

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

n° 39-40 - hiver-printemps 2013



p. 7

Comprendre la demande industrielle en résineux

EMERGE dendrométrie

Dossier
p. 31



patrimoine

sylviculture

progrès

connaissances

économie

forêts et société

environnement

biodiversité

gestion durable

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

Directeur de la publication

Bernard Gamblin

Rédactrice en chef

Christine Micheneau

Comité éditorial

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

Maquette, impression et routage

Imprimerie ONF - Fontainebleau

Conception graphique

NAP (Nature Art Planète)

Crédit photographique

Page de couverture

En haut : D. Bier, ONF

En bas : Consortium EMERGE

Page d'ouverture du dossier

Consortium EMERGE

Périodicité

4 numéros ordinaires par an

(possibilité d'éditions resserrées en numéros doubles)

Accès en ligne

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

Disponibilité au numéro, abonnement

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

Fontainebleau

Contact : d tcb-documentation@onf.fr

ou par fax : 01 64 22 49 73

Dépôt légal : juillet 2013

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

sommaire

N°39-40 – hiver-printemps 2013

- 3 — **p**ratique
Implantation d'un projet de desserte forestière en forêt de montagne : les apports du LIDAR aérien
par Alain Munoz, Guy Viard-Cretat, Jacques Fay
- 7 — **z**oom
Comprendre l'évolution de la demande de bois résineux en France pour mieux l'intégrer dans la gestion forestière
- 7 — **I. De la ressource à la demande : un panorama de la filière résineuse française**
par Bruno Chopard, Christine Deleuze, Didier François, Robert Collet, Alexia Boudey, Tifenn Moureaux
- 13 — **II. Comprendre et objectiver les attentes des scieurs résineux industriels**
par Bruno Chopard, Christine Deleuze, Didier François, Robert Collet, Alexia Boudey, Tifenn Moureaux, Philippe Fenart, Jean-Denis Lanvin
- 21 — **III. Premiers enseignements pour le sylviculteur de résineux et perspectives pour la R&D**
par Didier François, Bruno Chopard, Christine Deleuze, Philippe Fenart, Jean-Denis Lanvin
- 31 — **dossier méthodes**
EMERGE – Élaboration de Modèles pour une Estimation Robuste et Générique du bois Énergie
- 79 — **f**iche technique
Fiche n° 9 – Intervenir en site classé ou inscrit du plan d'action environnemental

Éditorial

Déclinant le Grenelle de l'environnement, les Assises de la forêt et le discours d'Urmatt, le dispositif R&D de l'ONF résulte de consultations approfondies, d'une évaluation externe supervisée par son Comité Scientifique et confiée à une commission d'experts, puis d'une réorganisation intervenue en 2010 et complétée par l'intégration des pépinières d'Etat au 1er janvier 2013. Pour remplir ses objectifs, « conduire des projets au service des grands enjeux de la gestion durable des forêts publiques », la R&D de l'ONF combine des actions en propre et des partenariats avec les principaux acteurs de la recherche forestière, avec un objectif de synergies accrues (GIP ECOFOR, INRA, IRSTEA, FCBA, CIRAD, CNRS, Universités...).

Les axes prioritaires d'action retenus, qui bénéficient tant à la forêt domaniale qu'à la forêt des collectivités, sont les suivants :

- adapter la gestion forestière au changement climatique, en lien avec les orientations du programme national d'adaptation au changement climatique (PNACC) ;
- accroître la disponibilité et l'utilisation de la biomasse forestière pour les produits à base de bois et l'énergie ;
- élargir et conforter les bases de la gestion durable multifonctionnelle (dont biodiversité, équilibre forêt-gibier, restauration des terrains en montagne, risques naturels...);
- développer des produits et procédés innovants pour des marchés et demandes sociales en évolution.

Ce nouveau numéro de RenDez-Vous techniques fait pleinement écho à ces nouvelles orientations, et à la demande faite aux pôles R&D de mieux faire connaître leurs travaux et les résultats obtenus. En l'occurrence, c'est à propos d'un sujet central : les besoins en bois.

Le bois, matériau et énergie renouvelable, est de plus en plus demandé par la société. Estimer la ressource mobilisable au plus juste, dans tous ses aspects et à différentes échelles, pour ne pas risquer de « vendre la forêt plusieurs fois », est donc au coeur des préoccupations des forestiers. Et pour cela, il faut savoir mener :

- des approches aux échelles nationales et régionales pour éclairer les décisions politiques (IFN, projet EMERGE...),
- des approches opérationnelles pour la gestion des forêts au quotidien : mise en oeuvre des aménagements forestiers ou pour une gestion commerciale.

En même temps, il faut pouvoir répondre à ces attentes, en restant le plus économe possible sur les moyens à y consacrer.

C'est pourquoi l'ONF a lancé en 2008 le projet EMERGE (Elaboration de Modèles pour une estimation Robuste et Générique du bois Energie), soutenu par l'agence nationale de la recherche et qui a mobilisé pendant 4 ans les organismes forestiers techniques et de recherche. Ce projet ambitieux, qui a multiplié les angles d'étude, aboutit à des résultats solides, même s'ils ne sont pas immédiatement opérationnels.

Les articles du dossier EMERGE proposent des approches méthodologiques ou des pratiques innovantes. Il s'agit encore de travaux de recherche, et il reste beaucoup à faire pour aller au bout des recherches en cours et ensuite prévoir leur transfert dans des outils pleinement opérationnels au quotidien.

Le Directeur technique et commercial bois,
Bernard Gamblin

Implantation d'un projet de desserte forestière en forêt de montagne : les apports du Lidar aérien

En forêt de montagne, l'accès à la ressource forestière est rendu difficile par le relief accidenté et, dans certaines parties, cette difficulté est accentuée par un déficit en infrastructure routière. Il est alors nécessaire d'engager une réflexion globale sur la localisation de la ressource, son accessibilité et les projets d'infrastructures qu'il serait nécessaire de mettre en place pour (re)mobiliser des bois plus ou moins « abandonnés » du fait des évolutions techniques et socio-économiques des dernières décennies.

En août 2011, la forêt de la Combe d'Aillon, située dans le département de la Savoie, massif des Bauges, a fait l'objet d'une mission aérienne Lidar financée par le Conseil général de Savoie (CG73), propriétaire sur le site d'une forêt de 622 ha. Une surface d'environ 2500 ha a ainsi été « scannée » à l'aide d'un laser aérien (Lidar), couvrant aussi une part importante de forêts privées et communales. Dans le cadre d'un projet de recherche innovant, (convention avec le CG73 pour la réalisation d'une expérimentation Lidar visant à localiser la ressource forestière et proposer des solutions

d'optimisation de la chaîne logistique d'exploitation forestière), ces données d'une grande qualité ont été mises à la disposition de l'ONF.

Nous verrons dans cet article, à travers des exemples concrets, comment les données issues du Lidar ont pu apporter une aide tout au long des différentes étapes de cette réflexion sur l'accès à la ressource forestière et les modes de mobilisation.

Une représentation précise et fidèle du relief

Le Lidar (Light Detection and Ranging) apparaît comme une technologie prometteuse pour de nombreuses applications forestières. Il a déjà fait l'objet de plusieurs articles dans cette même revue, détaillant la technique ou ses applications possibles (voir Bibliographie). Nous n'y revenons donc pas ici et ne développons que les aspects inhérents à notre propos.

La mission aérienne Lidar a permis de réaliser un nuage de points en 3 dimensions de la Combe d'Aillon avec une densité moyenne d'environ 16 points/m². Ce nuage brut a ensuite

été filtré de ses points « végétation » afin de ne conserver que les points représentant le sol. Malgré une végétation parfois importante (forêt résineuse dense), nous avons ainsi obtenu une représentation du relief avec une densité moyenne de 1.6 points/m² et une précision annoncée inférieure à 20 cm en altimétrique et inférieure à 40 cm en planimétrique (précisions fournies par le prestataire classique pour les capteurs Lidar).

Le modèle numérique de terrain (MNT) issu des données Lidar, au pas de 1 m, a une résolution et une précision nettement supérieures aux MNT actuellement disponibles en montagne comme par exemple la BD Topo de l'IGN. Il donne une représentation beaucoup plus fidèle du terrain et de la micro topographie (figure 1). Il est possible de créer des produits dérivés du MNT comme les courbes de niveau qui représentent le relief sur des cartes en 2 dimensions (planimétriques). Les courbes de niveau obtenues à partir de données Lidar sont elles aussi beaucoup plus précises et fidèles à la réalité que celles représentées sur les cartes topographiques 1/25000^e de l'IGN (figure 6).

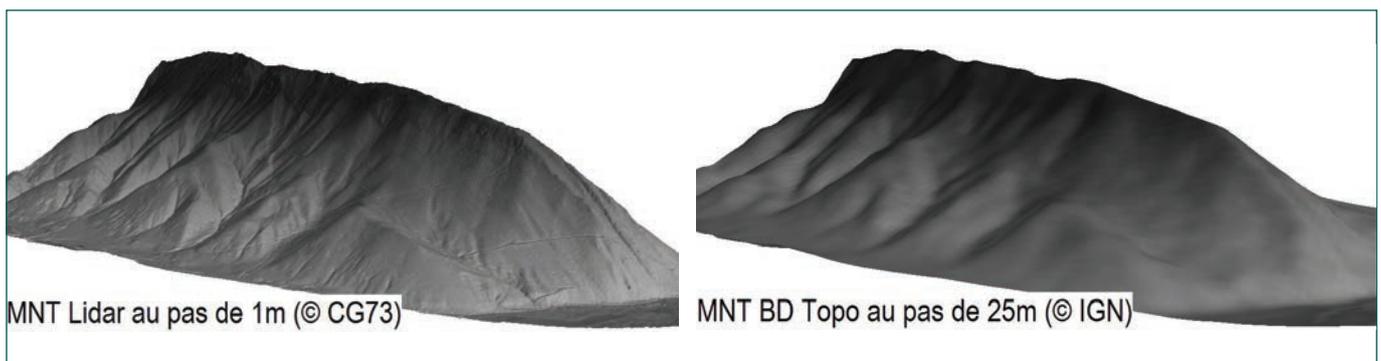


Fig. 1 : comparaison en vue 3D des MNT issus du Lidar et de la BD Topo de l'IGN

Sur cet exemple représentant le versant est du Mont de la Buffaz (combe d'Aillon), on voit que le MNT de la BD Topo représente un relief très lissé alors que le Lidar montre une granulométrie beaucoup plus fine représentant la micro topographie.

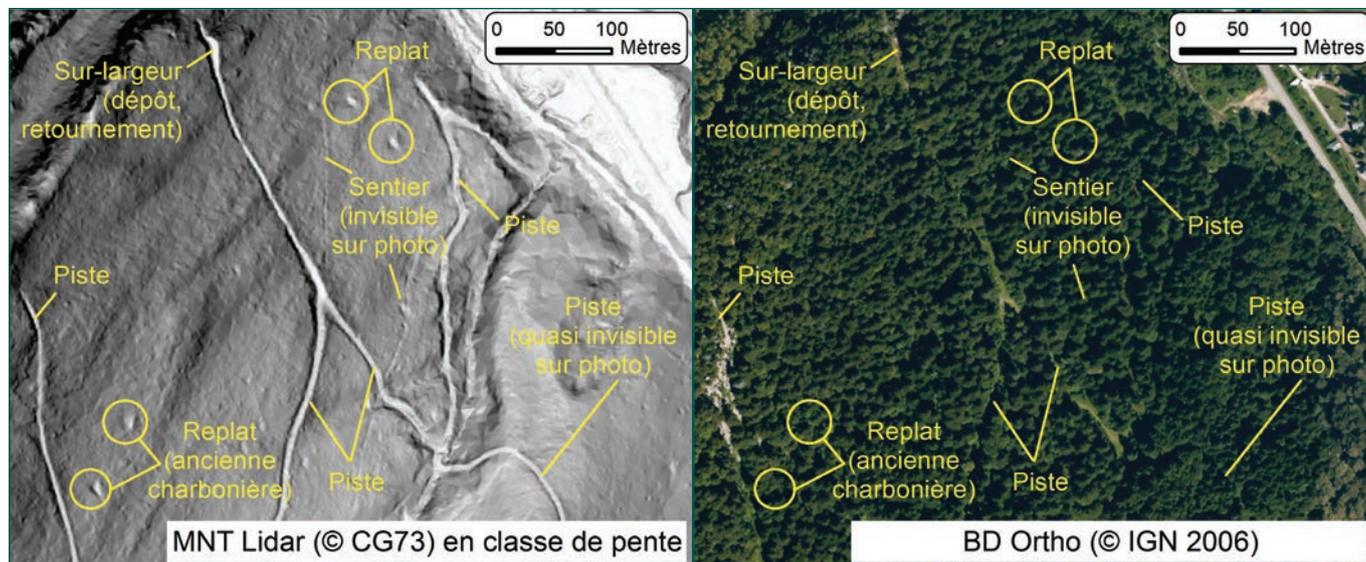


Fig. 2 : comparaison de visualisation du terrain entre les données Lidar et les photos aériennes

À l'aide du MNT Lidar, transformé en classe de pente, il est possible d'observer le terrain comme si il n'y avait pas de végétation. En forêt, on distingue alors les dessertes, leurs largeurs... beaucoup plus facilement que sur une photo aérienne.

Une aide précieuse pour la détection et l'évaluation de la desserte existante

Dans un premier temps, la localisation de « l'intensité » de la ressource forestière a été réalisée à partir des données Lidar (Monet *et al.*, 2011). Puis un inventaire précis et exhaustif de la desserte, nécessaire à toute étude d'accès à la ressource forestière, a permis de repérer les zones accessibles, les modes de mobilisation possibles ainsi que les déficits en infrastructures (figure 4).

L'analyse du MNT Lidar (transformé en classe de pente ou affiché avec différents ombrages) facilite le recensement de la desserte existante : **on peut visualiser le terrain comme si on avait enlevé la végétation** (figure 2). Il est ainsi possible, par repérage visuel, de détecter la desserte de façon plus exhaustive, plus facilement et avec une meilleure précision qu'avec les sources de données « classiques » comme l'orthophotographie IGN. Par exemple, sur la forêt départementale de la Combe d'Aillon, on a inventorié deux fois plus de voies forestières que lors du premier inventaire réalisé dans

le cadre d'une révision d'aménagement forestier. On a aussi amélioré la position de cette desserte puisqu'il pouvait exister plusieurs dizaines de mètres de décalage avec le tracé du premier inventaire (figure 3).

L'analyse des données collectées a mis en évidence un manque d'infrastructure routière sur un versant de la forêt (versant est du Mont de la Buffaz) en particulier dans sa partie sud. En effet, la cartographie des surfaces potentiellement mobilisables par tracteur forestier (figure 4) montre qu'une partie importante de la ressource forestière n'est pas accessible au tracteur ou nécessite un traînage des bois important (supérieur à 1 km).

De plus, l'absence totale de route forestière rend impossible l'implantation de lignes de câble (débardage aérien) car celles-ci nécessitent un accès pour l'acheminement du matériel et l'évacuation des bois. Ce constat a conduit à une réflexion globale afin d'améliorer l'accès à la ressource forestière sur l'ensemble du versant (intégrant forêt départementale et forêt privée) et a abouti à plusieurs propositions de projets de routes forestières (figure 5).

Une aide au choix d'implantation d'un projet de desserte

Lors du choix de l'implantation des projets de desserte, la représentation précise et fidèle du relief du MNT Lidar a permis d'identifier les points bloquants (barres rocheuses ou pente en travers très forte), les points de passage obligés ou d'implantation potentielle des lacets (zones de replat ou de plus faible pente), et de choisir les meilleures solutions de tracé.

Ainsi, l'option d'accès 1 (figure 5), identifiée à partir de données IGN 1/25000^e, a dû être abandonnée car irréalisable pour cause de relief trop marqué (figure 6). De même, on a pu repérer pour l'option d'accès 3, finalement retenue, les zones de plus faible pente ou de replat, souvent indétectables à partir du fond IGN 1/25000^e, et localiser les secteurs potentiels d'implantation de lacets qui sont souvent, en forêt de montagne, des points de passage obligés (figure 7). L'option d'accès 2, bien que techniquement réalisable, a été abandonnée car elle nécessitait un nombre de lacets trop important.

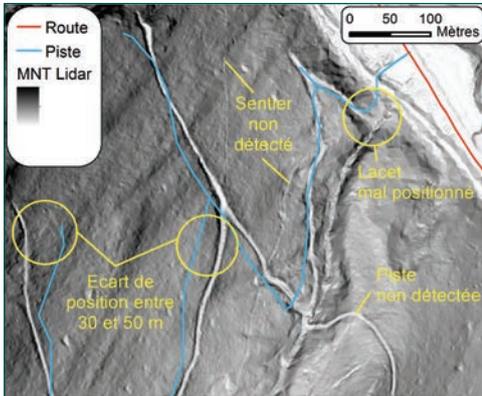


Fig. 3 : superposition de la desserte détectée sur photo aérienne (en bleu) et du MNT Lidar
La détection de desserte à partir de données Lidar est beaucoup plus exhaustive et précise que sur photo aérienne

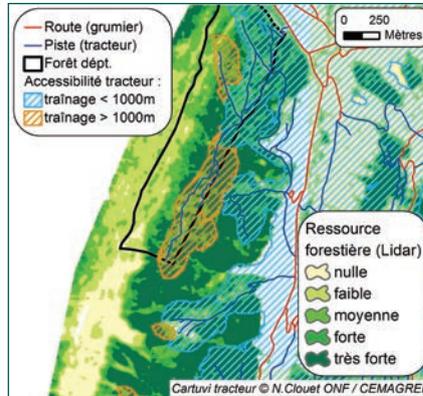


Fig. 4 : cartographie de la ressource forestière et des surfaces potentiellement mobilisables par tracteur forestier (Cartuvi Tracteur)
Une forte partie de la ressource forestière est actuellement inaccessible (non hachurée) ou nécessitant un trainage des bois important (hachurée en orange)

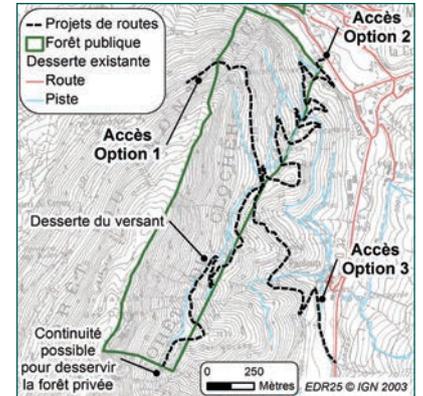


Fig. 5 : propositions de projets de routes forestières
Afin de desservir le canton, plusieurs options d'accès possibles sont à étudier.

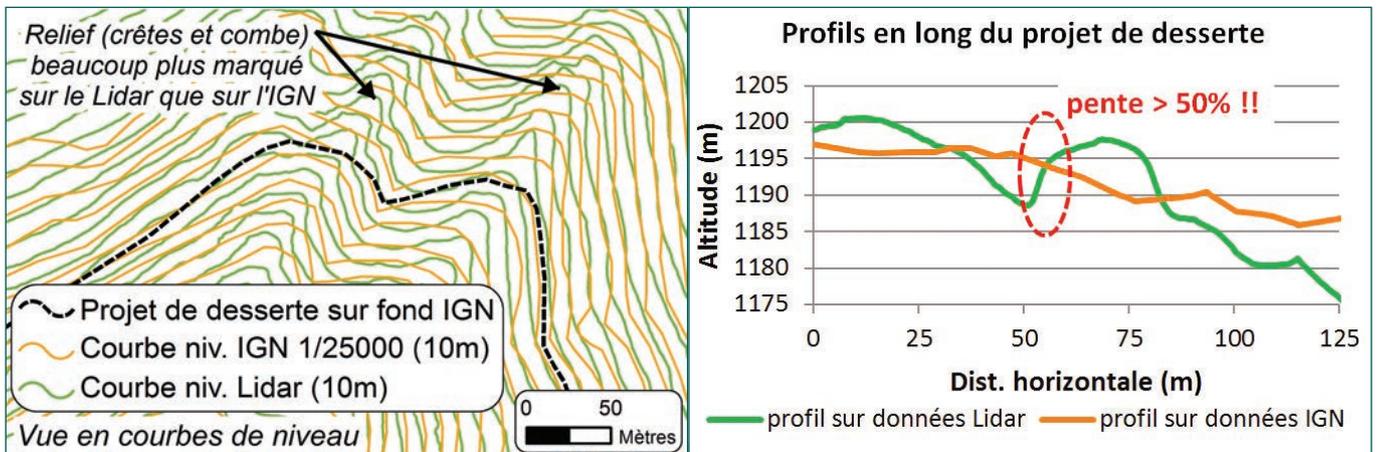


Fig. 6 : comparaison de représentation du relief entre les données Lidar et IGN 1/25000°
En observant les courbes de niveau et les profils en long du projet de desserte, on remarque que le relief présenté par le Lidar est beaucoup plus marqué que celui présenté par les données IGN 1/25000e. Le projet de route initial, tracé à partir des données IGN, est irréaliste.

