyen ou fort de production, d'une **carte de sensibilité** potentielle des sols au tassement dans les zones où la pente est inférieure à 40 %, à l'occasion :

- > de l'élaboration d'un nouvel aménagement ;
- > d'un modificatif d'aménagement, suite à un bilan périodique.

Ce type de carte permet d'**optimiser l'organisation de l'exploitation** dans

l'espace et dans le temps, en réservant pour les périodes humides des parcelles peu sensibles par tout temps (sols très sableux ou très caillouteux non hydromorphes) et en focalisant l'effort d'exploitation sur les autres sols en période sèche.

Cette carte à vocation pratique doit être élaborée avant tout **à partir de l'expertise des personnels de terrain**, en s'appuyant si possible sur la carte des stations forestières.

Elle doit principalement faire apparaître :

- > les **sols engorgés en permanence** rendant impossible la mécanisation terrestre complète des travaux et des coupes ;
- > les **sols à forte sensibilité potentielle** où la mécanisation des travaux et des coupes est impossible à certaines périodes de l'année : les prescriptions particulières des ventes dans les unités de gestion concernées doivent alors mentionner cette restriction.

Action 2 : réfléchir au choix des systèmes potentiels d'intervention

Bien avant toute intervention, le gestionnaire forestier doit prévoir le système d'exploitation le mieux adapté à chaque contexte, lors de l'établissement du document d'aménagement ou de la programmation des interventions.

S'il est impossible d'estimer à l'avance l'état d'humidité d'un sol, la connaissance de ses propriétés intrinsèques (texture, pierrosité, hydromorphie) permet de définir *a priori* différentes options d'intervention :

- > quelle que soit sa texture ou sa charge en cailloux :
 - un **sol sec** (ou fortement gelé) **est toujours portant** : les engins peuvent alors y circuler sans précautions particulières ;

- un **sol engorgé** avec présence d'une nappe d'eau située à moins de 50 cm de la surface **est très sensible** au tassement : la **mécanisation terrestre** complète des travaux et des coupes doit être **proscrite**, sous peine de dommage irréversible.

- > à l'exception des sols très caillouteux, un **sol humide, voire même seulement frais, est toujours sensible**. Un tassement peut être causé en profondeur sans qu'aucune trace ne soit apparente en surface ; aussi le passage d'engins dans la parcelle doit être organisé et nécessite des précautions particulières. Les sols limoneux ou sablo-limoneux sont les plus sensibles.

> dans la grande majorité des cas et dès lors que la pente le permet (pente inférieure à 40 %), **les cloisonnements** sur lesquels doivent impérativement circuler tous les engins forestiers pour le bûcheronnage, le débardage (en application des articles 1.1.2 et 3.2.2 du RNEF) et la plupart des travaux sylvicoles, **sont la réponse adaptée à la mécanisation tout en assurant la préservation des sols forestiers**.

- > pour les parcelles sur sols à engorgement permanent ou à forte sensibilité rendant la mobilisation des bois difficile toute l'année, il est judicieux d'étudier la faisabilité de l'utilisation d'un **système de récolte alternatif, tel que le câble aérien**, ou dans d'autres cas la **petite mécanisation**.

Action 3 : sur les sols sensibles, conserver la praticabilité des cloisonnements en évitant leur détérioration

Sur sol sensible, il faut éviter qu'un scalpage des horizons superficiels, ou que des ornières trop importantes causées par des engins compromettent l'utilisation ultérieure des cloisonnements d'exploitation, ou nécessitent

une remise en état coûteuse. Conformément au tableau ci-dessous, il convient :

> de prévoir que l'utilisation des cloisonnements soit accompagnée de précautions supplémentaires à inscrire

dans les clauses particulières des coupes concernées, en particulier le dépôt des rémanents d'exploitation sur les cloisonnements ;

> d'interdire leur utilisation dans les cas extrêmes.

Texture	Etat d'humidité du sol		
	Sol sec sur 50 cm de profondeur	Sol frais	Sol humide
Sol très caillouteux (éléments grossiers \geq 50 %) > sols praticables par tous temps	pas de précaution particulière		
Sol très sableux (sable \geq 70 %) > sols praticables toute l'année moyennant des précautions lorsque les sols sont humides (notamment en hiver)	pas de précaution particulière		> couche de rémanents de 30 cm d'épaisseur minimum ⁽¹⁾ > réduction de la charge des engins > incitation à l'utilisation de pneus larges, et tracks ⁽²⁾ à tuiles larges
Sol à argile dominante > sols praticables toute l'année moyennant des précautions lorsque les sols sont frais ou humides (notamment en hiver)	pas de précaution particulière	> couche de rémanents de 30 cm d'épaisseur minimum ⁽¹⁾ > réduction de la charge des engins > incitation à l'utilisation de pneus larges, et tracks ⁽²⁾ à tuiles larges	
Sol à limon dominant et sol sablo-limoneux avec présence d'hydromorphie temporaire > sols impraticables à certaines périodes de l'année et sous certaines conditions lorsqu'ils ne sont pas secs sur 50 cm	pas de précaution particulière	> couche de rémanents de 30 cm d'épaisseur minimum ⁽¹⁾ > réduction de la charge des engins > incitation à l'utilisation de pneus larges, et tracks ⁽²⁾ à tuiles larges	Pas d'utilisation possible des cloisonnements tant que le sol est dans cet état d'humidité : attendre que le sol soit ressuyé ou gelé pour entamer ou poursuivre l'abattage mécanisé et le débardage ⁽³⁾
Nappe permanente à moins de 50 cm de la surface avec texture quelconque	Pas de cloisonnements d'exploitation permettant la mécanisation complète des coupes Exceptionnellement , on peut envisager d'utiliser des cloisonnements d'exploitation avec un entraxe de 36 à 40 m à condition : > d'imposer le débusquage par câble des produits éloignés ainsi qu'un abattage traditionnel sur les zones inaccessibles à la machine > d'exploiter lors des conditions climatiques les plus favorables > de disposer une couche de rémanents de 30 cm d'épaisseur minimum ⁽¹⁾ > de réduire la charge des engins > d'inciter à l'utilisation de pneus larges, et tracks ⁽²⁾ à tuiles larges		