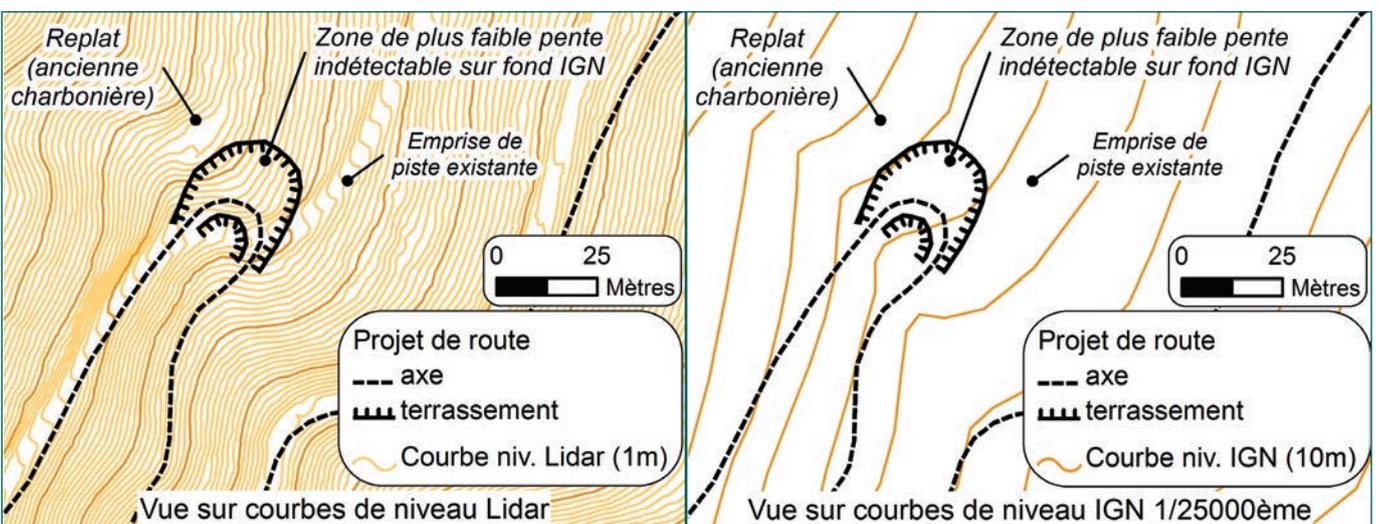


Fig. 7 : exemple de choix d'implantation potentiel d'un lacet sur route forestière
En montagne, les zones de plus faible pente sont souvent des points de passage obligés pour l'implantation de lacets. Le Lidar permet de repérer ces zones, souvent indétectables sur fond IGN 1/25000°.

Grâce aux données Lidar, il est donc possible de limiter les reconnaissances de terrain en phase amont (recherche des tracés potentiels), notamment lors de l'étude d'aménagement; reconnaissances qui sont parfois longues et fastidieuses en zone de forte pente. Ce constat est d'autant plus vrai en zone de relief très accidenté où la présence de petites barres rocheuses est indétectable sur le fond IGN. La reconnaissance sur le terrain pour déterminer le contexte hydrogéologique et surtout les risques naturels pouvant affecter les terrassements reste par contre toujours indispensable avant le piquetage du projet.

Perspectives et avenir

L'utilisation de données Lidar dans le cadre d'études sur la desserte forestière (projet d'implantation, schéma de desserte ou de mobilisation des bois...) est d'une aide considérable. La limite à sa généralisation reste aujourd'hui le manque de données disponibles et le coût d'acquisition élevé des vols Lidar (400 à 500 € du km² en montagne, comprenant le vol, la fourniture des données brutes et dérivées comme le MNT). C'est pourquoi il est important de poursuivre l'exploitation des potentialités de cet outil, afin de mettre en évidence et de chiffrer les services rendus par le

Lidar en termes de précision et de gain d'efficacité pour les forestiers, mais aussi pour tous les aménageurs du territoire, de façon à trouver des formules de mutualisation.

Il est évident que les données MNT issues du Lidar sont d'une grande précision. Malgré tout, leur qualité reste à évaluer précisément notamment en fonction des paramètres d'acquisition Lidar (nombre de points/m²) et des conditions du milieu (pourcentage de couvert forestier, de pente...). L'évaluation de MNT issus de missions Lidar à moins forte densité (donc moins coûteuses) est dans ce contexte un enjeu important : la (probable) moindre précision de ces MNT permettra-t-elle une aussi bonne détection de la desserte ? Des projets de recherche sont déjà en cours sur le sujet.

D'ores et déjà, les outils disponibles à l'ONF permettent de valoriser les MNT fins issus de Lidar : avec les logiciels SIG (ex. ArcGIS) il est possible de réaliser le calcul des pentes et des ombrages ainsi que leur interprétation visuelle (« photo-interprétation » du MNT) pour cartographier la desserte. Le diagnostic de l'efficacité de la desserte est quant à lui réalisable, comme dans cette étude, grâce à l'outil Cartuvi tracteur développé par la R&D ONF et Irstea.

Pour aller plus loin, des projets de recherche sont également en cours sur la détection et la qualification semi-automatique de la desserte à partir de MNT fins issus de Lidar : c'est notamment l'objet d'une partie du projet FORESEE soutenu par l'Agence nationale de la recherche.

On peut aussi imaginer des travaux de recherche sur des outils numériques de cubature automatique ou de choix optimal de tracés d'un projet de desserte. L'ONF participe également à des projets de développement de Lidar embarqué par des vecteurs plus légers et plus économiques (ex. drone ou ULM), peut-être plus adaptés à des acquisitions sur des petits massifs (inférieurs à 500 ha).

Alain MUNOZ

ONF, pôle R&D Chambéry

Guy VIARD-CRETAT

ONF, Agence départementale de Savoie

Jacques FAY

ONF, pôle R&D Chambéry

Bibliographie

BOCK J., DUPOUEY J.L., DAMBRINE E., GEORGES-LEROY M., 2008. Les structures archéologiques et les peuplements de la forêt domaniale de Haye analysés par laser aéroporté. *RenDez-Vous techniques* n° 20 pp. 15-18

MONNET J.M., CLOUET N., MERMIN E., BERGER F., 2011. Le scanner laser aéroporté en zone de montagne : localiser la ressource forestière et évaluer ses conditions de mobilisation. *RenDez-Vous techniques* n° 31 pp. 49-54

BOCK J., RENAUD J.P., DEZ G., MARTINS F., LEROY M., DAMBRINE E., DUPOUEY J.L., 2011. Le Lidar, outil performant pour cartographier la hauteur des peuplements forestiers. *RenDez-Vous techniques* n° 32 pp. 39-44



Vue du site, versant est

A. Munoz, ONF

Comprendre l'évolution de la demande de bois résineux en France pour mieux l'intégrer dans la gestion forestière

Le pôle R&D ONF de Dole a été sollicité pour réunir et exposer l'ensemble des éléments qui permettent de comprendre ce qui sous-tend la demande de bois résineux en France et ce qui la caractérise, de façon à en tenir compte dans la gestion forestière. De l'exposé est née l'idée d'un article. La matière étant particulièrement consistante, le projet est devenu un triptyque, dont les parties forment un tout mais dont chacune peut aussi se lire de façon indépendante. Pour cette formule inhabituelle, les auteurs sont présentés pour chaque partie selon leur contribution effective, tandis que la bibliographie est regroupée à la fin du triptyque.

Dans une ambiance croissante de sensibilité à l'écologie, et simultanément dans l'urgence bien réelle d'une atténuation du changement climatique, la forêt et le bois ont aujourd'hui le vent en poupe. Toutefois, même au sein de la communauté des forestiers, la place que doivent occuper les résineux dans la ressource française, les caractéristiques (dimensions, qualité...) optimales des produits à rechercher, et *in fine* les sylvicultures à mettre en oeuvre pour tenir compte de ces enjeux, restent des sujets de débats animés. Quoi qu'il en soit, une gestion forestière durable reste abso-

lument indissociable d'une démarche de filière, et l'objet de cet article est précisément d'éclairer le producteur (le forestier) sur les attentes de l'utilisateur, qu'il s'agisse du client final ou du transformateur.

Dans un premier temps, il s'agit de se forger une idée aussi objective que possible de l'importance relative des résineux et de leurs usages principaux, en dressant l'état des lieux de la filière résineuse française, depuis la surface occupée en forêt jusqu'à la balance commerciale des sciages, au panel de leurs usages et aux dimensions correspondantes.

Il apparaît ensuite nécessaire de préciser les caractéristiques géométriques et qualitatives des bois qui découlent à la fois des utilisations majeures des produits finis et des outils et procédés de transformation mis en oeuvre.

Vient enfin la façon dont le sylviculteur peut (doit) s'interroger sur ses possibilités d'actions sur ces critères de forme et de qualité des bois au plus près des exigences des utilisateurs; après un bref rappel des connaissances principales sur le sujet, nous évoquerons les perspectives offertes par des actions de R&D en cours ou à venir.

I. De la ressource à la demande : un panorama de la filière résineuse française

Pour appréhender la filière résineuse française (bois d'œuvre) dans son ensemble, nous commencerons par une approche classique très macroscopique mais qui donne déjà de solides indications. Indications que nous affinerons en explorant plus avant le marché français des sciages, les grands secteurs qui le composent, les enseignements que l'on peut tirer du détail des importations, les tendances évolutives observées. Et pour compléter le tableau, nous

confronterons enfin ces observations au « paysage » des scieries résineuses françaises, à son évolution probable.

Importance relative des résineux : surface occupée, production et volumes de sciages

D'après l'IFN, la France métropolitaine compte aujourd'hui 15,5 millions d'hectares (Mha) de forêt de production dont près de 11,1 Mha

de feuillus (71 %) et 4,4 Mha de résineux (29 %). Parmi ces derniers, pin maritime et pin sylvestre sont les plus répandus avec respectivement 24 et 20 % de la surface totale de conifères; sapin pectiné et épicéa se partagent le troisième rang avec chacun 13 % (figure 1).

La forêt publique occupe 4,6 Mha en métropole dont 3,8 Mha de forêt de production, soit 25 % de la surface forestière de production; la proportion

de résineux y est de 33 %, soit à peine plus que la moyenne nationale toutes propriétés confondues. En revanche, ce sont le sapin pectiné (27 %) et l'épicéa commun (17 %) qui dominent devant les pins. Le douglas est quant à lui deux fois plus répandu en forêt privée, où il occupe 10 % de la surface résineuse, qu'en forêt publique (seulement 5 %).

En volume, les résineux cumulent 36 % du stock de bois sur pied (cette proportion atteint 40 % en forêt publique), mais plus de 45 % de la production brute annuelle. Leur production moyenne à l'hectare est de plus d'une fois et demie fois celle des feuillus (FCBA, 2012) !

Les résineux : minoritaires dans la ressource, majoritaires en sciages produits

En quantité de bois d'oeuvre récolté, avec près de 16 millions de m³ (Mm³) sur un total de l'ordre de 21 millions, les résineux cumulent 75 % du total récolté en France ! Le sapin et l'épicéa représentent à eux seuls plus de 30 %, le pin maritime 29 % et douglas-mélèze 9 %.

Enfin, à l'issue de la première transformation, la production française annuelle de sciages est de l'ordre de 8,5 millions de m³, en baisse de 15 % depuis 2008, entre autres en raison de la crise internationale et de ses effets de ralentissement de l'activité de la construction ; environ 80 % des sciages produits sont issus de résineux, en partant d'une ressource qui occupe 29 % de la surface de production des forêts française et 36 % du volume ! Ce décalage manifeste entre la ressource forestière et le degré d'usage en bois d'oeuvre est plus accentué encore pour le sapin et l'épicéa puisque, parmi les résineux, ces deux essences occupent 26 % de la surface de production, pour 42 % du volume sur pied et 55 % des sciages (figure 2).

Forêt dédiées à la production	Toutes propriétés		Forêt publique seule	
	Surfaces (x 1000 ha)	Volumes sur pied (x 1000 m ³)	Surfaces (x 1000 ha)	Volumes sur pied (x 1000 m ³)
Pin maritime	1 082	135	109	13
Pin sylvestre	904	144	211	37
Epicéa commun	579	184	217	66
Sapin pectiné	584	185	341	96
Douglas	392	99	63	15
Autres résineux	906	132	322	51
Total résineux	4 447 (29 %)	879 (36 %)	1 263	278
Total feuillus	11 064 (71 %)	1 594 (74 %)	2 538	417
Total général	15 511	2 473	3 801	695

Fig. 1 : part des principales essences résineuses françaises - Source : IGN 2012

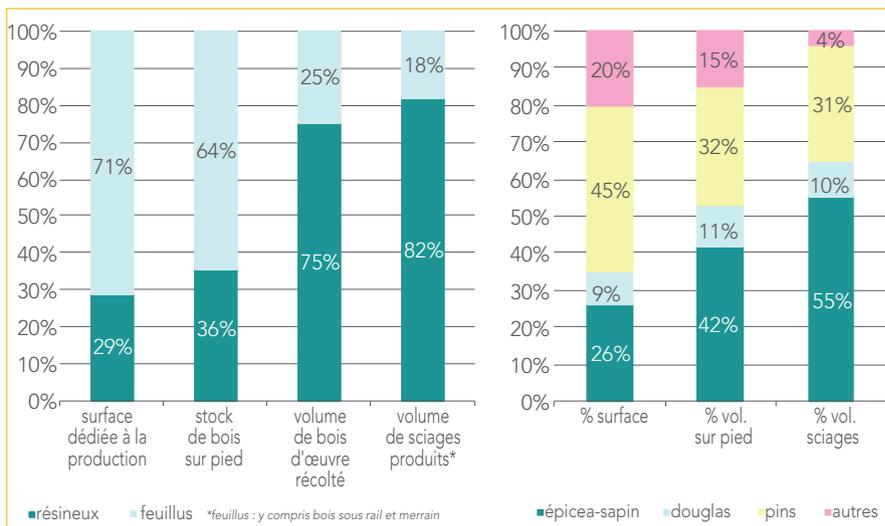


Fig. 2 : répartition feuillu / résineux et part relative des différents résineux dans la filière forêt-bois française - Sources : IGN, 2012 ; FCBA, 2012 ; Agreste, 2012

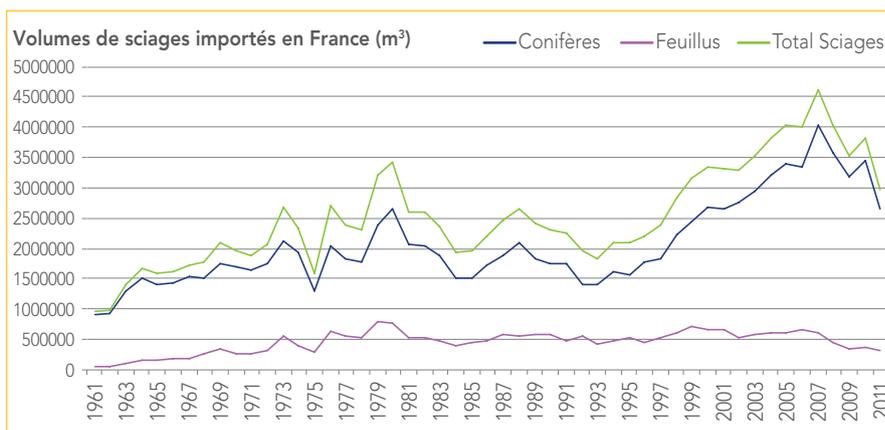


Fig. 3 : volumes de sciages importés en France de 1961 à 2010 – Source : FAOSTAT 2012

Au-delà de ce décalage, la ressource résineuse suffit-elle à répondre aux attentes des consommateurs ?

Hélas non ! La production de sciages résineux en France est structurellement déficitaire au regard des besoins : le déficit net était de 2,7 millions de m³ en 2010 (il a même atteint 4 Mm³ en 2008 !), soit près de 40 % de la production nationale ! En valeur, en 2011, les sciages représentaient plus de 10 % du déficit commercial global de la filière bois française (694 M€ sur près de 6 milliards), dont 90 % pour les seuls sciages résineux ! (Lochu, 2012 ; Roy et Magrum, 2012).

Cette situation n'est pas récente (figure 3) : si les importations de sciages feuillus restent modestes (0,5 Mm³) et plutôt stables depuis une trentaine d'année, celles de résineux ont été en constante augmentation, plus fortement encore depuis le début des années 1990 et ce jusque fin 2010. La crise économique actuelle provoque un recul perceptible de ces importations mais le déficit de la ressource française en bois d'œuvre résineux au regard des besoins reste chronique.

Fig. 4 : segmentation du marché français des sciages résineux en 2010 - Source : Lochu 2012

Principaux usages des sciages résineux selon les essences (d'après Lochu, 2012)

- Les sciages de sapin et d'épicéa (3,8 Mm³) sont utilisés principalement en charpente traditionnelle (32 %), emballage et coffrage (15 %), et pour moins de 10 % en charpentes industrielles, ossature bois (OB), charpentes traditionnelles taillées en commandes numériques (CN), charpentes en bois lamellé-collé (BLC) et Bois aboutés/contre-collés.
- Le douglas (0,7 Mm³ de sciages, en progression constante) est encore aujourd'hui essentiellement utilisé en emballage et coffrage (26 %), en dépit de ses performances mécaniques et de sa durabilité naturelle. Son utilisation en charpente (traditionnelle ou industrielle) ou structure d'une part, et en bardage extérieur d'autre part, ne représente respectivement que 20 et 6 % des sciages commercialisés. La relative jeunesse de la ressource explique peut-être en partie l'usage en structure encore modeste pour cette essence.
- Le pin maritime, destiné à plus de 50 % à l'emballage/coffrage, et secondairement en planchers/lambris, n'est en revanche quasi pas utilisé en bois de structure, d'ossature, ou en extérieur (faibles performances mécaniques et de durabilité).
- Le pin sylvestre et les pins noirs restent principalement employés dans les secteurs de l'emballage alors qu'ils pourraient être valorisés en bois de structure et d'aménagements extérieurs (durabilité naturelle du duramen). C'est d'autant plus préjudiciable qu'ils représentent déjà un volume important en forêt publique et pourraient, dans certains contextes pédoclimatiques, constituer un avenir en forêt de plaine, en lieu et place de feuillus médiocres.

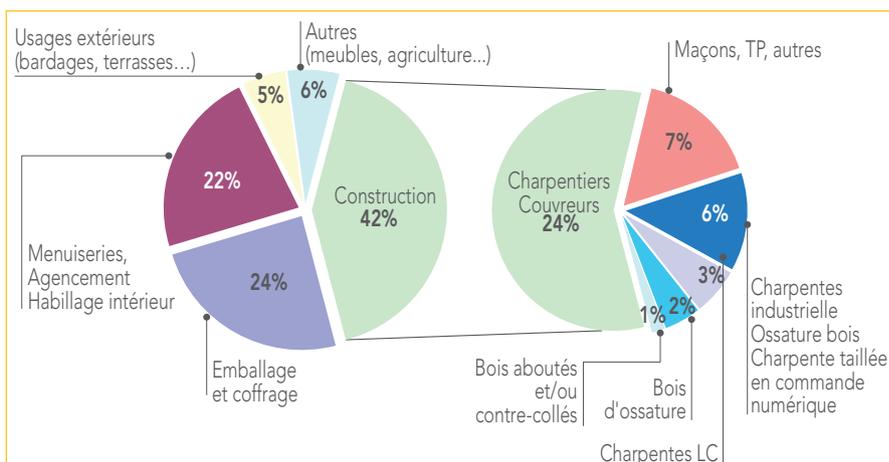
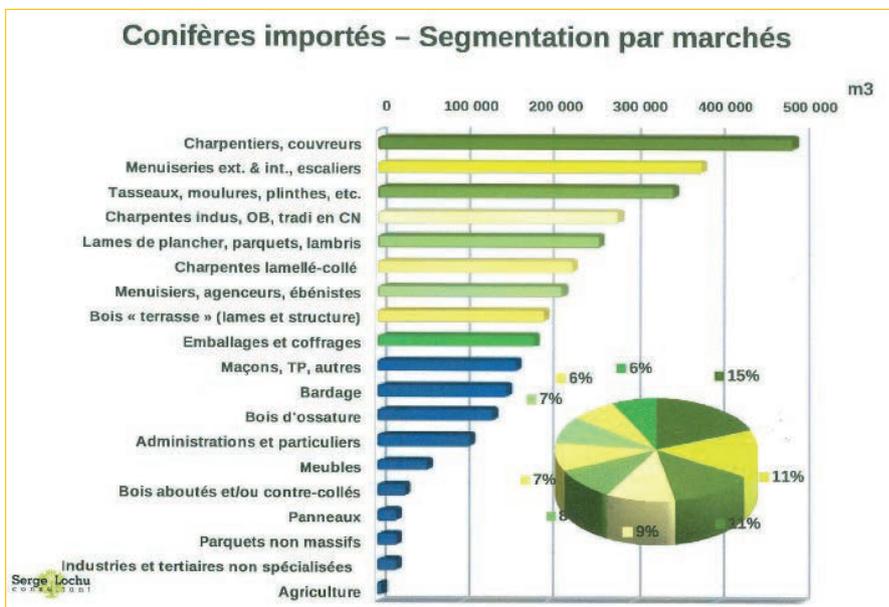


Fig. 5 : les marchés de l'import des sciages résineux - Source : Lochu 2012

NB : le diagramme en camembert représente 80% du marché. On voit clairement apparaître en tête des importations :

- les produits standardisés à destination de la construction : bois de charpente traditionnelle et industrielle, ossature bois ;
- des produits de haute qualité esthétique pour la menuiserie et l'habillage intérieur ou extérieur, la plupart du temps de petites sections (tasseaux, moulures, lambris, bardages, etc.)



L'Allemagne, la Suède, la Finlande et la Fédération de Russie sont nos principaux fournisseurs ; en 2010 ils cumulent 70 % des importations françaises de sciages de conifères (FAOSTAT, 2012). Pour les trois derniers au moins, il s'agit clairement de sciages issus de bois à croissance lente, provenant de peuplements conduits en situation dense (pas ou très peu d'éclaircies d'amélioration), qui leur confèrent des cernes fins, réguliers, des noeuds de petites dimensions, et une faible conicité.

En bref,

la ressource française en bois d'oeuvre résineux, bien plus modeste que la ressource feuillue tant en surface occupée qu'en capital sur pied, est largement déficitaire au regard de la demande en sciages, qui aurait tendance à progresser.

Mais quels sont les secteurs d'activités qui « tirent » cette demande en sciages ? À quelles familles d'usages sont ils principalement destinés, et quelles sont *in fine* les caractéristiques dimensionnelles et qualitatives des produits recherchés par le marché ?

Le marché français des sciages résineux

La France consomme annuellement 9,6 Mm³ de sciages résineux, dont plus de 40 % pour le seul secteur de la construction au sens large (charpente traditionnelle, charpente industrielle, bois d'ossature, bois aboutés et/ou contre-collés) ! Viennent ensuite, par ordre décroissant d'importance (figure 4) : le coffrage et l'emballage (24 %, palette y compris), les menuiseries, l'agencement et l'habillage intérieur (22 %), puis les usages extérieurs en bardages, lames de terrasses (5 %). On trouvera en encadré les destinations principales des sciages de résineux selon les essences.

Une analyse approfondie des importations de sciages résineux, et notamment de la place relative des

différentes familles d'usages, souligne l'importance de la demande en produits finis ou semi-finis, de sections petites et standardisées, destinés principalement à la construction.

En effet, au regard des volumes produits en France les importations concernent principalement (figures 4 et 5) :

- les bois d'ossature rabotés ;
- les sciages à destination de charpente industrielle (fermette), ossature bois (OB) et charpente traditionnelle taillée sur des centres d'usinage à commande numérique (CN), et surtout de charpentes en bois lamellé-collé (BLC ; pour cette seule dernière catégorie, 230 000 m³ importés pour 24 000 m³ produits en France) ;
- les tasseaux, moulures, plinthes et menuiseries intérieures/extérieures ;
- le bois d'usage extérieur (bardages, lames de terrasses).

Les tendances fortes

Dans une vision plus prospective, l'utilisation de bois d'oeuvre dans la construction, soutenue par la politique volontaire annoncée dans le discours présidentiel d'Urmatt (19 mai 2009), ne peut que s'accroître.

Cela concerne principalement les résineux, du fait de leurs performances (rapport qualité/prix), et confirme en particulier l'extension de la demande en sciages de petites sections mais de bonne qualité mécanique et/ou esthétique, à en juger par les tendances fortes observées :

■ Le marché de la **charpente en lamellé-collé** est en plein essor en France depuis quelques années, notamment en raison de la tendance à l'allègement et à l'optimisation des structures, dans un souci de diminution des coûts tout en conservant des performances optimales.

■ De même, le **bois reconstitué** (BMR : bois massifs aboutés, panneautés ou contre-collés) tend à remplacer le bois massif dans les charpentes traditionnelles de grandes dimensions, du fait de sa meilleure stabilité dimensionnelle

et de la possibilité de maîtriser les performances mécaniques des éléments de structure.

■ Enfin, le secteur de la **construction-bois** est également en pleine expansion. Est-ce en raison d'un engouement pour la construction « écologique » et/ou de l'application des nouvelles réglementations thermiques mettant en avant l'utilisation du matériau bois ? Quoi qu'il en soit, en 2011 en France, une maison sur 10 est construite en bois ! Parmi les systèmes constructifs développés dans la construction bois, l'ossature bois, qui met en oeuvre des produits très industrialisés, prédomine très nettement (75 %) et de façon croissante. Ce secteur d'activités concerne aujourd'hui près de 2 500 entreprises, dont 16 400 salariés et 2 milliards d'euros de chiffre d'affaire sont strictement liés à la construction bois. Mais quand à leur approvisionnement, le constat ci-dessus est confirmé : seulement 23 % des entreprises du secteur s'approvisionnent exclusivement en bois d'origine française... (FBF, 2012).

Une évolution massive de la demande vers les petites sections

Pour appréhender plus en détail les principales sections recherchées par le marché actuel et surtout à venir, il est possible de les regrouper selon les familles d'usages les plus importantes que nous venons de décrire :

- charpente traditionnelle : ensemble des pièces utilisées classiquement par les charpentiers (madriers, bastings, chevrons, liteaux, voliges...);
- charpente industrielle (= fermette, fabriquée en atelier) : les éléments sont généralement assemblés par des connecteurs métalliques ;
- ossature bois : cette catégorie regroupe les produits employés pour la confection de murs en ossature bois ;
- BLC (Bois Lamellé Collé) : sciages (lamelles) entrant dans la fabrication de produits en lamellé-collé ;
- emballage/palette : bois destinés au transport de biens et de mar-

chandises (par exemple pour la confection de caisses/palettes).

D'après les standards (nationaux et européens) pour les utilisations en structure, en BLC et en emballage/palette, mais aussi d'après les catalogues de produits des fournisseurs, il est possible de lister (figure 6) les sections les plus couramment utilisées, ainsi que les qualités mécaniques requises (cf. 2^e partie). Il en ressort que **les plus gros volumes de sciages demandés par le marché sont des produits de petites sections**, dépassant rarement 75 x 225 mm, pas même en charpente traditionnelle. Les bois reconstitués (BLC, BMR) ont en effet de plus en plus tendance à remplacer le bois massif dans les charpentes traditionnelles de grande dimension du fait d'une meilleure stabilité dimensionnelle (ce sont des produits secs) et d'une plus grande maîtrise des performances mécaniques des éléments de structure.

Pour résumer,

la physionomie générale du marché français des sciages résineux, les spécificités des importations et les tendances observées dans l'évolution des usages soulignent l'intensité et l'accroissement de la demande pour :

- des sciages standardisés (en dimensions et qualités),
- avec de bonnes propriétés mécaniques et souvent esthétique (usages visibles),
- principalement en épicéa et sapin pectiné (le second étant moins prisé car plus difficile à sécher à coeur)
- et de façon croissante en douglas et mélèze, dont la qualité mécanique est désormais confirmée et qui sont en plus dotés d'une forte durabilité naturelle (prisée notamment pour des usages extérieurs).

Mais au regard de cette demande, comment se caractérise le paysage des scieries françaises? Comment ce secteur d'activité répond-il aux spécificités du marché français actuel, et est-il en mesure de s'adapter à celui de demain?

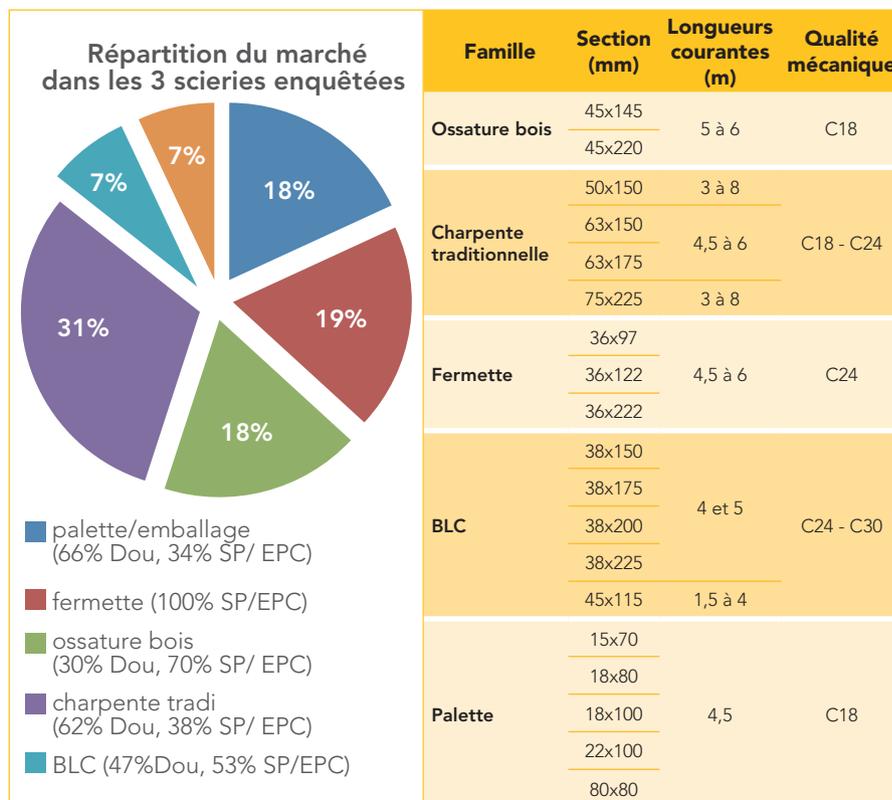


Fig. 6 : résultats de l'enquête réalisée auprès de 3 scieries industrielles représentatives de leur secteur d'activité : répartition de la production par grandes familles d'usage et caractéristiques standard des sciages correspondants - Source : Boudey et Moureaux 2012

NB : aucun des industriels enquêtés n'est spécialisé sur l'emballage/palette; cette catégorie est donc ici un peu sous représentée au regard du marché national, d'autant qu'une partie des sciages correspondants relève des « sous produits de côtés » non renseignés comme produits dans cette enquête.

Le paysage des scieries résineuses françaises

Panorama général

Loin derrière l'Allemagne (22 Mm³ de sciages/an) et la Suède (18 Mm³ de sciages/an), la France (environ 8,5 Mm³/an) occupe le cinquième rang européen du volume annuel de sciages produits. D'après une récente étude (Roy et Magrum 2012), cette activité représente :

- 788 scieries pures et 1 007 entreprises ayant la double activité, exploitation forestière et scierie ;
- 12 000 salariés, pour environ 10 millions de m³ de sciages produits (en 2008), soit une productivité moyenne d'un peu moins de 850 m³/salarié (soit tout de même près de 5 fois plus qu'il y a 30 ans).

De 1998 à 2008, le nombre de scieries spécialisées dans la transformation des feuillus a chuté de 35 % contre seulement 20 % pour celles transformant des résineux au point qu'actuellement ces dernières représentent plus des 2/3 du nombre total de scieries.

La production moyenne des scieries résineuses est de 6 900 m³/an; elle est 3 fois moindre pour les scieries de feuillus. 73 scieries (< 5 % du total) réalisent plus de 46 % de la production de sciages (moyenne > 53 000 m³/an); elles sont principalement localisées au sein des massifs de production résineux (Aquitaine, Rhône-Alpes, Auvergne, Vosges, Bourgogne). Et 18 % des scieries produisent plus de 75 % des sciages français !

À titre de comparaison, on peut considérer la situation de la Suède, qui compte (Chalayer, 2012) :

- 2 000 scieries dont 140 industrielles (production > 10 000 m³/an);
- 7 000 salariés, soit une productivité moyenne supérieure à 2 500 m³/salarié.

La production moyenne de ces scieries (quasi exclusivement résineuses) est de 120 000 m³/an (3 fois plus qu'il y a 30 ans). 140 scieries (7 % du total) produisent 92 % des sciages suédois.

Tout comme la ressource forestière, les scieries françaises sont fortement diversifiées (taille, essences, produits...). On peut cependant dégager trois grands types de stratégies d'entreprises :

- des scieries industrielles de résineux : 316 entreprises, implantées sur le marché mondialisé du bois destiné principalement à la construction, qui s'appuient en premier lieu sur une stratégie coût/volume. Ces entreprises s'efforcent de rentabiliser au maximum les outils de production dans lesquels elles ont lourdement investi (parcs de tri de grumes, unités de profilages canter, lignes de triages, mais aussi séchoirs, lignes de rabotage-profilage, d'aboutage et de contre-collage, et même unités de valorisation de produits connexes), afin de réduire leurs coûts de revient et espérer être compétitif sur le marché mondialisé de ces sciages (marchés à faibles marges);
- des scieries semi-industrielles : 390 unités (22 %) qui réalisent 16 % de la production nationale de sciages (moyenne de 3 425 m³/scierie);
- enfin, des scieries artisanales de petite capacité (60 %), à caractère souvent familial; elles ne produisent que 7 % des sciages, ont développé une stratégie de différenciation pour s'adapter à des « niches », souvent locales, et pratiquent quasi exclusivement du débit « sur liste ». Elles sont plus à même d'adapter leurs sections, autant à la ressource dont elles

disposent qu'à la demande (réalisation de sur-mesure, sections « exotiques », etc.).

Focus sur 3 scieries industrielles

Pour préciser la tendance évolutive de la demande en sciages résineux, et plus particulièrement en sapin/épicéa et douglas/mélèze (essences phares dans la construction), nous avons demandé à deux étudiants d'Arts et Métiers ParisTech (ENSAM) de Cluny d'analyser la production de 3 scieries industrielles, jugées représentatives de l'évolution de l'industrie des sciages en France, dans l'hypothèse d'un développement à venir de la filière construction en général.

Les 3 entreprises enquêtées sont équipées de lignes de profilage de type canter circulaires pour transformer principalement du sapin, de l'épicéa et du douglas (environ 22 % des volumes sciés en France en douglas et 6 % des volumes sapin/épicéa). Ces équipements leur permettent, grâce à des cadences de transformation très élevées (plus de 100 mètres linéaires de sciage/minute), de traiter des volumes conséquents : de 120 à 400 000 m³ de bois ronds/an, soit une productivité 5 à 10 fois supérieure à des lignes « ruban » traditionnelles. Il ressort de cette enquête (Boudey et Moureaux 2012) que leur production est principalement orientée vers des sections standardisées (figure 6) : la charpente traditionnelle représente plus de 30 % des volumes de sciages; viennent ensuite la fermette (seulement en épicéa/sapin), l'ossature bois mais aussi la palette/emballage, puis le bois lamellé-collé (BLC).

Un marché en évolution

Ces scieries industrielles s'inscrivent dans un marché national assez atypique au regard de ceux de nos voisins de l'est et du nord de l'Europe, et notamment l'Allemagne, l'Autriche, la Scandinavie : leurs commandes moyennes (débit sur liste) ne sont que de 25 à 30 m³, pour 20 à 25 références. Ceci s'explique en

partie par la spécificité régionale des types constructifs, encore très ancrée en France en comparaison de nos voisins européens chez qui on observe une standardisation des constructions nouvelles.

Cette spécificité du marché français contribue d'ailleurs probablement au maintien de la compétitivité de nos scieries, et en particulier des plus petites, vis-à-vis de la concurrence européenne et internationale. Elle leur permet en tout cas de s'adapter à une ressource foncièrement plus hétérogène que nos concurrents, tant sur le plan des essences que des qualités et des dimensions des bois. Et c'est certainement également un avantage dans le contexte de propriété aussi morcelé de la ressource forestière française (facteur accentuant l'hétérogénéité des lots).

Mais dans la perspective d'un accroissement de l'utilisation du matériau bois dans la construction, et en particulier du développement de la construction bois, l'industrialisation du secteur apparaît la seule voie permettant un développement à grande échelle. Elle impliquera donc une standardisation accrue des sciages (en sections et qualités). Or dans le marché mondialisé de ce type de produit, la concurrence risque d'imposer un accroissement des capacités de production, qui ne pourra vraisemblablement s'opérer sans :

- des progrès dans l'homogénéité des approvisionnements (en dimensions et qualité) et, en amont, de la ressource forestière résineuse elle-même (en quantité et qualité);
- une modernisation des parcs machines (parcs de tri, dispositifs d'optimisation des rendements matière, unités de profilage, dispositifs de classement mécanique, etc.).

Ce besoin d'investissement, et en parallèle l'incertitude qui pèse sur la pérennité des « niches régionales », interroge quand à la capacité de survie des petites unités spécialisées dans le sur-mesure...

En conclusion

Globalement, les besoins en sciages résineux s'orientent durablement vers une demande industrielle, qui privilégie systématiquement les petites sections (nouveaux usages/produits) et s'accommode mal des singularités qui nuisent à l'homogénéité et à la qualité mécanique ou esthétique des produits (notamment la branchaison).

Il est dès lors nécessaire, pour que chacun puisse agir en connaissance de cause, d'explicitier et objectiver les contraintes et les attentes des transformateurs industriels vis-à-vis de cette ressource en bois d'oeuvre résineux, en termes de dimensions, de qualité et d'essence, au regard des caractéristiques des produits transformés recherchés par le marché. C'est l'objet de la deuxième partie de cet article.

Bruno CHOPARD
Christine DELEUZE
Didier FRANCOIS
ONF, pôle R&D Dole

Robert COLLET
Alexia BOUDEY
Tifenn MOUREAUX
Arts et Métiers ParisTech, Cluny

II. Comprendre et objectiver les attentes des scieurs résineux industriels

Le panorama que nous venons de dresser met en évidence le poids prépondérant des scieries industrielles et des produits standardisés dans le marché des sciages français, et souligne l'accentuation prévisible de ce phénomène, avec notamment le développement du bois dans la construction.

Depuis quelques temps, les industriels du sciage des résineux manifestent des exigences croissantes quant à leur approvisionnement, non seulement en quantité de bois mis sur le marché, mais aussi - et c'est un message qui semble s'amplifier en termes de dimensions, forme et nodosité. Ceci se traduit en tout cas explicitement dans les contrats conclus avec eux, qui constituent aujourd'hui un de leurs premiers modes d'approvisionnement.

Ces exigences sont-elles objectives? Sur le plan dimensionnel (diamètre) et géométrique (conicité et rectitude en particulier), cette question peut être éclairée d'abord par une bonne compréhension du fonctionnement de leur principal outil de production, les lignes canter-circulaires, et des contraintes qui en découlent. Sur le plan qualitatif, elle impose un rappel des exigences de classement mécanique (normes), et des méthodes homologuées pour le faire.

Nous tâcherons ensuite d'explicitier les caractéristiques réelles de

la ressource résineuse française en termes de défilement et de qualité mécanique, en nous appuyant sur des travaux engagés de longue date, dont certains confirmés récemment par l'institut technologique FCBA.

Les outils industriels de transformation : des unités de profilage de type canter-circulaire

Aujourd'hui, en France, près de la moitié des sciages résineux est transformée sur des lignes de profilage de type canters-circulaires. Le profilage est considéré comme le moyen de production moderne le plus rationnel dans le domaine du débit de résineux. Ce mode de transformation permet d'accroître considérablement les cadences de sciage par rapport à des lignes ruban classiques : jusqu'à plus de 130 m/minute, permettant une productivité (m³/heure/homme) 4 à 5 fois supérieure (effectifs de maintenance compris). L'optimisation de cette productivité repose sur l'organisation rigoureuse de toute une chaîne d'opérations.

Un système rigoureusement optimisé...

En amont de la ligne de sciage il faut, au-delà du tri qualitatif par essence et qualité apparente, un tri dimensionnel extrêmement précis, le plus souvent selon le diamètre « fin bout » qui, comme nous allons le voir,

conditionne le plan de découpe. Par ailleurs l'optimisation du rendement matière répond à un calcul complexe qui dépend à la fois du type de produit, de la longueur des billons, du coefficient de défilement et de la courbure. C'est pourquoi la plupart des industriels se sont dotés de dispositifs d'analyse tridimensionnelle des grumes (avant billonnage) et de parcs de tri/stockage de grande capacité (figure 7).

Une fois sur la ligne de sciage proprement dite, les billons suivent un cheminement « linéaire » en traversant successivement, en schématisant (figures 8 et 9) :

- un scanner de forme définissant l'orientation de la courbure du billon qui optimise le rendement matière;
- 2 canters circulaires, qui fraisent les dosses en copeaux au lieu de les scier, avec une rotation du billon d'un quart de tour entre les deux canters verticaux;
- des unités de profilage (sortes de fraises « d'angle ») pour terminer le délignage avant débit;
- des scies circulaires pour extraire des sciages de rives, avec le plus souvent une rotation du billon d'un quart de tour entre les deux;
- un complexe de scies circulaires multiples (« multilame ») débitant le noyau (=cœur équarri du billon) en produits principaux, souvent identiques.



Fig. 7 : parc de tri des billons chez Siat Braun à Urmatt (67) et Monnet Sève à Sougy (58)

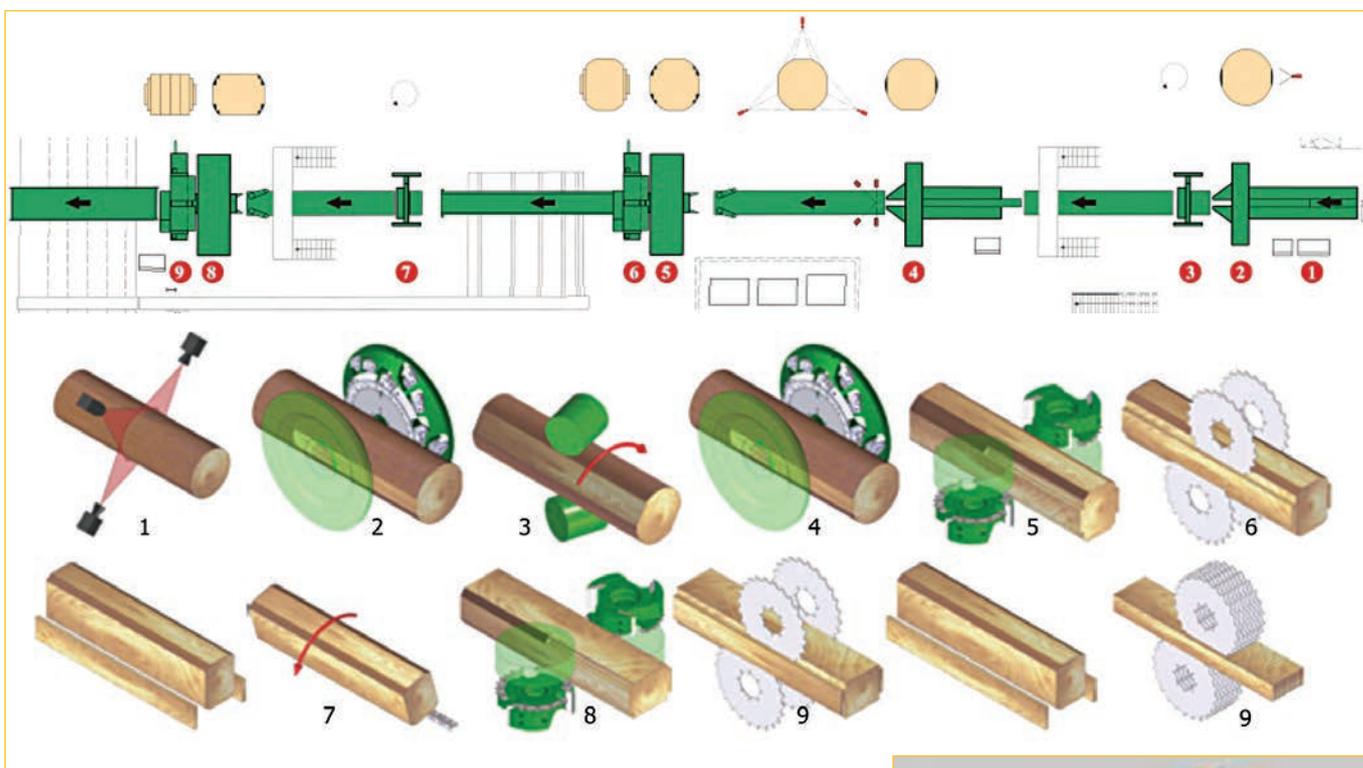


Fig. 8 : exemple d'une ligne de profilage de type canters-circulaires
Source : Constructeur LINCK

- 1 Scanner de forme et orientation de la courbure du billon
- 2 et 4 Scies canters
- 3 et 7 Retourneur
- 5 et 8 Unités de délignage
- 6 et 9 Unités de sciage (scies circulaires mono/multilames)

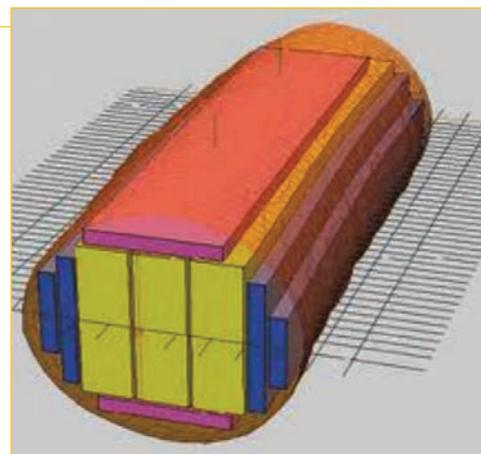


Fig. 9 : exemple de plan de débit simple dans un billon
Source : Constructeur LINCK

Avec ce mode de débit en un seul passage, avec fraisage préalable des dosses et délignures, on comprend que le plan de débit soit conditionné essentiellement par le diamètre fin bout (figure 9).