(1) Si la récolte des menus bois est prévue, elle doit donc impérativement se faire lorsque le sol est sec ou gelé. Cette contrainte, qui se substitue alors à la disposition d'une couche de rémanents sur les cloisonnements, doit explicitement figurer dans les clauses particulières.

(2) Track : semi-chenille métallique se montant sur les deux roues d'un boggye, afin d'augmenter la surface de contact au sol et donc de réduire la pression qui s'y exerce.

(3) Pour les ventes de bois sur ce type de sols, cette possibilité d'arrêt de l'exploitation et du débardage lié à l'état du sol, en application de l'article 3.2.2 du RNEF, doit figurer dans les prescriptions particulières.

Plus d'informations

Sources externes

- > Guide pratique : Pour une exploitation forestière respectueuse des sols et de la forêt "PROSOL"
FCBA-ONF, 2009
- > Laissez une bonne impression !
Guide de gestion environnementale des chantiers forestiers (disponible sur les sites internet des partenaires).
AFOCEL, CTBA, ONF, *Entrepreneurs des Territoires*, FNCOFOR et FNB, 2003
- > PISCHEDDA D., BRÉTHES A., RANGER J., 2009. Enjeux et gestion du risque de tassement des sols en forêt. Colloque INRA : "Le tassement, un risque majeur pour les sols ?"
SIMA 2009

Sources internes

- > Règlement national d'exploitation forestière RNEF, 2008
disponible sur www.onf.fr
Accès professionnel/Filière bois
- > Note de service 09-T-297 : Travaux sylvicoles ou d'exploitation et protection des sols
- > Notes de service 06-G-1268 et 07-G-1409 : Politique environnementale de l'ONF et révision
- > LAMANDÉ M., RANGER J., LEFÈVRE Y., 2005. Effets de l'exploitation forestière sur la qualité des sols.
Les dossiers forestiers de l'ONF, n° 15, 131 p.
- > ONF, 2005. Dossier "Tassements du sol dus à l'exploitation forestière".
Rendez-vous techniques de l'ONF, n° 8, pp. 23-51
- > ONF, 2008. Dossier "Exploitation respectueuse des sols".
Rendez-vous techniques de l'ONF, n° 19, pp. 23-54
- > Intraforêt : n° 127d4 et ada0

Contact

Didier PISCHEDDA
didier.pischedda@onf.fr

Alain BRÉTHES
alain.brethes@onf.fr

Cette fiche est éditée grâce aux crédits du FEDD conformément au plan d'action de la politique environnementale (action H10).

Direction de la publication

ONF - DEDD/DTCB/DGCOM

Rédaction

Jean-Michel MOUREY
Didier PISCHEDDA
Laurence LEFEBVRE

Hiver 2009

à suivre

Prochain dossier L'ONF sur la côte méditerranéenne

Notre littoral méditerranéen est très contrasté : sur la côte sableuse du golfe du Lion, l'ONF n'a pas d'ancrage historique mais il est fort de l'expertise acquise sur l'Atlantique ; à l'est du Rhône, il dispose d'une forte assise territoriale dans des sites prestigieux de la côte rocheuse mais avec une tradition plutôt « continentale ». Ce dossier dessine une stratégie nouvelle, qui s'invente en avançant et fait émerger des solutions pour combiner loisirs (sans risques), biodiversité et contrôle des dynamiques littorales.

Retrouvez *RenDez-Vous techniques* en ligne

Sur intraforêt : pour les personnels ONF, tous les articles sont accessibles au format pdf dans le portail de la direction technique et commerciale bois (Recherche et développement / La documentation technique) ; pour un article particulier, utiliser le moteur de recherche de la base documentaire.

Sur internet : <http://www.onf.fr/>(rubrique Lire, voir, écouter / Publications ONF / Périodiques)

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

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

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

ONF - Département recherche
Christine Micheneau
Tél. : 01 60 74 92 25
Courriel : rdvt@onf.fr