En aval de la ligne de débit, les avivés sont ensuite classés, puis regroupés, empilés et stockés selon la qualité et les dimensions finies. Certains d'entre eux peuvent alors faire l'objet de traitements supplémentaires : séchage, traitement de préservation, ou encore entrer dans une ligne de fabrication de bois massif abouté/reconstitué (BMA, BMR) et bois lamellé-collé (BLC).

D'une scierie à une autre, l'implantation des unités peut varier mais les principes sont identiques. Le convoyage entre chaque poste est limité au maximum grâce à une disposition en ligne des différents outils. Le dimensionnement des machines est étudié selon la capacité de la scie de tête (canter) afin d'éviter les goulets d'étranglement.

... dans certaines limites

Les outils de profilage permettent en théorie la transformation de billons ayant des diamètres fin bout de 12 cm à 65 cm et des longueurs jusqu'à 7,00 m. Mais en pratique, les diamètres maximum (gros bout) acceptés par les canter des industriels

français semblent ne pas dépasser 53 à 57 cm.

Il faut savoir que le sciage industriel de bois de dimensions supérieures nécessite des lignes adaptées aux gros diamètres et, pour la production des sections standards, l'ajout de dispositifs spécifiques de reprise pour débiter ensuite les noyaux équarris de forte section ; il peut s'agir :

- soit de plans de débits mono-noyau complexes (figure 10a), dont l'adaptabilité à la variation des diamètres des billons est délicate ;
- soit de plans de débits multi-noyaux (figure 10 b) nécessitant des scies de reprises multiples (la ligne principale se ramifie en plusieurs lignes secondaires, ce qui implique de doubler toutes les unités de sciage à l'aval) ou bien des dispositifs de convoyage de reprise pour remettre successivement les noyaux équarris sur la ligne principale, mais ceci implique alors d'en ralentir la cadence.

Ces équipements sont rares, et on peut y voir au moins deux raisons : 1) ils représentent un investissement coûteux, difficile à amortir par le gain de rendement matière que l'on peut espérer avec ces dispositifs, sauf peut-être à ne transformer que des billons de forte dimension ; 2) la disponibilité des bois de gros diamètre dont la nodosité serait compatible avec la production de petites sections

(et les prix qu'en attendent les forestiers !) n'encourage pas non plus ces équipements supplémentaires.

Impact du diamètre fin bout et des singularités géométriques sur les rendements au sciage

Afin de comprendre les contraintes associées à ce nouveau mode de sciage, nous avons diligencé une approche théorique de calcul du rendement matière en produit principal (sciages issus du noyau obtenu après délignage) en fonction de différentes variables : dimensions du billon (diamètre fin bout, longueur) d'une part, et non-conformités géométriques d'autre part (conicité, courbure) (Boudey et Moureaux 2012).

Pour préciser l'impact relatif de ces différentes variables, ce rendement matière théorique en produit principal est calculé en deux étapes (figure 11) :

1. le rendement en surface au niveau du plan de débit, c'est-à-dire le rapport (en pourcentage) de la surface cumulée des sections des sciages principaux sur la section fin bout de la grume.
2. le rendement matière en volume selon la longueur du débit, en tenant compte du défilement (augmentation de la section de grume) et de la courbure de la grume.

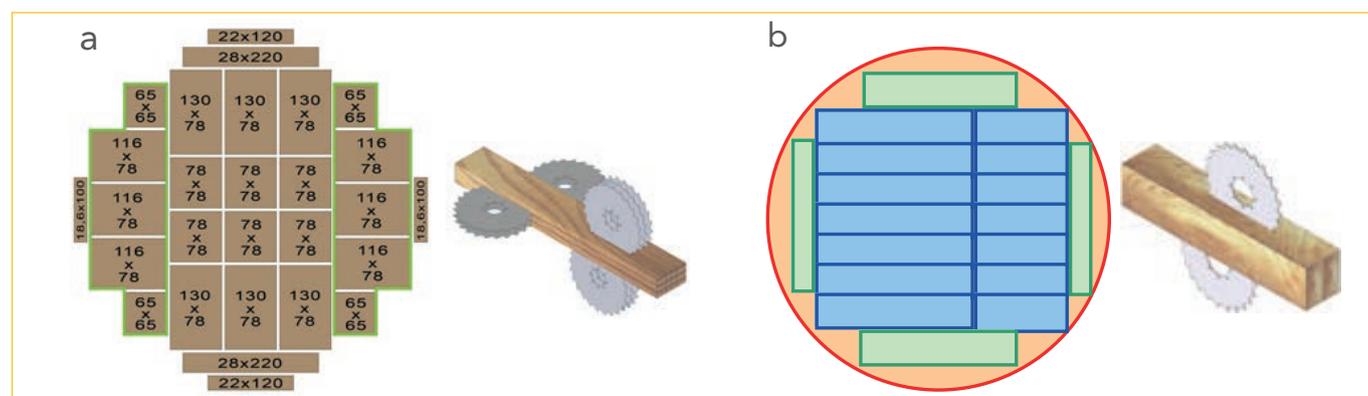


Fig. 10 : exemples de plan de débit mono-noyau complexe, adapté aux gros diamètres (a) et plan de débit multi-noyau (b) - Source : Constructeur LINCK

a) le noyau équarri fait l'objet d'une refente au moyen d'une combinaison de scies circulaires horizontales et de reprise
b) après le délignage et l'extraction des planches de rives, le cœur équarri est fendu en 2 noyaux qui sont ensuite soit transformés sur 2 lignes « filles » parallèles (ce qui autorise 2 sections principales), soit remis successivement sur la ligne principale (ce qui ne permet qu'une seule section principale).

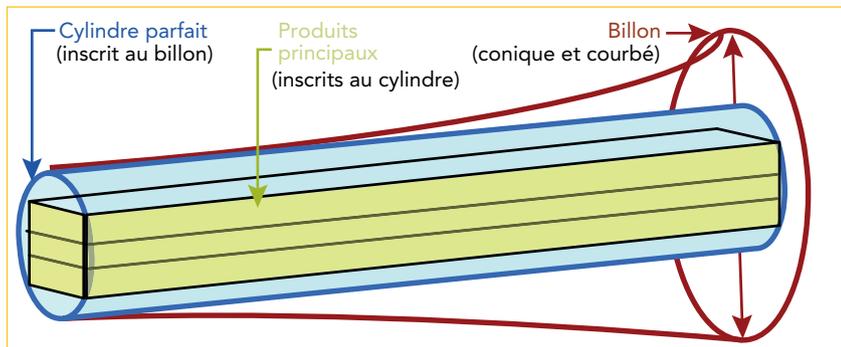


Fig. 11 : schéma explicitant le calcul du rendement matière théorique en produit principal

Le rendement en surface est le rapport de la surface des sections des sciages (jaune) sur la section du cylindre inscrit (bleu).

Le rendement matière en produit principal est le rapport du volume des sciages (jaune) sur le volume du billon; il dépend de la conicité et de la courbure du billon.

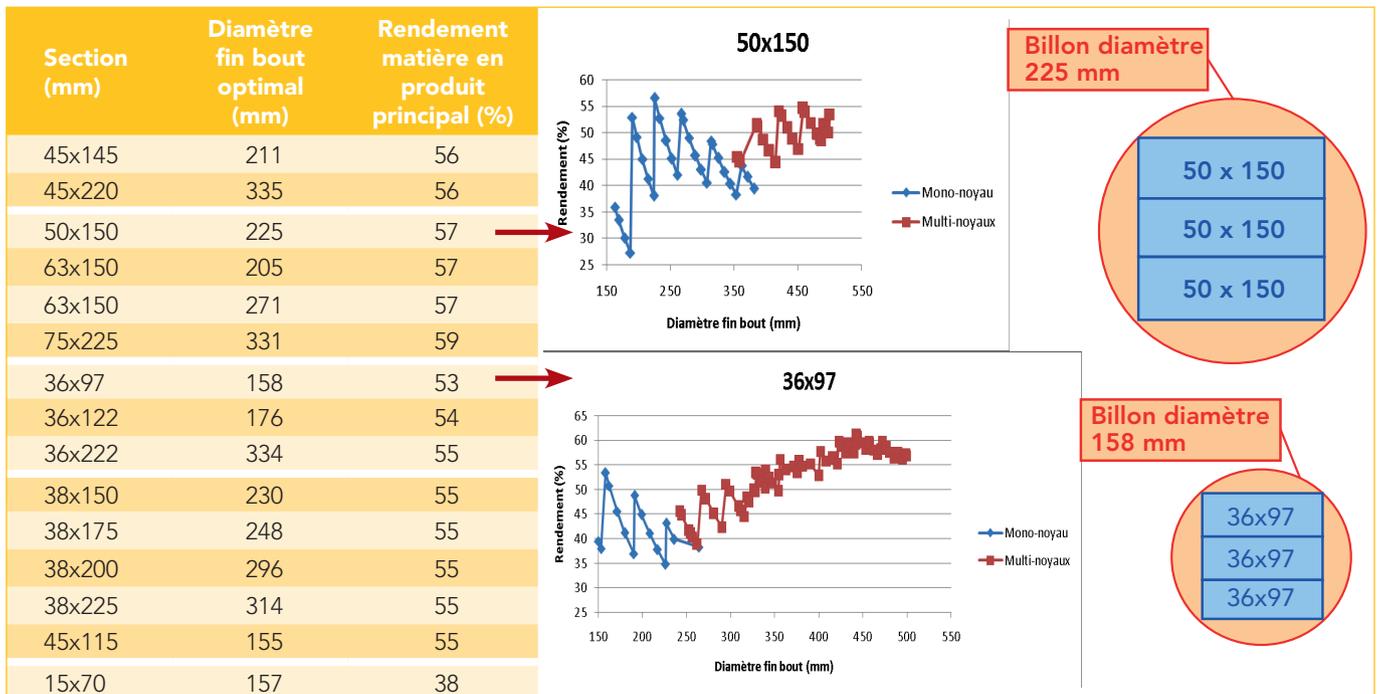


Fig. 12 : diamètre optimal et rendement en produit principal associé pour les sections de sciages résineux les plus courantes (hypothèses : cylindre parfait, débit mono-noyau) ; l'évolution de ce rendement en fonction du diamètre du billon (max. 500 mm) est illustrée pour les débits de section 50x150 (bastaing) et 36x97 (fermette industrielle)

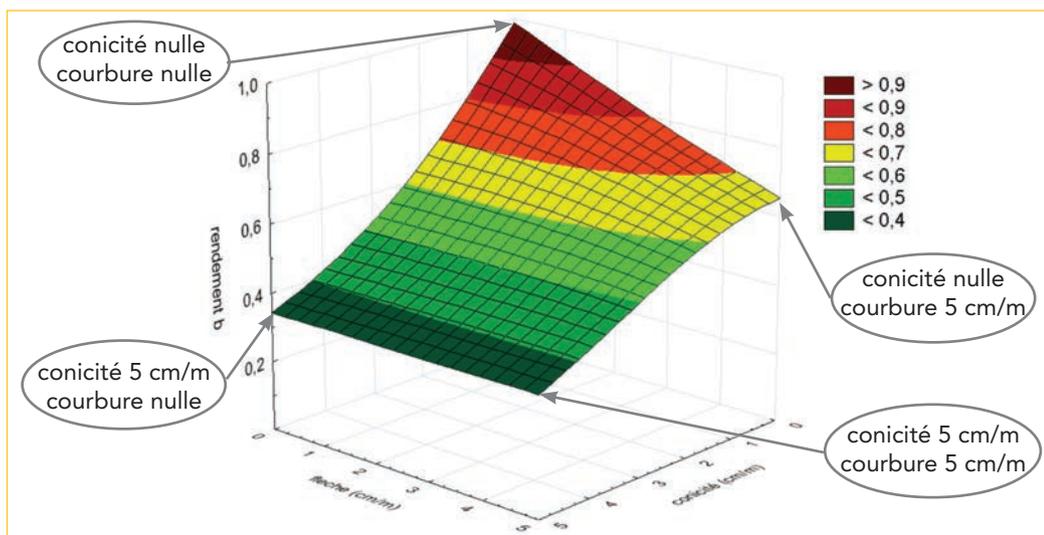


Fig. 13 : surface de réponse en 3D du rendement volume de transformation d'un billon en fonction de sa conicité et de sa flèche pour l'obtention d'un cylindre parfait de 211 mm de diamètre sur 5 m de long. On remarquera l'effet négligeable de la courbure à partir de 3 cm/m de conicité.

Influence du diamètre « fin bout » sur le rendement matière au niveau du plan de débit

Au niveau d'une section fin bout, les plans de débits théoriques ont été optimisés à l'aide d'un logiciel de simulation développé au laboratoire bois d'Arts et Métiers Cluny (logiciel Optim 3000). En faisant varier le diamètre du billon de 150 à 550 mm, le logiciel calcule le meilleur rendement matière en agençant un nombre maximal de produits dans la section d'un billon supposé ici parfaitement cylindrique. Ce calcul est opéré sous l'hypothèse d'une seule section de produit principal. Pour un produit donné, le diamètre de cylindre qui permet le meilleur rendement matière en produit principal peut donc être estimé. Ce travail a été réalisé pour toutes les sections standard de sciages résineux.

Dans ce premier calcul théorique, ce rendement matière est calculé pour un ou plusieurs noyaux. La figure 12 donne l'exemple pour 2 produits :

- la section 50x 150 utilisée en charpente traditionnelle et ossature bois,
- la section 36x 97 (fermette) utilisée en charpente industrielle.

Dans le premier cas, le diamètre fin bout optimal théorique est de 225 mm pour un rendement matière théorique de 57 %, avec un plan de débit mono-noyau. Dans le second

cas, le diamètre fin bout optimal théorique est de l'ordre de 440 mm pour un rendement théorique de 60 % avec un plan de débit multi-noyaux; il est de 158 mm pour un rendement maximal théorique de 53 % pour un débit en mono-noyau. À l'examen du tableau qui récapitule les meilleurs résultats en débit mono-noyau (figure 12), on comprend que la plage de diamètre fin bout 150 mm - 350 mm est suffisante pour obtenir, avec un rendement matière en produit principal optimisé, la majorité des sections attendues par le marché.

Incidence du défilement et de la courbure sur le rendement volume en interaction avec la longueur

Une fois le diamètre fin bout optimal identifié, il faut intégrer les singularités géométriques du billon pour calculer le rendement matière en volume lié aux écarts à la cylindricité de ce billon. Les étudiants d'Arts et Métiers ParisTech - Cluny ont développé à cet effet un outil permettant de déterminer, pour un diamètre théorique fin bout (diamètre du cylindre inscrit) donné :

- le diamètre gros bout du billon en fonction de la courbure du billon, de sa conicité, et de sa longueur,
- le rendement matière associé au billon pour chacune des valeurs combinées de ces paramètres.

Cet outil a permis l'exploration théorique de l'influence relative de ces 3 paramètres (courbure, conicité et longueur du billon transformé) sur le rendement matière en produit principal (hors récupération de produits de rive) du billon (sciage rectiligne). Il s'en dégage trois conclusions principales (figures 13 et 14) :

- considérées isolément, la conicité a une forte incidence sur la perte de rendement matière et la courbure a un effet moindre mais non négligeable lorsque la conicité est faible;
- l'incidence de la conicité est prépondérante sur celle-là courbure, au point de l'effacer dès que la conicité dépasse 3 cm/m;
- l'augmentation de la longueur du billon aggrave l'effet de la conicité et de la courbure : le transformateur a donc évidemment intérêt, pour optimiser son rendement matière, à billonner plus court des grumes affectées d'une plus forte conicité et/ou courbure.

La figure 13 illustre par une « surface de réponse » le rendement en volume théorique de transformation d'un billon en un cylindre parfait de 211 mm de diamètre sur 5 m de long, selon sa conicité et de sa courbure (flèche) :

- pour une flèche nulle, la perte de volume atteint 65 % pour 5 cm/m de conicité
- à l'opposé, pour une conicité nulle la perte de volume n'est « que » de l'ordre de 35 % pour 5 cm de flèche
- à partir de 3 cm/m de conicité, la courbure devient quasiment sans effet sur la perte de rendement matière, même à 5 cm/m.

La figure 14 explicite l'effet de la longueur sur la perte de matière pour différentes valeurs de conicité/courbure.

Au final, le rendement matière en produit principal de la transformation d'un billon est le produit arithmétique :

- du rapport du volume cumulé de sciages extraits sur le volume du cylindre parfait inscrivant les sciages
- et du rapport du volume du cylindre inscrit sur le volume réel du billon.

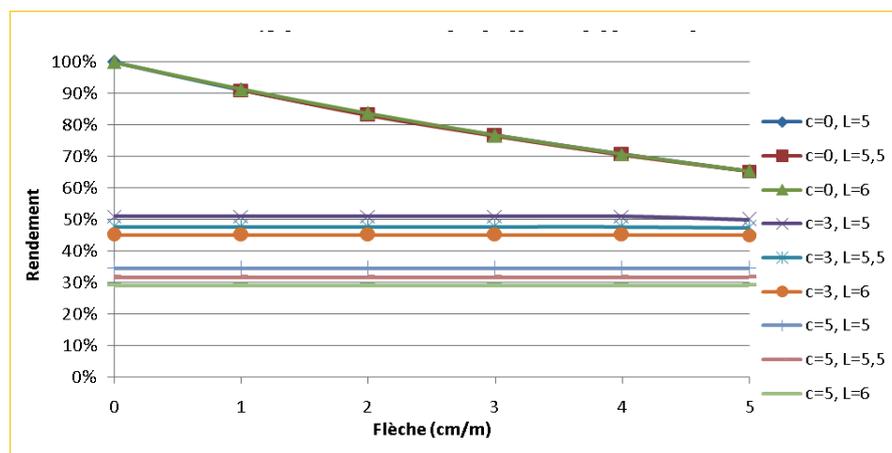


Fig. 14 : rendement matière théorique en volume (du billon au cylindre parfait) en fonction de la courbure (flèche) et de la conicité (défilement nul, 3 cm/m ou 5 cm/m) pour 3 longueurs de billon différentes

Conséquences pour les transformateurs

Cette approche théorique aura donc permis de mieux comprendre les exigences des transformateurs équipés de lignes de profilage de type canter-circulaires vis-à-vis des caractéristiques dimensionnelles des bois transformés. En matière de **diamètre des billons** : à moins d'être équipés d'outils de transformation multi-noyaux, les rendements matière sont optimisés pour des petits diamètres de billons, ne dépassant pas 350 mm fin bout pour l'obtention des sections standard les plus courantes. En matière de **longueurs** : billonner par eux-mêmes les grumes leur permet d'ajuster les découpes, non seulement aux longueurs commandées par les clients, mais aussi - et probablement surtout - aux diamètres fin bout qui leur permettent d'optimiser les rendements matière pour les sections les plus demandées. En matière de **singularités géométriques** principales ; le défilement apparaît clairement comme un facteur prépondérant du rendement matière, surtout lors de transformation en grande longueur, ce qui explique les seuils de tolérance - globalement faibles - fixés dans les contrats d'approvisionnement qu'ils négocient avec l'ONF (et les disparités d'exigences entre transformateurs selon leurs spécialités).

Les méthodes et normes de classement mécanique des sciages

La valorisation d'une grume en bois d'oeuvre permet d'en espérer un prix de vente de l'ordre du double de celui d'une destination « trituration ». Or pour les essences résineuses, nous l'avons vu plus haut, l'utilisation en structure est l'un des débouchés bois d'oeuvre les plus larges et prometteurs. À condition bien sûr de satisfaire aux exigences mécaniques des usages en question.

Résistance mécanique des sciages : une nécessaire normalisation du classement

Or la qualité mécanique du matériau bois est extrêmement variable et sous l'influence de multiples paramètres : essence, origine génétique, conditions de croissance, variabilité individuelle, variabilité selon la position dans la grume, etc. Par ailleurs, les procédés de transformation (de la grume au sciage) interfèrent avec cette variabilité de « structure interne » du bois (selon l'angle de tranchage des fibres). De ce fait, la variabilité des performances mécaniques des sciages est sensiblement supérieure à celle des bois ronds, avec des écarts pouvant atteindre un facteur 10 pour deux sciages issus d'une même grume !

D'où la nécessité (et même l'obligation depuis janvier 2012, au titre du marquage CE) d'une évaluation normalisée des propriétés mécaniques des sciages (classement pour la résistance mécanique) pour garantir qu'elles correspondent à l'utilisation prévue, et en particulier que les propriétés de résistance et de rigidité, caractérisées par les valeurs de module de résistance à la rupture (MOR), module d'élasticité (MOE) et masse volumique (MV) sont fiables. On notera que si les 2 derniers paramètres peuvent être appréhendés par des méthodes non destructives, la résistance à la rupture ne peut être déterminée qu'indirectement.

En France il existe deux méthodes normalisées de classement pour la résistance mécanique (EN 14081-1) :

- la méthode « visuelle » (d'après la norme NF B 52-001-1 pour les bois français) qui repose sur une évaluation de critères visuels (principalement diamètre et surface des noeuds et largeur de cernes) et distingue 4 classes : ST-I, ST-II, ST-III et ST-IV pour les résineux ;
- la méthode par machine (d'après les normes EN 14 081 2-4), qui par une mesure non destructive détermine les caractéristiques mécaniques et

produit directement les classes de résistance : C40, C35, C30, C27, C24, C18 et C14 (pour les résineux), par référence à la pression à exercer en flexion pour casser la pièce.

Les correspondances entre les catégories visuelles et les classes mécaniques (norme EN 338), et les propriétés du bois sont résumées au tableau (figure) 15.

Classement mécanique par méthode visuelle

Le classement visuel ne nécessite aucun équipement spécifique mais il souffre de plusieurs limites : il ne permet pas de classement au-delà de la qualité ST-I (requis pour certains usages) ; il requiert l'observation exhaustive des pièces (temps minimal incompressible) par des opérateurs qualifiés (répétitivité + pénibilité) ; enfin, il conduit à déclasser une forte proportion des pièces par rapport à leur potentiel réel. Ceci est dû principalement aux faibles corrélations entre les défauts et singularités du bois observables à l'oeil, et les performances mécaniques des sciages.

Plusieurs études conduites sur la ressource française (Lanvin *et al.* 2006, Roblot *et al.* 2008) soulignent en effet l'écart considérable entre la classe de résistance déterminée par la méthode visuelle et les performances mécaniques réelles des produits. Et cette sous-estimation apparaît générale pour la plupart des essences résineuses utilisées en structure. On peut citer deux exemples flagrants de cet écart d'après les études FCBA (figure 16) :

- pour le sapin et l'épicéa, sur environ 4500 pièces évaluées, plus de 85 % pourraient théoriquement (classement optimal obtenu par méthode destructive) être classées en C30, et seulement 3 % mériteraient d'être rejetées (classement < C18) tandis que le classement visuel ne permet d'identifier que moins de 18 % en ST-I (équivalent C30) et rejette 23 % des pièces !
- pour le douglas, sur un échantillon

de près de 4400 pièces, 73 % d'entre elles sont de qualité potentielle C30 et seules 5 % méritent d'être rejetées, alors que le classement visuel n'en retient que 7 % en ST-I et en exclut 32 % !

Mais, bien que ce procédé soit très disqualifiant quant au potentiel mécanique réel de la ressource française, plus de 95 % des sciages français sont encore classés mécaniquement par la méthode visuelle...

Classement mécanique par machine

Par rapport au classement visuel, le classement machine permet déjà de très substantiels gains de rendement, au sens de la capacité à extraire le maximum de pièces de caractéristiques acceptables pour des usages structurels (figure 16) : le gain obtenu est de l'ordre du double !

Les premières machines de classement étaient principalement des « machines de flexion » (détermination du module d'élasticité moyen en flexion) mais, face à l'exigence accrue d'assurance qualité et à l'essor de la demande en bois de structure, de nouvelles machines ont vu le jour : plus efficaces et plus fiables dans leur prédiction de classement, elles s'appuient principalement sur des méthodes vibratoires, plus rarement sur les ultrasons ou les rayons X. Toutefois ces machines sont d'un coût élevé, et en France peu d'industriels ont fait le pas de cet investissement : si 13 modèles sont actuellement homologués en France, on ne compte actuellement que 7 unités en service !

Qu'en est-il de la ressource française vis-à-vis de ces exigences de défilement et de qualité ?

Quelques éléments de réponse concernant le défilement

Les données de cubage de l'Inventaire forestier national (IFN) permettent d'appréhender l'ordre de grandeur du défilement des résineux

Extrait de la norme EN 338					
Classes visuelles	Classes de résistance mécanique	Principaux emplois	MOR (MPa) 5 %	MOE (GPa) moyen	MV (kg/m ³) 5 %
Pas d'équivalent	C 40	Lamellé collé haute performance (longue portée, faible section...)	40	14	420
	C 35		35	13	400
ST-I	C 30 ou C 27	Lamellé collé	30	12	380
ST-II	C 24	Charpente industrielle	24	11	350
ST-III	C 18	Charpente traditionnelle	18	9	320
ST-IV	C 14 (Pins uniquement)	Charpente traditionnelle	14	7	290

Fig. 15 : correspondance entre les catégories visuelles et classes de résistance mécanique pour l'usage des résineux en structure (extrait de la Norme EN 338)

MOR : contrainte à la rupture en flexion.

MOE : module d'élasticité ; il caractérise la raideur du matériau ; plus il est élevé plus la pièce est rigide.

MV : masse volumique ; elle conditionne la capacité d'une pièce à ne pas se comprimer. Plus ces propriétés sont élevées, plus la pièce est résistante et utilisable sous de fortes contraintes mécaniques.

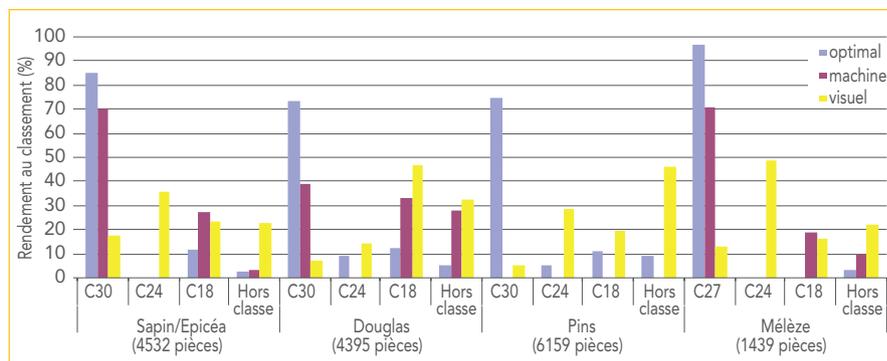


Fig. 16 : rendements comparés du classement mécanique des principales essences résineuses françaises utilisées en structure, selon les méthodes optimale (bois « cassés »), machine et visuelle - Source : Lanvin et Féart 2013
NB : il n'existe pas encore de machine homologuée pour le classement des pins en France

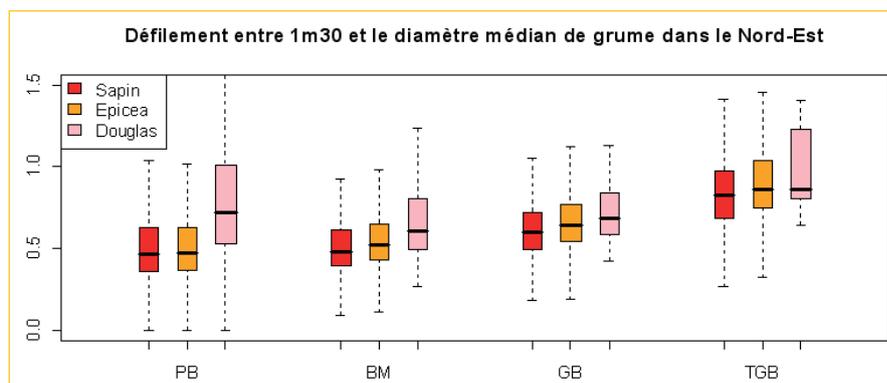


Fig. 17 : défilement moyen (= décroissance métrique, en cm/m) observé par catégorie de grosseur pour le sapin, l'épicéa et le douglas dans les cubages IFN du Nord Est (avant 1983)

entre le niveau à 1,30 m et le diamètre médian de la grume. Nous avons fait l'exercice sur les peuplements du Nord Est (figure 17, données antérieures à 1983), globalement pour les 3 essences épicéa, sapin et douglas, le défilement moyen calculé augmente progressivement avec la classe de diamètre, passant de 0,5 cm/m pour les petits bois (PB, diamètre < 25 cm) à moins de 0,8 cm pour les très gros bois (TGB, diam. > 55 cm).

Le comportement du douglas est un peu différent : toutes catégories de diamètre confondues sa conicité est un peu plus élevée que celle du sapin et de l'épicéa (sauf peut-être pour les TGB). Et d'autre part les PB apparaissent plus coniques que la catégorie BM (et peut-être même que les GB). Il faut peut-être mettre en cause des facteurs sylvicoles (densités juvéniles, provenances...); nous y reviendrons en troisième partie.

En moyenne, la conicité de la ressource se situerait donc à un niveau acceptable pour le transformateur : moins de 1 cm/m soit théoriquement moins de 20 % de perte de rendement en volume pour passer du billon au cylindre « inscrit », comme à la transformation sur une ligne canter. On rappellera toutefois que la conicité des grumes est maximale à la « patte », donc en dessous du niveau 1,30 m; la perte de rendement matière liée à la conicité est donc en moyenne un peu plus importante sur les « billes de pied ». On retiendra aussi que cette conicité est globalement plus réduite pour les petits bois (sauf pour le douglas) et bois moyens, ce qui constitue donc un avantage sur le plan du rendement matière en produits principaux lors de la transformation sur une ligne de profilage de type canter circulaire.

Quelle qualité mécanique moyenne pour la ressource française ?

Plus de 20 ans de recherche de FCBA, en partenariat avec les acteurs de la filière, et plus particulièrement

le programme de caractérisation technologique « BOIS FRANÇAIS » (Florentin et Guinard 2004), ont permis d'évaluer et de préciser les performances mécaniques moyennes de la ressource française.

Les conditions pédoclimatiques des forêts de production de notre pays sont très variées, et globalement plus favorables à la croissance des arbres que dans les pays du Nord de l'Europe. Il en résulte indéniablement une plus forte hétérogénéité de la ressource, et généralement des cernes en moyenne plus larges et plus irréguliers que ceux des bois du Nord, et des nœuds également plus gros (Rouger et Guinard 2005). Cette hétérogénéité des bois et ces singularités sont probablement en grande partie à l'origine de la moindre utilisation des bois français en structure, tout particulièrement en charpente industrielle et lamellés-collés (principaux produits importés).

Cependant, les études conduites (plus de 18 000 pièces analysées, mémorisées et testées mécaniquement, dont la plupart jusqu'à la rupture) ont précisément démontré que la qualité mécanique des bois français est globalement comparable à celle des bois scandinaves malgré des nœuds plus gros. La figure 16 récapitule les rendements moyens de classement mécanique pour les principales essences résineuses utilisées en construction : elle illustre clairement le niveau de qualité mécanique des bois français, au regard d'un besoin principalement en qualités C18 et C24...

Ces éléments relativisent donc les critiques de certains industriels français quant à la qualité mécanique générale de la ressource nationale; le déficit évoqué semble surtout inféodé au procédé de classement mis en œuvre, la méthode « visuelle » la pénalisant cruellement comme nous l'avons vu plus haut... Il ne faut toutefois pas négliger l'importance de l'aspect esthétique des produits

pour des usages en structure apparents, et le changement culturel considérable que peut nécessiter l'acceptation de bois plus nouveaux, tant par les transformateurs que par les utilisateurs.

Récapitulons

Nous venons d'apporter quelques éléments pour objectiver les attentes exprimées par les industriels vis-à-vis de la ressource en bois d'œuvre résineux, ce qui nous amène aux conclusions suivantes.

Sur le plan dimensionnel, la plage de diamètre fin bout 150-350 mm permet d'optimiser les rendements matière pour la plupart des sections standard du marché actuel et des tendances. En général, les bois de petits diamètres cumulent en plus les avantages :

- d'une qualité plus homogène que celle des gros bois (cernes plus réguliers, petits nœuds...),
- d'un meilleur défilement,
- d'une manutention et d'une transformation (plans de débit plus simples) plus aisées,
- et d'un moindre prix de revient rendu usine (logistique d'exploitation facilitée).

Dès lors on comprend mieux la préférence affichée pour les bois de diamètres petits à moyens qui permettent de rester concurrentiel vis-à-vis des sciages du Nord.

Les gros bois quant à eux engendrent objectivement des contraintes d'équipement, dont le surcoût semble peu rentable compte tenu de l'hétérogénéité et de la qualité moyenne de la ressource française, et au regard des produits demandés par le marché. Ils ne peuvent vraisemblablement être convenablement valorisés que :

- pour l'élaboration de pièces de charpentes de grandes sections (mais elles sont de plus en plus remplacées par des bois reconstitués...),
- s'ils sont de qualité supérieure (bois sans nœud obtenu par éla-

gage artificiel, ou a minima petits noeuds sains), pour la menuiserie (usages apparents ou nécessitant de très petites sections : tasseaux, moulures...) et la production de bardages (durabilité naturelle du duramen des douglas et mélèze) ; - pour le déroulage, en vue de la production de panneaux de contre-plaqué ou de lamibois (LVL). Mais ces marchés restent d'envergure limitée...

Sur le plan qualitatif, la ressource française est globalement plus hétérogène que celle de nos voisins

d'Europe de l'Est et du Nord, et d'une vitesse de croissance supérieure, associée à des cernes plus larges et des noeuds de plus forte dimension. En dépit de cette nodosité et de cette croissance supérieure, la qualité mécanique réelle de nos bois apparaît en moyenne comparable à celle des bois du Nord, et globalement à la hauteur des besoins de la filière sur le plan de leur résistance mécanique, mais pénalisée par la méthode de classement visuelle, encore quasi exclusive, et par les habitudes culturelles des utilisateurs.

Bruno CHOPARD
Christine DELEUZE
Didier FRANCOIS
ONF, pôle R&D Dole

Robert COLLET
Alexia BOUDEY
Tifenn MOUREAUX
Arts et Métiers ParisTech, Cluny

Philippe FENART
FCBA, délégation territoriale Nord-Est

Jean Denis LANVIN
FCBA, pôle Industries Bois
Construction, Bordeaux

III. Premiers enseignements pour le sylviculteur de résineux et perspectives pour la R&D

En dressant l'état des lieux de la ressource forestière nationale et du marché des sciages résineux nous avons mis en lumière le décalage quantitatif entre la disponibilité forestière et la demande actuelle et à venir de la filière en bois d'œuvre ; nous avons pu ensuite analyser et objectiver un certain nombre d'attentes exprimées par les premiers transformateurs industriels vis-à-vis des bois qu'ils transforment. La gestion forestière durable étant indissociable d'une filière bois en bonne santé, il est alors nécessaire pour le forestier de s'interroger sur les possibilités dont il dispose, à son échelle en tant que sylviculteur, pour tenir compte de ces besoins et de ces contraintes dans ses actes quotidiens de gestion.

Les questions sont multiples, ne serait-ce que sur la place respective des résineux et feuillus, elle-même liée par exemple aux enjeux du climat (adaptation/atténuation) et aux innovations technologiques concernant les feuillus. Mais nous nous en tiendrons ici à la question des liens entre sylviculture et qualité des bois résineux : après un exposé synthétique des connaissances déjà acquises sur les divers aspects, dimensionnels et de qualité *stricto sensu*, nous évoquerons les perspectives de recherche en cours ou en projet.

NB : nous parlerons de sylviculture au sens strict du terme : la génétique peut également avoir une incidence mais nous ne l'aborderons pas ici.

Quelques rappels sur les essences résineuses les plus utilisées en structure

Historiquement le sapin et l'épicéa sont les deux essences majeures utilisées en structure en France. L'épicéa est cependant plus recherché que le sapin, qui présente plus de défauts et nécessite plus de purges et de tris, et qui est aussi plus difficile à sécher et présente un bois moins homogène. Jusqu'à maintenant le séchage n'était pas une caractéristique de la production industrielle française, à la différence des bois importés, en raison sans doute d'une demande de bois sec encore modeste sur le marché français. Cette situation semble évoluer et les scieries s'équipent aujourd'hui de séchoirs, en utilisant les produits connexes de la scierie (écorces, sciure, copeaux) comme source d'énergie.

Ressource plus jeune, le douglas prend une part de plus en plus importante dans la construction bois du fait d'une mobilisation en hausse continue en bois moyens

et gros bois, et de sa bonne tenue mécanique (France Douglas 2012). Le douglas a un autre atout important mais qui reste insuffisamment valorisé en France (contrairement à l'Allemagne) : la durabilité de son duramen sans imprégnation. Son seul défaut résiderait dans la couleur de son bois, pour quelques utilisations spécifiques. Le pin sylvestre, les pins noirs ainsi que le mélèze, certes avec une ressource moindre pour ce dernier, sont également des essences intéressantes en raison de leur durabilité naturelle qui permet une utilisation extérieure sans traitement (bardage).

Les éléments caractéristiques de dimension et forme des bois

Le diamètre

Nous avons vu, dans la deuxième partie de ce triptyque, l'importance du diamètre fin bout d'un billon grume pour l'optimisation des rendements de sciage. Si le diamètre fin bout optimal pour les machines du type canter reste proche de 35 cm eu égard aux produits attendus, cela suppose, pour des billons de 6 m de long avec un défilement de l'ordre de 1 cm/m, que les arbres sur pied ne dépassent pas 50 cm voire 55 cm

de diamètre à 1,30 m. Les besoins actuels et futurs s'orientent donc massivement vers des bois de dimension modeste. Il faut ajouter que pour certaines billes de pied, notamment chez le sapin, l'empattement nécessite parfois, avant l'entrée dans le canter, un passage dans une machine spécifique afin de « rogner » le bois excédentaire jusqu'à 1,30 m environ.

À en juger par les nouvelles scieries récemment installées, la tendance semble établie pour longtemps, même si certains industriels tentent de trouver des solutions rentables, dans certaines conditions, pour transformer de plus gros bois (débits multinoyaux).

Par ailleurs il y a un effet négatif du diamètre sur la qualité, en particulier chez le sapin qui présente des pourritures et défauts plus nombreux sur les arbres de dimension importante, et exige donc des purges sévères dans les billes de pied; le constat vaut aussi pour l'épicéa (fomes ou *Heterobasidion annosum* (Fr.)) sur certaines stations de basse ou moyenne altitude.

Il peut y avoir des utilisations spécifiques pour les gros bois de qualité, notamment pour l'épicéa et le douglas. Par exemple, les gros bois de douglas à forte proportion de duramen et sans trace visible de branches (d'où la question de l'élagage) deviennent intéressants pour une transformation en déroulage ou autres à destination du placage, bardage, lamibois (LVL)... Toutefois ces utilisations restent des niches incapables d'absorber toute la production de gros bois voire très gros bois, surtout en ce qui concerne le sapin.

Le défilement et la position par rapport au houppier

Nous avons vu aussi que le défilement des billons influence très fortement le rendement matière au sciage, en particulier sur les lignes canter : le volume situé en dehors du cylindre inscrit au diamètre fin bout

étant fraisé. Or la conicité des bois est étroitement liée à la sylviculture, notamment à travers les densités de peuplement, les travaux de dépressage, les éclaircies, l'élagage... en fait à travers tous les facteurs qui ont une incidence sur la vitesse de remontée du houppier.

Un certain nombre de travaux (Larsson 1963, Pressler 1865 in Assman 1970, Courbet 1999) ont démontré que, pour la plupart des résineux, l'accroissement en surface terrière de la tige à un niveau de hauteur donné (empattement mis à part), est proportionnel à la masse foliaire située au-dessus (figure 18). Ceci implique :

- qu'en dessous du houppier « fonctionnel », c'est-à-dire des branches dont l'activité synthétique contribue à la croissance de l'arbre, et pas seulement à leur propre survie, l'accroissement en surface terrière est le même sur l'ensemble de la tige (sauf empatement);
- et qu'entre cette base du houppier fonctionnel et l'apex, il diminue plus ou moins linéairement jusqu'au bourgeon terminal.

Puisque le diamètre d'un arbre diminue globalement du pied vers l'apex, la première conséquence pratique de

cette loi est qu'en dessous du houppier fonctionnel, l'accroissement sur le rayon décroît progressivement du haut de la grume vers le bas, ce qui tend, cerne après cerne, à rectifier la conicité initiale jusqu'à une forme cylindrique, qui est alors conservée. Le défilement reste naturellement plus prononcé dans le houppier du fait du développement inéluctable et nécessaire des branches à ce niveau, le houppier étant le moteur de la croissance radiale. Mais on voit ici tout l'intérêt, pour obtenir un faible défilement sur la bille de pied, d'une sylviculture qui permette une remontée rapide du houppier, avec mortalité précoce des branches basses.

Les éléments caractéristiques de qualités (interne) des bois

La largeur de cerne et la texture

La station, la vigueur de l'arbre ou sa croissance en hauteur, la durée de la période de végétation, le climat et la sylviculture conditionnent entre autres la largeur de cerne; cerne où l'on distingue deux zones : le bois initial et le bois final. Le bois initial ou bois de printemps est composé de larges vaisseaux permettant une bonne circulation de la sève mais réduisant la densité; à l'inverse, le

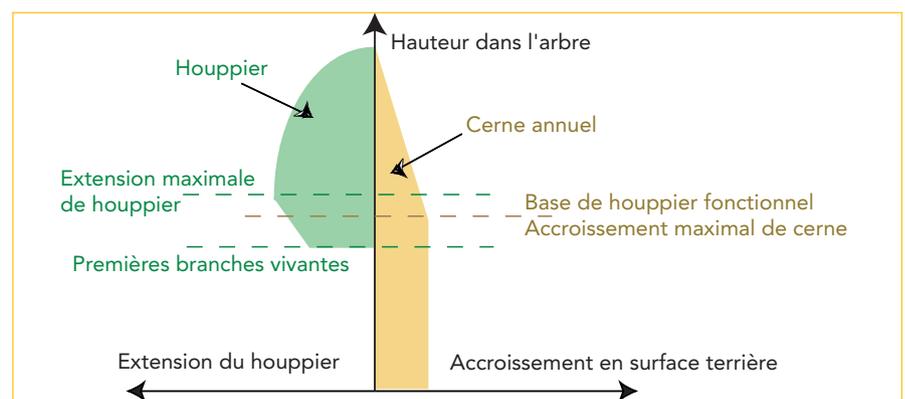


Fig. 18 : schéma de la loi dite de Pressler

« La surface d'accroissement (de cerne) quelle que soit la partie de la tige, est proportionnelle à la capacité du feuillage dans la partie supérieure de l'arbre, et ainsi est quasiment égale tout le long de la tige où il n'y a plus de branches (en deçà du houppier fonctionnel) » (traduit de Assmann 1970, reprenant les propos de Pressler 1865).

À gauche, la capacité du feuillage, en général proportionnelle à la masse ou la surface foliaire de l'arbre; à droite, à une échelle élargie, la surface de cerne annuel (= accroissement en surface terrière) le long de la tige.

Le houppier fonctionnel est la partie du houppier qui contribue à la croissance de la tige; sa base se situe entre le premier verticille vert et la zone d'extension maximale de houppier. En dessous, les branches vivantes n'assurent que leur propre maintien et croissance.

bois final ou bois d'été, constitué de vaisseaux plus étroits et à parois plus épaisses, forme un bois plus dense (figure 19). Plus le cerne est large sous l'effet du climat ou de la sylviculture, plus la proportion de bois initial augmente mais dans une moindre mesure pour le douglas.

La texture, définie par le rapport entre la largeur du bois final et la largeur du cerne, conditionne les propriétés mécaniques du bois et son aptitude à l'usinage. Un bois à cernes larges, donc à bois initial important et à texture faible, a une densité faible et en général de moins bonnes qualités mécaniques. Cependant, dans les conditions de croissance actuelles (climat et peuplement), la largeur de cernes est rarement pénalisante pour un usage des bois en structure, puisque le seuil de classement structurel par méthode visuelle est de 6 mm pour le sapin et l'épicéa et de 8 mm pour le douglas. On sait aussi qu'à largeur de cerne égale, le douglas est plus résistant mécaniquement que l'épicéa. Et que pour certaines essences comme l'épicéa, des cernes larges dans le bois adulte (voir plus loin) semblent améliorer certaines caractéristiques, comme la stabilité dimensionnelle et la rétractabilité radiale.

L'irrégularité affecte aussi les propriétés mécaniques du bois et son homogénéité ; d'où l'importance des variations climatiques annuelles et surtout de la sylviculture qui permet de contrôler les conditions de croissance des arbres par l'intermédiaire de la rotation, de l'intensité et du type d'éclaircie.

Remarque : la renommée de certains bois d'altitude (épicéa, mélèze) comme bois de structure et surtout pour des utilisations spécifiques comme le bardage est due à des cernes étroits conférés par une saison de végétation courte et des conditions stationnelles difficiles (sols superficiels) ; la sylviculture n'y joue qu'un rôle très secondaire.

Le duramen

Depuis très longtemps, les utilisateurs ont fait la différence entre duramen et aubier (figure 20 à gauche). Le duramen, dans la partie centrale de l'arbre, présente en général de bonnes qualités technologiques tandis que l'aubier est moins dense et moins coloré, encore que cette différence de coloration soit peu visible sur le sapin ou l'épicéa. La distinction est importante parce que la durabilité naturelle du duramen est bien meilleure, ce qui est particulièrement intéressant pour les usages extérieurs. L'aubier est quant à lui plus apte à l'imprégnation et ses performances mécaniques ne sont pas systématiquement plus faibles, (exemple du pin maritime : Moreau, 2010), mais il est très souvent pénalisant en raison d'une plus grande hétérogénéité soit de la couleur soit des qualités technologiques. Chez le douglas, plusieurs références montrent qu'il existe une relation de proportionnalité entre la surface d'aubier à 1,30 m et la biomasse foliaire du houppier (Grier et Waring, 1974; Long *et al.*, 1981 ; de Kort, 1993). Cette surface est stable le long de la tige en dessous des branches et donc, dans la zone où le tronc est cylindrique, l'épaisseur d'aubier est aussi constante. Chez le mélèze, réputé pour les usages extérieurs, la proportion de duramen est fonction de l'âge de l'arbre et du diamètre à 1,30 m (Pauwels, 2003). Pour le sapin et l'épicéa, il existe moins de références mais les résultats récents de Longuetaud *et al.* (2006) montrent aussi une certaine stabilité de la largeur d'aubier dans le tronc entre l'empatement et les premières branches.

Le bois juvénile (distance à la moelle) et l'âge cambial

Alors que le bois de cœur ou duramen est souvent considéré comme du bois de qualité, la notion de bois juvénile (Polge, 1964) et de bois adulte a mis en évidence, au moins pour les résineux, qu'une partie centrale du bois avait de moindres qualités technologiques. Le bois fabriqué lors



C. Deleuze, ONF

Fig. 19 : cernes sur épicéa avec bois initial et bois final (plus foncé)

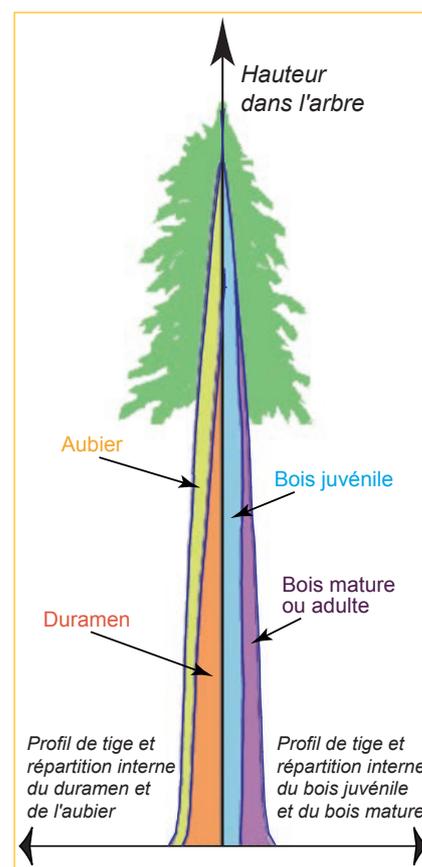


Fig. 20 : schéma de la répartition de l'aubier et du duramen (à gauche) ou du bois juvénile et du bois mature (à droite) dans une tige de résineux, par rapport à la position du houppier

dés premières années de croissance de l'arbre, durée variable selon les essences (15 à 20 ans pour l'épicéa), est composé de cernes larges, à texture faible et avec des trachéides de faible longueur. Il est aussi caractérisé par une plus forte hétérogénéité liée à la présence importante des nœuds.

L'âge de transition du bois juvénile vers le bois adulte ou bois mature est indépendant de la densité du peuplement. Certains auteurs considèrent que le bois juvénile est fabriqué dans la partie de l'arbre portant des branches vivantes et productives (houppier fonctionnel). Dans ces conditions, l'élaboration du bois juvénile est dépendante de la hauteur considérée et l'arbre continue de fabriquer du bois juvénile dans son houppier et du bois adulte dans la partie basse de l'arbre (tronc) sans branche vivante (figure 20 à droite).

Si, dans la zone de bois juvénile, le risque est important de produire des fortes largeurs de cernes (plus de 6 mm pour sapin et épicéa), il n'en va pas de même pour le bois adulte : la tendance naturelle de réduction des largeurs de cernes justifie qu'on augmente la croissance radiale à l'aide des éclaircies.

Distribution des nœuds verts adhérents et des nœuds noirs, position dans l'arbre

Tous les utilisateurs de bois résineux connaissent la part importante des nœuds dans l'évaluation de la qualité des débits. Pour les usages esthétiques, les nœuds noirs (ou morts) sont jugés plus dommageables que les nœuds vivants ou adhérents car ils occasionnent dans les débits des trous ou des pourritures très dévalorisants. Mais d'un point de vue mécanique, les deux types de nœuds sont indistinctement considérés comme des défauts affaiblissant la structure du bois. Aussi bien pour la résistance mécanique que pour l'esthétique, le nombre et la taille des nœuds sont donc des critères importants de qualité. Or ils sont directement reliés au nombre et à la taille des branches, ainsi qu'à leur état, vivantes ou mortes. Le diamètre des nœuds est légèrement plus faible que celui des branches à la fois à cause de l'écorce, que l'on ne retrouve pas dans le bois, et de la forme conique de l'insertion des nœuds dans le bois (figure 21).

La branchaison et son évolution dans le temps sont donc d'une importance capitale pour la qualité du bois. Les houppiers des résineux considérés ici sont principalement formés de couronnes de branches verticillaires, mises en place chaque année en haut des elongations annuelles de la tige (Colin et Houllier, 1991). Il peut arriver, mais seulement dans le jeune âge, qu'il y ait deux couronnes verticillaires pour une même année du fait du polycyclisme (seconde elongation de la tige dite pousse d'août). Il peut exister aussi des branches interverticillaires, en général moins nombreuses et plus petites. Pour les résineux, la vitesse de croissance en hauteur conditionne donc fortement le nombre de verticilles : plus les elongations annuelles sont fortes, moins il y a de verticilles sur une hauteur donnée. Hormis pour les arbres dominés, la croissance en hauteur dépend principalement de l'âge et de la fertilité du peuplement : l'accroissement va en augmentant dans le jeune âge (jusqu'à 20-25 ans environ) jusqu'à une phase de croissance régulière

soutenue (20-25 à 50-60 ans), après quoi l'accroissement ralentit et la hauteur du couvert se stabilise.

Si le nombre de branches dépend de la mise en place initiale des bourgeons au moment de la croissance en hauteur, leur taille ensuite est directement liée à la vigueur de l'arbre - son statut social, la concurrence avec les tiges environnantes - et donc à la densité du peuplement. Des travaux ont par exemple montré le lien très étroit, pour un arbre de hauteur donnée, entre le diamètre de plus grosse branche et le diamètre à 1,30 m (Colin et Houllier, 1991, 1992).

En l'absence d'élagage artificiel, la mortalité des branches, puis leur élagage naturel, sont fonction de la concurrence entre les tiges et donc de la densité du peuplement. L'élagage naturel de la bille de pied se fait d'autant mieux que le diamètre des branches reste modéré. La branche de diamètre maximum se situe vers la base du houppier vivant. Dans le houppier, le diamètre des



Fig. 21 : sur épicéa, nœud noir et non adhérent (à gauche, en haut), nœud sain adhérent (en bas) et coupe longitudinale d'un nœud vivant (à droite)
Remarquer l'insertion de forme conique en raison d'une augmentation du diamètre de la branche depuis le cœur vers l'écorce.

C. Deleuze, ONF

branches diminue ensuite jusqu'au sommet de l'arbre. Les branches vivantes qui subsistent en dessous de la zone maximale d'extension du houppier ne contribuent en général plus à la croissance de la tige et n'ont quasiment plus d'accroissement à leur base. Les nœuds des derniers cernes de croissance diminuent donc en descendant depuis le houppier vers le bas de la tige.

Cependant la position de la base du houppier dans les peuplements adultes ne préjuge pas de la taille des nœuds dans la partie interne de l'arbre : plus l'âge avance et le diamètre est gros, plus le bois adulte peut cacher des défauts acquis durant la phase juvénile (figure 20). Durant la phase de croissance en hauteur, les branches vivantes dépérissent plus ou moins rapidement selon la compétition, sans pour autant disparaître après leur mort. Cette « rémanence » de branches mortes sur le fût des arbres peut engendrer des défauts du bois (nœuds noirs, pourriture...) plus conséquents que des branches vivantes surtout si leur diamètre est important (> 30 mm). L'élagage naturel des branches mortes reste très tardif chez de nombreuses essences, parfois jusqu'à 50 ans pour l'épicéa et sans doute beaucoup plus pour le douglas. La chute naturelle de la branche morte est aussi fortement conditionnée par la taille qu'elle avait atteinte, le diamètre surtout ; plus ce diamètre est important, plus les branches tombent difficilement et plus la cicatrisation est longue et difficile.

On voit ici toute l'importance de la phase juvénile car c'est durant cette phase qu'est élaborée une grande partie du bois dont les caractéristiques conditionnent la qualité de la grume future : proportion de bois juvénile, hauteur de la base du houppier, diamètre des branches, même si certains défauts comme le défilement peuvent être corrigés partiellement durant la phase ultérieure de croissance.

Une intégration par démarche de modélisation : état actuel et perspectives

Le constat d'une imbrication forte des différents facteurs

Cette liste rapide des paramètres déterminants de la qualité révèle aussi les nombreuses interactions qui existent entre ces paramètres, notamment le lien étroit entre croissance en hauteur, mise en place de la branchaison et croissance radiale, avec des effets directs sur le défilement, la part de bois juvénile et de duramen. L'historique de la mise en place de la tige est essentiel à l'explication des caractéristiques du bois : L'évolution dans le temps de la base du houppier et de la nodosité conditionne la distribution et la dimension des nœuds dans la tige. Une fois les branches basses élaguées, l'empilement des cernes masque les défauts acquis si bien que la taille des nœuds visibles sur le tronc ne préjuge pas de leur dimension interne.

Cette imbrication se traduit par exemple dans les variations de la qualité, en l'occurrence la résistance mesurée par le module de rupture en flexion (MOR), au sein d'un échantillon de plus de 700 planches représentatives de la ressource sapin et épicéa du Nord-Est (figure 22). On y décèle des tendances fortes : amélioration de la qualité générale avec l'avancement des arbres vers la maturité, influence négative de la nodosité (mesurée sur la face). Mais on constate surtout une énorme variabilité autour de ces tendances. Malgré tout, la plupart des planches seraient admissibles sur ce seul critère en classe de qualité C30 sur la base d'un classement optimal.

Des modèles de croissance

Les modèles de croissance permettent d'évaluer dans le temps la production de peuplements d'une essence donnée en fonction des niveaux de fertilité ainsi que la répartition de cette production entre les tiges.

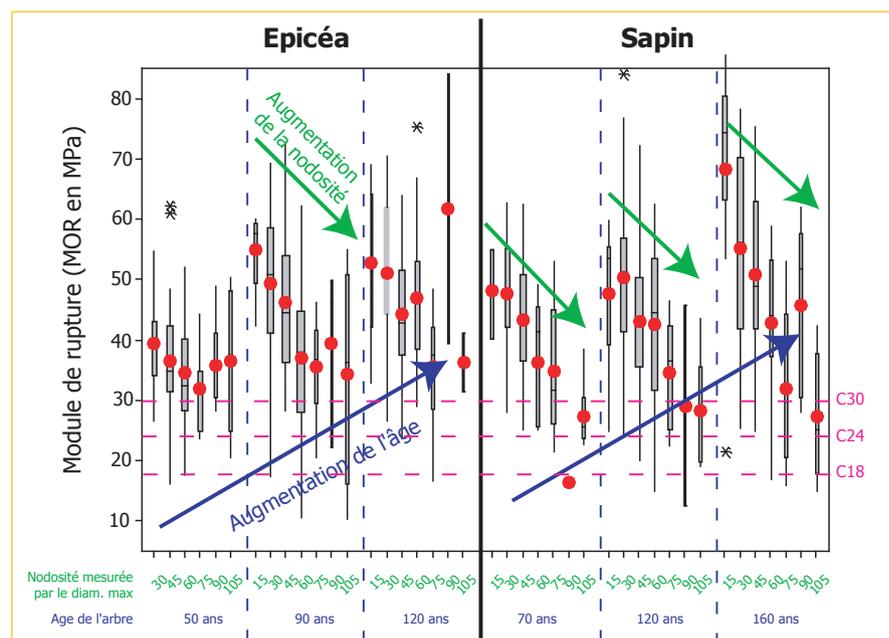


Fig. 22 : variation de la résistance mécanique (MOR) de planches standardisées issues d'épicéa à gauche et de sapin à droite, en fonction de l'âge moyen des arbres et de la nodosité des planches (mesurée par le diamètre maximal des nœuds sur la face)

Les points rouges indiquent les moyennes, les boîtes à moustache donnent les médianes et quartiles. L'étude porte sur plus de 700 planches représentatives de la ressource sapin et épicéa du Nord-Est de la France (étude FCBA pour Fibois-Alsace). Pour information, sont rappelés à droite les seuils correspondant à la norme de classement mécanique pour les usages en structure (C30, C24 et C18) sur ce critère de module de rupture.

Ils sont donc utilisés à l'ONF comme outils d'aide à la conception des guides de sylviculture, pour élaborer les itinéraires sylvicoles, adapter les niveaux de prélèvement des éclaircies, en fonction de courbes de fertilité représentatives des gammes de fertilité d'une zone donnée. Citons pour les résineux les modèles de croissance en futaie régulière : *Abial* pour le sapin dans les Vosges et le Jura (modèle INRA-LERFoB), *OASIS* pour le douglas et l'épicéa pour la France entière (modèle FCBA), *Simcop* pour le douglas France entière (modèle INRA-LERFoB). Ces modèles permettent, en faisant varier les prélèvements et les rotations, de donner en sortie et pour les stades

successifs d'éclaircies la distribution des arbres par classes de diamètres, la surface terrière, le volume, la hauteur et quelques informations de qualité, plus ou moins détaillées selon le modèle : l'évolution des largeurs de cernes à 1,30 m, un profil moyen de tige en fonction de la hauteur et de la circonférence, parfois la base de houppier.

Des modèles statiques de qualité pour reconstituer les caractéristiques de la ressource

Des modèles de qualité ont été élaborés par le LERFoB : par exemple des modèles de profils de tige, de hauteur de base de houppier, de branchaison (nombre et taille de branches : Colin

et Houllier, 1991 1992) ou encore des modèles de densité du bois en fonction de la largeur de cerne (Leban et Duchanois, 1990). Ils permettent de relier une caractéristique importante de la qualité (hauteur de base de houppier, diamètre de plus grosse branche, profil de la tige) à des grandeurs dendrométriques facilement mesurables, grandeurs individuelles (hauteur, diamètre à 1,30 m) voire de peuplement (densité, surface terrière), et à un stade donné ; ils sont donc qualifiés de statiques.

Ces différents modèles permettent de reconstituer la qualité complète d'un arbre à partir des données dendrométriques et d'âge à un moment

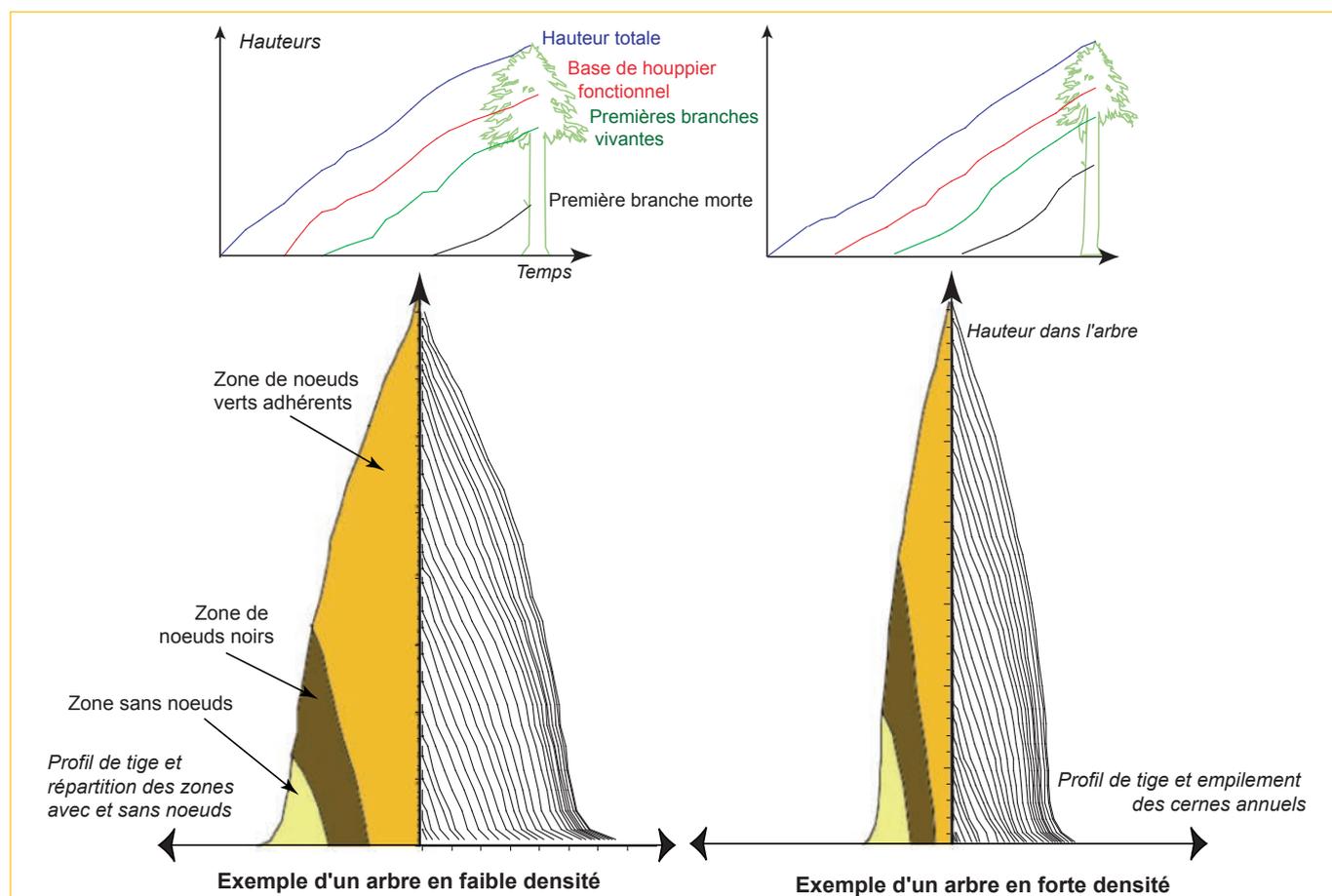


Fig. 23 : illustration librement interprétée des travaux de Houllier et al. (1995) avec des données réelles de profils de tige et de reconstitution de remontée de houppier de deux épicéas issus de plantations de densité faible (1 100 t/ha) ou forte (2 500 t/ha)

Le modèle de croissance fournit l'évolution de la hauteur totale de l'arbre (courbe bleue en haut), ainsi que celle du diamètre à 1,30 m (non représenté directement mais accessible via les empilements de cernes). Les premiers modèles de qualité retracent les remontées de houppier (houppier fonctionnel, branche verte, branche morte) en fonction des évolutions de taille (courbes rouge, verte et noire en haut). Les modèles de profils de tige permettent de décrire l'empilement des cernes en fonction des évolutions de taille (courbes noires en bas, côté droit). Enfin la combinaison des modèles de houppier et des empilements de cernes permet d'en déduire les limites de noeuds verts, noirs et la zone sans noeud de la tige (en bas, côté gauche). Cette figure illustre donc l'impact des variations de densité du peuplement sur l'élagage, la répartition entre noeuds verts adhérents et noeuds noirs, et sur le défilement.

donné : reconstitution rétrospective de la croissance en hauteur et en diamètre, puis application des modèles de qualité pour en déduire les emplacements de cernes dans la tige, la remontée du houppier, l'évolution de la taille des branches, les limites des noeuds adhérents et non-adhérents, enfin la densité.

En 1990, Leban et Duchanois ont proposé pour l'épicéa un outil intégrateur *SIMQUA* des modèles de qualité pour prédire la qualité de sciages issus d'arbres dont on connaîtrait les principales dimensions et l'âge. Cette approche a été également utilisée pour faire une évaluation de la qualité de la ressource, notamment de la qualité de douglas, à partir des données de l'inventaire forestier national (Leban *et al.*, 2005). Enfin, en 1995, Houllier, Leban et Colin ont utilisé, en entrée des modèles de qualité, les informations dendrométriques simulées par les modèles de croissance (distributions de diamètres et hauteurs d'un peuplement à un âge donné et selon la croissance passée) pour décrire la reconstitution de la qualité en fonction des simulations de la fertilité et de l'itinéraire sylvicole (figure 23).

Vers des modèles plus dynamiques pour prédire et comprendre l'évolution de qualité

Ce versant qualitatif des modèles de croissance n'a quasiment pas été utilisé jusque-là à l'ONF, et ce pour différentes raisons.

■ Les différents modules existants n'ont pas toujours le même degré de maturité de sorte qu'on ne peut pas les combiner. Par exemple le premier modèle de croissance pour l'épicéa, utilisé par Houllier *et al.* (1995) n'a pas été poursuivi par le LERFoB, tandis que pour le modèle de croissance *Abial* (sapin), les modèles de qualité ne sont pas disponibles. Il faut noter en particulier que les modèles de qualité nécessitent des mesures (hauteurs de houppier, profils de tiges, branchaison) souvent destructives, assez

finies et plus coûteuses à acquérir que les données de croissance.

■ L'utilisation des modèles de croissance est récente du côté des gestionnaires, et leur attente sur les aspects de qualité est plutôt décalée : les chercheurs ont eu peu d'écho à leurs développements dans les années 90.

■ Enfin, compte tenu des contraintes de mesures, les données de qualité restent rares et ne sont surtout disponibles pour un même arbre qu'à une date donnée. Les modèles qui en découlent permettent donc de décrire des différences moyennes de qualité entre de gros ou de petits arbres, toutes choses égales par ailleurs ; mais ils rendent moins bien compte de la dynamique de cette qualité, c'est-à-dire de l'évolution des profils de tige, ou de la taille des branches, avec les conditions de croissance. Or c'est surtout cela qui intéresse le sylviculteur pour comprendre et prédire comment son intervention peut influencer la qualité des tiges d'avenir. Le potentiel de la loi de Pressler (figure 18) indique combien cette dynamique est importante au moment d'une éclaircie, avec un impact très important sur la stagnation de la base de houppier et sur la distribution d'accroissement de cernes autour de ce niveau : les modèles statiques, reliés seulement à la taille de l'arbre, masqueront cette transition dans la formation de la tige. Finalement deux arbres de même dimension n'auront pas le même historique de croissance, de remontée de houppier et d'emplacement de cernes en fonction de l'itinéraire suivi, ce qui se répercutera sur la distribution des noeuds et donc sur la qualité dans la tige (figure 23).

Il existe des données sur la dynamique de la qualité pour certaines variables comme le profil de la tige : ce sont les analyses de tiges qui retracent les limites de cernes le long du tronc. À la demande de l'ONF, des travaux de modélisation sur le profil des cernes annuels sont en cours sur l'exemple du douglas, en revisitant les analyses de tiges

des archives de l'INRA et de FCBA. Pour appréhender la dynamique de croissance du houppier (taille des branches et évolution de la base de houppier), les données disponibles sont nettement plus rares et délicates à obtenir. Le scanner tomographique à rayon X pourrait permettre à terme d'explorer l'historique de croissance des branches, et accéder ainsi à des données dynamiques.

Quelles sont les marges de manoeuvre sylvicole sur ces paramètres de qualité ?

Si les différents facteurs sont imbriqués, le sylviculteur, lui, agit avant tout sur le houppier comme moteur de la croissance. Toute la difficulté réside dans le choix du moment et de l'intensité de son action sur ce houppier, puisque la dynamisation de la croissance de la tige passe en même temps par la dynamisation de la croissance des branches, et donc des noeuds. Il ne semble pas y avoir d'effet compensatoire ou de facteur qui puisse corriger cet inconvénient d'une branchaison plus forte pour une croissance plus forte, à l'exception de l'élagage artificiel pour en réduire partiellement l'effet sur la bille de pied. Par contre nous avons vu que le défilement pouvait notablement se corriger dès que l'élagage est obtenu et donc sur la partie de l'arbre la mieux valorisée, ce d'autant plus rapidement que la croissance est forte.

Densité des peuplements

À la lecture des différents paramètres influençant la qualité du bois, la densité des peuplements, densité de plantation entre autres, reste la variable d'ajustement permettant d'influer sur la qualité du bois produit. De nombreuses études ont montré les effets des densités de plantation sur, entre autres, la largeur du cerne, la hauteur élaguée et le diamètre des branches. Pour l'épicéa, par exemple, lorsqu'on baisse la densité de plantation on constate à l'âge de 25 ans (Delvaux, 1975 cité par Hébert, 2002) :

- une augmentation de la largeur du cerne jusqu'à dépasser, pour des plantations à 625 tiges/ha, le seuil des 6 mm ;
- une augmentation de la proportion de bois juvénile de 15 à 30 % pour respectivement 2500 et 625 tiges/ha avec 100 % dans le houppier,
- une aggravation du défilement, sur le billon de 1,30 m à 4 m de haut et pour ces mêmes densités, de 2,6 à 5 cm/m pour l'arbre moyen et de 4,6 à 6,9 cm/m pour l'arbre dominant,
- une augmentation de la taille des nœuds de 20 mm à 30 mm.

En gros, le seuil en dessous duquel la baisse de densité de plantation est préjudiciable à la qualité de l'épicéa se situe vers 1600 tiges/ha.

Compromis dans les choix sylvicoles

En l'absence d'élagage artificiel, le sylviculteur recherche un compromis permettant d'ajuster par la densité une croissance radiale satisfaisante et un bon élagage naturel (figure 24). La vitesse d'élagage et la taille des branches qui en découle déterminent en partie la qualité du bois. La densité du peuplement a un effet sur la mortalité des branches (figure 25) mais pas sur les branches mortes qui disparaissent tardivement (au delà de 50 ans) conduisant ainsi à une production de bille de pied avec de nombreux défauts parfois cachés, notamment dans les gros bois. Ceci est très visible pour une

essence comme le douglas. Par ailleurs le bois juvénile a une qualité technologique plus faible que le bois adulte, il convient donc d'en limiter le développement si possible ou plutôt d'en réduire la proportion dans le fût, c'est-à-dire durant les premières années de la vie du peuplement.

En conséquence, les peuplements nécessiteraient des densités fortes dans la phase juvénile, produisant des bois aussi bien élagués que possible, avec des branches fines et une proportion de bois juvénile faible, puis des éclaircies assez dynamiques durant la phase adulte (> 20 ans pour l'épicéa) pour augmenter la croissance radiale, moins pénalisante dans le bois adulte et éviter les fortes contraintes des peuplements capitalisés, comme l'instabilité face aux aléas. Ceci aurait toutefois l'inconvénient d'une discontinuité dans la régularité des cernes, paramètre à prendre en compte dans la décision du stade de la première éclaircie mais aussi dans la rotation des éclaircies et le rythme des récoltes. L'âge de différenciation entre bois juvénile et bois adulte, variable selon les essences, est, de fait, d'une grande importance dans la décision sylvicole du stade de la première éclaircie. Si ces trajectoires sylvicoles permettent par ailleurs d'optimiser la production juvénile des peuplements en réduisant la part du bois juvénile, la contrepartie principale en est une

moindre croissance radiale individuelle des tiges durant cette phase et un houppier fonctionnel moins important, avec toutes les conséquences qui en découlent comme par exemple une plus grande sensibilité au vent ou à la neige. Enfin, si une forte densité dans le jeune âge n'est généralement pas une préoccupation dans les peuplements régénérés naturellement, il n'en va pas de même dans les plantations où cela nécessite des coûts d'installation importants : l'ajustement des densités de plantation doit bien entendu chercher à limiter les coûts mais sans compromettre les qualités technologiques du bois de chaque essence souhaitée.

Élagage artificiel

L'élagage artificiel des branches mortes permet de fixer volontairement la base du houppier, et de contrôler ainsi le défilement sur la partie de la grume élaguée, quelle que soit la trajectoire sylvicole choisie (densité de plantation, dépressages, éclaircies...). Toutefois l'élagage des branches vivantes d'une partie du houppier fonctionnel ne doit pas trop entamer le potentiel de croissance de l'arbre. Cette option n'est pas à exclure définitivement, notamment pour une essence comme le douglas, même si la tendance actuelle est de minimiser les investissements forestiers.



Fig. 24 : peuplements de douglas âgé de 39 ans avec éclaircies (à gauche) et sans éclaircie (à droite) en forêt domaniale du Grison (71), dispositif de la coopérative de données sylvicoles «Douglas»

Conclusions et perspectives

Le besoin important des industries en billons de faible diamètre, notamment pour fournir les produits de sections plus faibles attendus en structure, met en lumière les défauts qualitatifs du bois : le défilement, la nodosité ou le bois juvénile sont non seulement bien plus visibles mais aussi plus dévalorisants car ils sont proportionnellement plus importants dans des petits billons. Il semble donc judicieux de maintenir dans les jeunes peuplements des densités contribuant à réduire au mieux la proportion de bois juvénile et induire un élagage naturel soutenu, puis d'activer sensiblement la croissance radiale du bois adulte dans les peuplements plus âgés à l'aide des éclaircies. D'autres itinéraires sont également envisagés (FCBA), comme des itinéraires dédiés à la production de petits bois avec des révolutions courtes : l'idée est de répondre rapidement, du moins en partie, à la forte demande actuelle en ce type de produits sans trop exposer les peuplements aux risques de chablis.

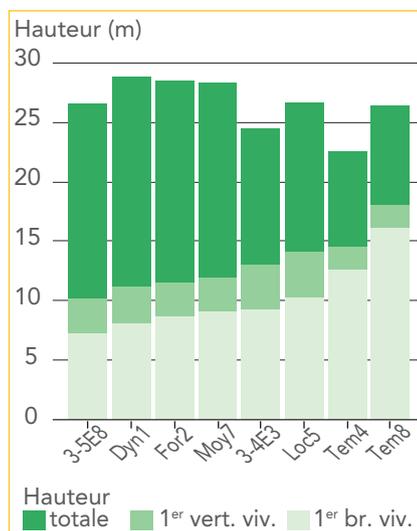


Fig. 25 : exemple de l'effet d'itinéraires sylvicoles différenciés sur la hauteur du 1^{er} verticille vivant et de la 1^{ère} branche vivante (FD du Grison (71) – Dispositif de la coopérative de données sylvicoles «Douglas»).

L'intensité des éclaircies pratiquées est croissante de droite (situations témoin sans éclaircie) à gauche.

Cependant un abaissement trop important des diamètres de récolte conduirait à une diminution de la proportion de bois de qualité en raison d'une proportion plus forte de bois juvénile. À l'inverse, les nombreux défauts dus au vieillissement des très gros bois pénalisent aussi fortement la qualité et il n'est donc pas raisonnable, du point de vue de la production de bois, de maintenir des bois de gros diamètres, dont la qualité a de forts risques de se détériorer.

D'une façon générale, le sylviculteur soucieux de gestion durable -et de multifonctionnalité- est amené à rechercher des compromis difficiles entre des impératifs multiples et parfois contradictoires mais qui peuvent donner lieu à des itinéraires complémentaires. La modélisation est un outil intégrateur pour affiner les constats et appréhender les effets des itinéraires sylvicoles sur la qualité du bois. Certains modèles de qualité pourraient permettre déjà de donner des indications mais ils restent actuellement plutôt statiques alors qu'il faudrait des modèles plus dynamiques prenant en compte l'évolution dans le temps de la base du houppier fonctionnel et donc de l'élagage dans la phase juvénile.

Par ailleurs, nous n'avons pas du tout abordé l'effet des mélanges et des structures hétérogènes sur la qualité. Ces questions sont d'une infinie complexité, et les recherches actuelles portent surtout sur la gestion de certains types de mélanges. Des études récentes (Vallet et Pérot, 2011) ont démontré une meilleure productivité pour certaines essences lorsqu'elles sont conduites en peuplement mélangé (sapin et épicéa, pin et chêne). Les travaux sont donc en cours sur le comportement de mélanges d'essences et sur la croissance (sapin et épicéa, douglas et mélèze, douglas et hêtre) mais les impacts sur la qualité nécessiteront des approches complémentaires dans un second temps.

Enfin cet article s'est concentré sur les aspects de qualité des résineux pour une utilisation en structure, dans la mesure où la construction bois est un secteur majeur appelé à un développement important dans les décennies à venir, eu égard notamment aux enjeux du changement climatique. Mais il ne faut pas perdre de vue que, plus généralement, les usages du bois évoluent fortement et que, à côté des débouchés de masse, d'autres possibilités commencent à émerger (bois reconstitués, industries pharmaceutiques, chimie du bois...).

Didier FRANÇOIS

Bruno CHOPARD

Christine DELEUZE

ONF, pôle R&D Dole

Jean Denis LANVIN

FCBA, pôle Industries Bois

Construction, Bordeaux

Philippe FENART

FCBA, délégation territoriale Nord-Est

Bibliographie

Pour les parties 1 et 2

Agreste, 2012. Récoltes de bois d'œuvre et de bois d'industrie en France de 2002 à 2010. <http://agreste.agriculture.gouv.fr> (rubrique : Bois et forêts - Récolte de bois, production de sciages)

Agreste, 2012. Enquêtes annuelles de branches. <http://agreste.agriculture.gouv.fr> (Rubrique : Bois et forêts - Exploitations forestières, entreprises de sciages)

Boudey A., Moureaux T., 2012. Caractérisation de la demande industrielle en résineux/optimisation de la gestion forestière. Rapport de PJE /Filière Bois Arts et Métiers ParisTech. 84 p.

Chalayer M., 2012. La scierie suédoise, un acteur discret mais efficace. Le Bois International n° 33 - Octobre 2012, pp. 12-14

FBF, 2012. Observatoire National de la Construction Bois - France Bois Forêt. 8 p.

FCBA, 2012. Memento de l'Institut Technologique Forêt, Cellulose, Bois-Construction, Ameublement. Paris. 42 p.

- Florentin G.H., Guinard D., 2004. Vingt ans d'actions sur le classement des bois français : des résultats concrets pour valoriser les grumes et sciages issus de la forêt française. *Revue Forestière Française* vol. LVI numéro spécial, pp. 185-193
- IGN, 2012. La Forêt en chiffres et en cartes. Campagnes d'inventaires 2007 à 2011. Paris. 42p.
- Lanvin J.D., Chatelu R., Godard J., Reuling D., Ferron J.L., 2006. Douglas français et classement du bois. *Forêt-Entreprise* n° 171 pp. 59-64
- Lanvin J.D., Fénart P. 2013. Valorisation des résineux français - Qualité des Bois. Rapport d'étude interne pour l'ONF. Réf. LBO/JDL/MP/403/13/069 du 11.02.2013. FCBA.
- Lochu S., 2012. Le marché français des sciages en 2010. Observatoire Économique de France Bois Forêt.
- Roblot G., Coudegnat D., Bleron L., Collet R., 2008. Evaluation of the visual stress grading standard on French Spruce (*Picea excelsa*) and Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) sawntimber. *Annals of Forest Science* Vol. 65 n° 8 p.812
- Rouger F., Guinard D., 2005. Les bois scandinaves sont ils supérieurs aux bois français ? Quelle est la réalité ? *Revue Forestière Française* vol. LVII n° 1 pp. 85-94
- Roy C. et Magrum M., 2012. Meilleure valorisation de la ressource forestière sous forme de sciages. Rapport CGAER n° 10156. 77 p.
- Pour la partie 3**
- Assman E., 1970. The principles of forest yield study. *Studies in the Organic Production, Structure, Increment and Yield of Forest Stands*. Oxford (UK), New York (USA) : Pergamon Press. 506 p.
- Colin F., Houllier F., 1991. Branchiness of Norway spruce in north-eastern France: modelling vertical trends in maximum nodal branch size. *Annales des Sciences Forestières* 48, n° 6 pp. 679-693
- Colin F., Houllier F., 1992. Branchiness of Norway spruce in northeastern France: predicting the main crown characteristics from usual tree measurements. *Annales des Sciences Forestières* 49, n° 5 pp. 511-538
- Colin F., Houllier F., Leban J.M., Nepveu G., 1992. Modélisation de la croissance des arbres, des peuplements, et de la qualité des bois. *Revue Forestière Française* 44, n° 3 pp. 248-254
- Courbet F., 1999. A three-segmented model for the vertical distribution of annual ring area: Application to *Cedrus atlantica* Manetti. *Forest Ecology and Management* vol. 119, n° 1-3 pp. 177-194
- De Kort I. 1993. Relationships Between Sapwood Amount, Latewood Percentage, Moisture Content and Crown Vitality of Douglas Fir, *Pseudotsuga Menziesii*. *IAWA Journal* 14, n° 4 pp. 413-427
- France Douglas, 2012. Le Douglas, un choix naturel pour la construction. 25p.
- Grier C.C., Waring R.H. 1974. Conifer Foliage Mass Related to Sapwood Area. *Forest Science* vol. 20, n° 3 pp. 205-206
- Hébert J., Herman M., Jouret B., 2002. Sylviculture et qualité du bois de l'épicéa en Région Wallonne. 157 p. Forêt wallone, Belgique.
- Hein S., Weiskittel A.R., Kohnle U., 2008. Effect of wide spacing on tree growth, branch and sapwood properties of young Douglas-fir [*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco] in south-western Germany. *European Journal of Forest Research* vol. 127, n° 6 pp. 481-493
- Houllier F., Leban J.M., Colin F. 1995. Linking growth modelling to timber quality assessment for Norway spruce. *Forest Ecology and Management* vol. 74, n° 1-3 pp. 91-102
- Larson P.R., 1963. Stem Form Development of Forest Trees. *Forest Science* vol. 9, n° Supplement 5
- Leban J.M., Houllier F., Goy B., Colin F., 1991. La qualité du bois d'épicéa commun en liaison avec les conditions de croissance. *Forêt-entreprise* n° 80 pp. 13-23, 26-27
- Leban J.M., Duchanois G., 1990. SIMQUA : un logiciel de simulation de la qualité du bois. *Annales des Sciences Forestières* n° 5 pp. 483-493
- Leban J.M., Daquitaine R., Ottorini J.M., Pignard G., 2005. Méthodes d'évaluation de la qualité du douglas de la ressource forestière. *Forêt-entreprise* n° 163 pp. 50-54
- Long J.N., Smith F.W., Scott D.R.M. 1981. The role of Douglas-fir stem sapwood and heartwood in the mechanical and physiological support of crowns and development of stem form. *Canadian Journal of Forest Research* vol. 11, n° 3 pp. 459-464
- Longuetaud F., Mothe F., Leban J.M., Mäkelä A. 2006. *Picea abies* sapwood width: Variations within and between trees. *Scandinavian Journal of Forest Research* vol.21, n° 1 pp. 41-53
- Moreau J., 2010. Impact de pratiques sylvicoles intensives sur les propriétés du bois de pin maritime. Thèse de doctorat en sciences du bois. Université Bordeaux 1, 146p.
- Pauwels D., Lejeune P., Pâques L., Rondeux J., 2003. Développement de modèles prédictifs des proportions de duramen et d'écorce des espèces de mélèze cultivées en zones de basse altitude en Europe de l'Ouest (*Larix kaempferi* (Lambert) Carr., *Larix decidua* Miller et *Larix eurolepis* Henry). *Annals of Forest Science* vol. 60, n° 3 pp. 227-235
- Polge H., 1964. Le bois juvénile des Conifères. *Revue Forestière Française*, n° 6 pp. 474-505
- Polge H., 1982. Influence de la compétition et de la disponibilité en eau sur l'importance de l'aubier du douglas. *Annales des Sciences Forestières* vol. 39, n° 4 pp. 379-398
- Trincado G., Burkhart H.E., 2009. A framework for modeling the dynamics of first-order branches and spatial distribution of knots in loblolly pine trees. *Canadian Journal of Forest Research* vol. 39, n° 3 pp.566-579
- Vallet P., Pérot T., 2011. Silver Fir Stand Productivity Is Enhanced When Mixed with Norway Spruce: Evidence Based on Large-scale Inventory Data and a Generic Modelling Approach. *Journal of Vegetation Science* vol. 22, n° 5 pp. 932-942

Dossier

 AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE
ANR


Élaboration de Modèles pour une Estimation Robuste et Générique du bois Énergie

Le projet de recherche EMERGE soutenu pendant 4 ans par l'ANR et coordonné par l'ONF se termine. Son objet : la refonte des outils de dendrométrie dans le contexte des nouveaux enjeux d'estimation de la ressource bois. Deux dossiers seront consacrés aux principaux résultats. Le premier, ici, présente le projet et la base de données constituée pour répondre aux objectifs, puis les premiers résultats sur les volumes : coefficients d'expansion et de houppier et taux d'écorce. Suivent deux articles sur le potentiel du laser terrestre comme instrument de mesure, avec des résultats factuels sur les applications et le portage logiciel pour une utilisation en gestion et des perspectives plus fondamentales pour la recherche.

- p. 32 Le projet EMERGE pour des tarifs cohérents de volumes et biomasses des essences forestières françaises métropolitaines
par Christine Deleuze, Thiéry Constant, Laurent Saint-André, Alain Bouvet, François Morneau, Antoine Colin, Patrick Vallet, Alice Gauthier et Marc Jaeger
- p. 37 La force de la mise en commun des données des partenaires : inventaire national, gestion et recherche
par Christine Deleuze, François Morneau, Fleur Longuetaud, Laurent Saint-André, Nina Ognouabi, Alain Bouvet
- p. 48 Les coefficients d'expansion pour déduire différents volumes de branches à partir de volumes de tige
par Fleur Longuetaud, Frédéric Mothe, Philippe Desplanches, Antoine Colin, Christine Deleuze
- p. 60 Taux d'écorce pour les principales essences forestières françaises
par Alain Bouvet, Christine Deleuze
- p. 68 Le Lidar Terrestre : une technologie prometteuse pour l'inventaire forestier
par Alexandre Piboule, Michael Krebs, Étienne Tricot, Aurélie Colin
- p. 74 Le Lidar Terrestre : vers un inventaire en volume...
par Thiéry Constant, Mathieu Dassot, Alexandre Piboule

Le projet EMERGE pour des tarifs cohérents de volumes et biomasses des essences forestières françaises métropolitaines

Dans le contexte de son « paquet énergie-climat », l'Union européenne s'est fixé un objectif de 20 % de renouvelable dans son mix énergétique à l'horizon 2020, ambition portée à 23 % par la France suite au Grenelle de l'environnement. La biomasse joue un rôle crucial dans cet objectif puisqu'elle y contribue à hauteur de plus de 50 %. La biomasse forestière est donc pour la France un atout important, la forêt française étant la quatrième d'Europe en surface de production. Si les évaluations nationales de potentiel *supplémentaire* de bois énergie montrent que la ressource peut répondre à cet enjeu, les évaluations locales et régionales sont souvent plus difficiles, et il en ressort une grande incertitude sur les estimations de volume et biomasse.

La première étape d'une meilleure cohérence entre ces estimations à différentes échelles est le partage des outils de base de cubage, en particulier pour que les estimations volume ou biomasse des gestionnaires puissent s'articuler avec les volumes de référence estimés par l'inventaire forestier national. Par ailleurs les enjeux de gestion durable nécessitent que soient réalisées, en parallèle, des estimations des exportations des éléments minéraux contenus dans les produits supplémentaires récoltés. Pour aller jusqu'au bout de la démarche d'évaluation, ces exportations doivent être mises en regard des gains potentiels en pouvoir calorifique.

Or si les tarifs de cubage des volumes tige sont légion, les outils manquent pour le cubage des houppiers et plus globalement pour les estimations de biomasse, de minéralomasse et de

potentiel énergétique. C'est pourquoi, en 2008, l'ONF et ses partenaires ont proposé au programme « bioénergies » de l'ANR (Agence nationale de la recherche) le projet de recherche EMERGE qui vise à l'Élaboration de Modèles pour une Estimation Robuste et Générique du bois Énergie. Cet article rappelle les principes, les enjeux et l'organisation du projet, qui s'est déroulé de début 2009 à juin 2013 et qui apporte des résultats solides bien qu'il ne puisse encore être question d'outils « clés en main ».

Les estimations de volumes par les gestionnaires forestiers – État des lieux

Les forestiers savent assez bien estimer les volumes marchands, c'est-à-dire le volume de la grume principale, à forte valeur ajoutée. Cependant les estimations de volume à une échelle plus large se révèlent souvent peu cohérentes avec ces estimations fines locales, et cela pour une série de raisons, toutes assez complexes :

■ Le volume marchand n'a pas de définition unique

La définition du volume marchand, parce qu'il est justement associé à une démarche commerciale, est très variable en fonction des usages du produit, avec toute la variabilité liée à l'essence, aux régions et aux filières de transformation. La caractérisation et la définition des produits sont en général données par des découpes, inférieure (gros bout) et supérieure (fin bout), par des hauteurs, ou par des zones de qualité déficiente (« purge » de défauts refusés par un cahier des charges). Typiquement une découpe peut varier en fonction du marché, donc non seulement

d'une région à l'autre mais aussi dans le temps.

Enfin pour une même définition de l'objet mesuré (une tige jusqu'à une certaine découpe, un houppier selon certains critères), la méthode de mesure peut varier : entre un *volume géométrique* qui est estimé par des mesures de diamètres ou circonférences le long de la grume, et un *volume commercial* défini comme le volume équivalent d'un cylindre de même longueur et dont la section est celle de la grume à mi-longueur. Pour les branches et houppiers, ou pour les plus petites tiges, le volume est souvent approché par un volume d'encombrement (cubage en stères du bois empilé).

■ Les tarifs de cubage sont très variables d'une essence à l'autre et d'une zone à l'autre

Des outils d'estimation existent pour les compartiments de l'arbre les plus utilisés et pour beaucoup d'essences et de régions. Ils ont été élaborés à partir de données issues de larges campagnes de mesures : des arbres ont été abattus puis précisément cubés afin de construire des équations, ou tarifs de cubage, permettant d'estimer le volume attendu à partir d'une ou plusieurs variables. Ces variables sont le plus souvent le diamètre ou la circonférence à 1,30 m ainsi qu'une hauteur (totale ou de découpe). Les tarifs peuvent ensuite être paramétrés pour tenir compte de spécificités régionales ou sylvicoles (TSF ou futaie par exemple).

À l'ONF, un travail ancien a donné lieu, au tournant du siècle, à un recensement des tarifs archivés par le département recherche à Fontainebleau, soit 624 tarifs de

cubage établis durant les années 1970 à 2000 (figure 1). Mais cela ne reflète qu'une partie des tarifs utilisés à l'ONF, puisque beaucoup d'autres ont été développés localement : selon une estimation récente, il y en aurait plus de 1600. Ils sont souvent plus précis localement et pour un type de produit donné, mais les volumes prédits ne peuvent alors ni être comparés, ni cumulés avec d'autres estimations. Parallèlement, d'autres organismes ont effectué des travaux similaires et ont établi leurs propres tarifs de cubage.

Face à cette profusion, le professionnel a de quoi être désorienté et ne sait pas toujours comment choisir un tarif pertinent. D'autant que, finalement, seule une douzaine d'essences forestières françaises bénéficie de tarifs de cubage et souvent pour une partie de la France seulement et pour certaines structures forestières.

À noter que le volume de l'inventaire forestier national (bois fort tige) est un volume de référence au sens où les mesures et tarifs de cubage sont parfaitement cohérents sur tout le territoire.

■ Les coefficients de houppier aussi sont variables et surtout peu fiables

Au-delà du volume de bois d'œuvre, la part complémentaire de volume de l'arbre (bois d'industrie, bois énergie) est estimée avec des coefficients dits de houppier ou d'expansion, cette fois beaucoup moins précis, les mesures nécessaires pour les établir étant très laborieuses, et les facteurs de variation peu connus et hiérarchisés (essence, âge, structure de peuplement, région...). Les coefficients les plus répandus sont les rapports entre le volume total de l'arbre (houppier complet et tige) rapporté au volume bois fort de la tige, tel que donné par l'inventaire forestier national. Ces coefficients peuvent servir, par exemple, à établir des bilans de carbone ou à estimer la part de menus bois à vocation énergétique à différentes échelles (région, France entière...). À l'ONF,

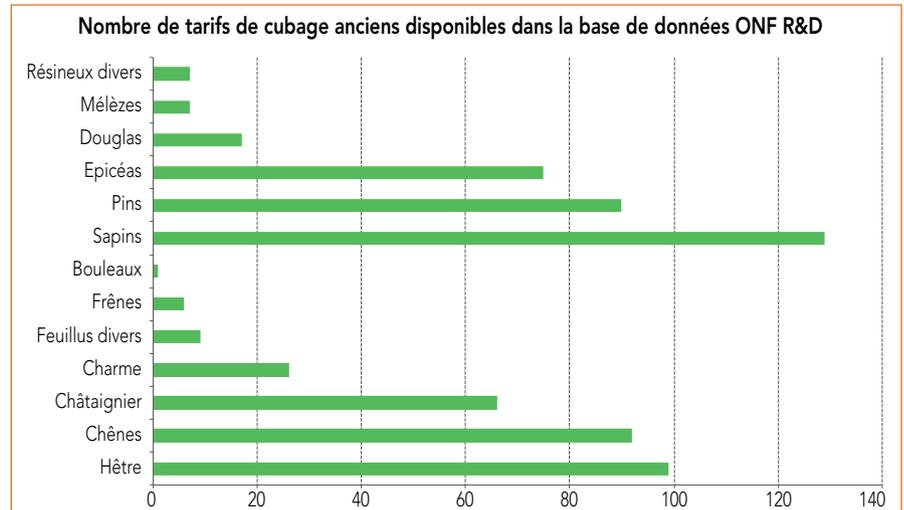


Fig. 1 : répartition par essence des tarifs de cubage répertoriés par Jacky Lipovac et Hilaire Martin dans les archives de la R&D ONF

les coefficients de houppier sont ordinairement liés aux coupes et concernent plutôt le rapport entre le volume bois fort total de l'arbre (tiges plus branches sans les menus bois) et le volume commercial principal de la grume ou volume marchand (qui dépend donc de la découpe choisie).

Ces coefficients varient ainsi selon la définition du volume de référence (figure 2), d'une part, mais aussi selon l'essence, la région, la taille de l'arbre. Dans le contexte du bois énergie, ces incertitudes sont d'autant plus problématiques que les branches représentent une grosse partie des volumes potentiels pour le bois énergie.

Besoins de conversion en biomasse, minéralomasse, pouvoir calorifique

L'estimation des volumes utilisables en bois énergie est donc sujette à un cumul d'approximations. Mais ensuite, quand on en est aux opérations de récolte/approvisionnement, le bois énergie est plutôt évalué soit en biomasse sèche, soit en biomasse fraîche (30 % d'humidité), ce qui nécessite cette fois une conversion par la densité du bois, là encore variable d'une essence à l'autre et selon les conditions de croissance et la période de récolte.

Enfin, il reste une question encore peu connue mais essentielle concernant la ressource que constituent les menus bois, le compartiment le plus fortement concentré en éléments minéraux. Dans un contexte de demande croissante en bois-énergie, il devient nécessaire de pouvoir évaluer la quantité des éléments minéraux qui seraient exportés selon différentes hypothèses de récolte afin de mesurer les risques potentiels d'appauvrissement des sols sur les sites sensibles. Il faut aussi confronter les questions induites de gestion de la fertilité au gain réel, ou bilan net, en énergie, ce qui suppose qu'on puisse aussi estimer le pouvoir calorifique (voir encadré) selon les compartiments et les coupes choisies.

EMERGE, un projet du programme Bioénergie de l'ANR

En 2008, l'ANR a lancé le programme Bioénergies qui, chaque année, ouvre un appel d'offre pour financer des projets de recherche sur les énergies renouvelables. Ces projets visent à évaluer les ressources des différentes formes de biomasse, agricoles, forestières mais aussi dédiées, mobilisables à des fins énergétiques et à trouver les méthodes et techniques pour assurer leur développement (combustible, biocarburant sous forme gazeuse ou liquide).

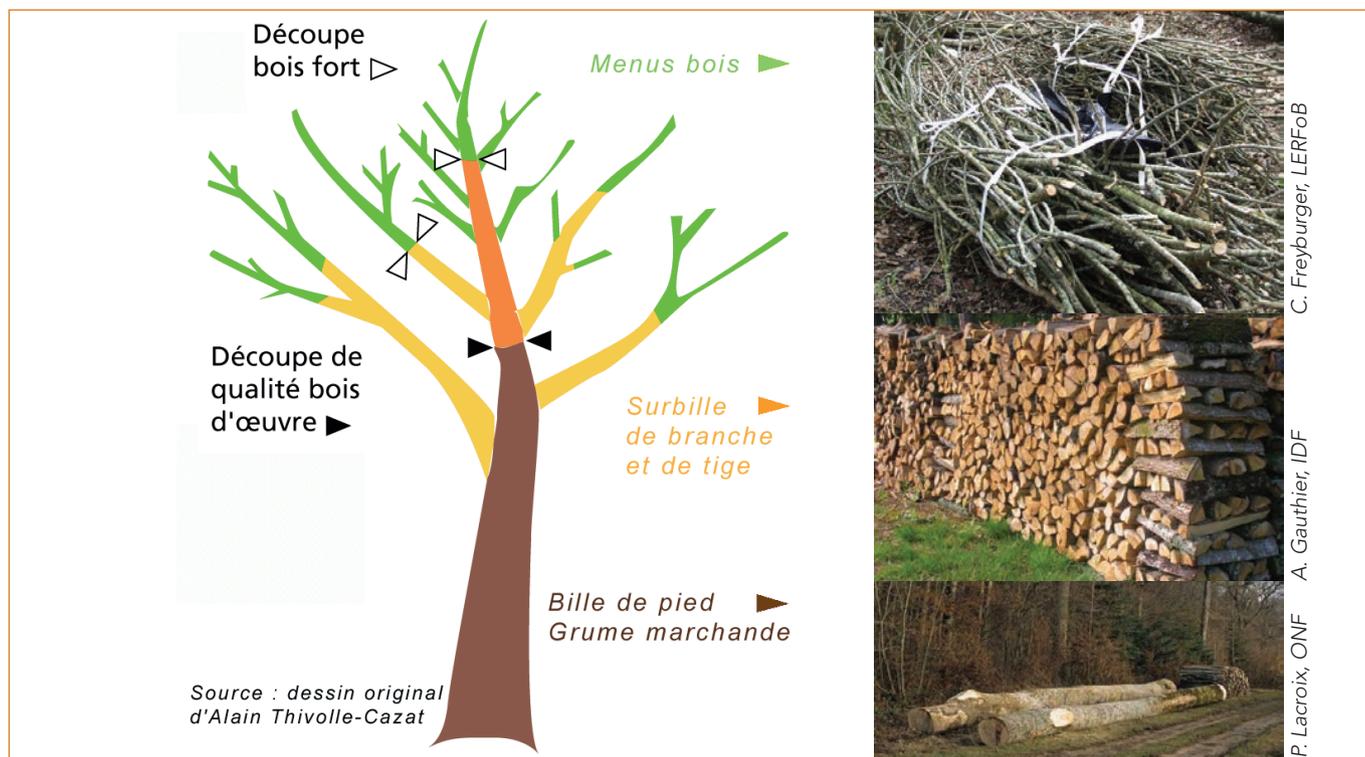


Fig. 2 : schéma des découpes et des types de volume avec illustration de leur réalité physique
Ce schéma sert de fil conducteur aux différents articles des deux dossiers.

Le pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique est la mesure standardisée de la quantité d'énergie contenue dans une unité de masse sèche. Elle s'exprime normalement en joules par grammes (J/g), mais en matière de bois énergie, l'unité est plus souvent kcal/kg, voire kWh/tonne (étude CRITT Bois pour l'ADEME et FIBOIS en 2002).

Il se mesure en assurant une combustion complète dans des conditions standardisées de pression, de température, de quantité d'oxygène et sur un échantillon pesé et séché à 103 °C. Le PCS ou **pouvoir calorifique supérieur** est la quantité de chaleur dégagée lorsque toute l'eau résultant de la combustion est ramenée à l'état liquide. Le PCI, ou **pouvoir calorifique inférieur**, au contraire n'intègre pas la chaleur latente de vaporisation de l'eau qui cette fois reste à l'état de vapeur en fin de combustion (PCS > PCI, la différence étant l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau contenue à la fin de l'oxydation). Sauf pour les chaudières à condensation, le PCI est plus proche de la chaleur réellement récupérée par combustion dans une chaudière et est donc plus largement utilisé dans la qualification des combustibles.

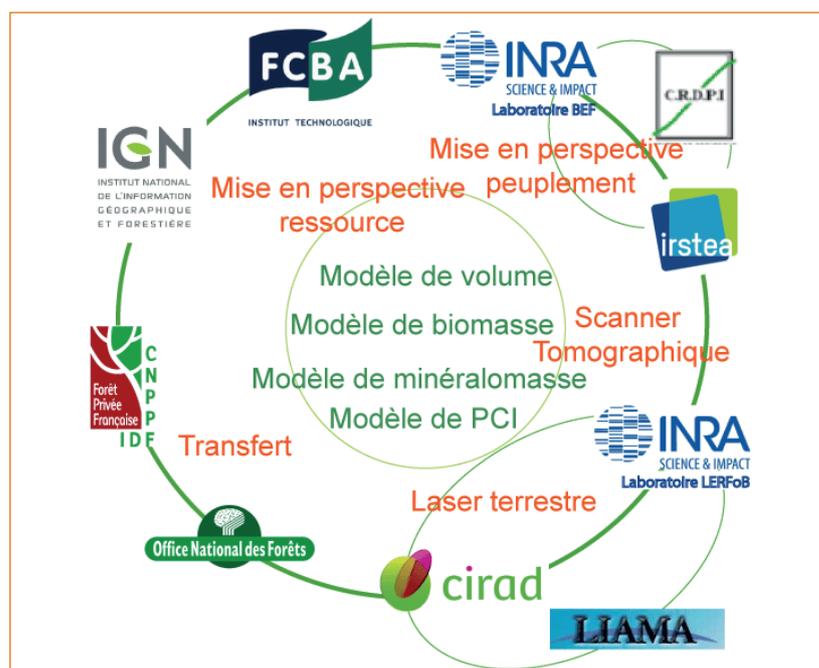


Fig. 3 : organisation des partenariats du projet EMERGE
Tous les partenaires détenteurs de données anciennes ont contribué à la base de données, au cœur de la démarche de modélisation du projet, avec une sous-traitance confiée au CRDPI (Centre de Recherches sur la Durabilité des Plantations Industrielles, au Congo). La modélisation sur les 4 variables clés a ensuite été conduite par les partenaires recherche (INRA-BEF et INRA-LERFoB, FCBA, Irstea, Département R&D ONF). Le LERFoB a assuré l'animation des tâches sur le laser terrestre et le scanner, en collaboration avec l'ONF, le CIRAD et le laboratoire chinois associé, le LIAMA. Les réflexions sur les applications à l'échelle de la ressource ou du peuplement sont menées par l'IGN, FCBA, l'INRA, Irstea et l'ONF. Enfin le transfert, notamment via les revues techniques est assuré par le CNPPF et l'ONF.

Cela a donné à l'ONF l'opportunité de réunir dans un projet commun différents organismes techniques et de recherche afin de travailler sur l'évaluation quantitative et qualitative de la biomasse forestière au niveau de l'arbre : des partenaires recherche (INRA, FCBA, Cemagref devenu Irstea, CIRAD), un institut technique (IFN fusionné depuis avec l'IGN) et des représentants des gestionnaires, CNPPF pour la forêt privée et ONF pour la forêt publique (figure 3). Ce projet, baptisé Emerge, a bénéficié sur 4 années et pour les 7 partenaires impliqués, d'une subvention de 731 k€ de l'ANR sur un coût total évalué à 2,3 M€. Mais au cours de ces années, plusieurs autres projets ont vu le jour et ont pu être financés grâce au partenariat né dans Emerge. Ce projet a été coordonné par le département R&D de l'ONF.

Enjeux du projet

Face au constat de disparité, hétérogénéité et insuffisance des outils existants, l'objectif du projet Emerge a donc été de construire des tarifs de volume, biomasse ou minéralomasse assez robustes pour être utilisés dans différentes régions et pour les principales essences forestières métropolitaines.

Quatre exigences sur les outils d'estimation

L'enjeu du projet est donc avant tout de rassembler le savoir-faire de tous les partenaires forestiers concernés par cet objectif (l'Inventaire forestier national de l'IGN, les organismes de gestion et les organismes de recherche) afin de développer des modèles d'estimation « intégrés » répondant à 4 contraintes :

- compatibilité entre les grandeurs utilisées : volume, biomasse, minéralomasse et pouvoir calorifique ;
- généralité pour les différentes essences forestières tempérées, sachant que l'inventaire forestier national en recense plus de 60 ;
- robustesse quelles que soient l'origine

des peuplements, leur structure, leur fertilité, leur taille ;

- cohérence quel que soit ensuite le niveau de découpe pour la tige et/ou le houppier.

Finalement l'ambition est de pouvoir quantifier le bois énergie selon des procédures claires, stables, opérationnelles, à vocations multiples. Pouvoir par exemple estimer la biomasse de menus-bois d'une coupe, de manière cohérente et compatible avec le volume de bois d'oeuvre associé, et en déduire l'impact potentiel sur la fertilité des sols en terme d'exportation d'éléments minéraux.

Il existe déjà pour tous ces aspects ou presque des outils, des tarifs, des facteurs de conversion, mais plus on s'écarte du cas standard (l'essence bien connue, le volume commercial le plus classique, le type de peuplement, la technique d'exploitation...), plus les données et les outils sont rares. Avec la difficulté supplémentaire qu'ils ont souvent été développés séparément, sans souci de cohérence entre eux. L'ambition est donc de revisiter toutes ces estimations simultanément, en rassemblant les données disponibles chez chacun des partenaires, et en cohérence afin de développer des outils plus robustes. C'est aussi de se donner des outils pour des essences « grises », c'est-à-dire des essences non couvertes par les données/outils disponibles dans une région, voire en France. C'est enfin de partager, les données, les méthodes de modélisation et les outils générés entre les différents organismes.

Une volonté de tester le potentiel des technologies modernes en dendrométrie

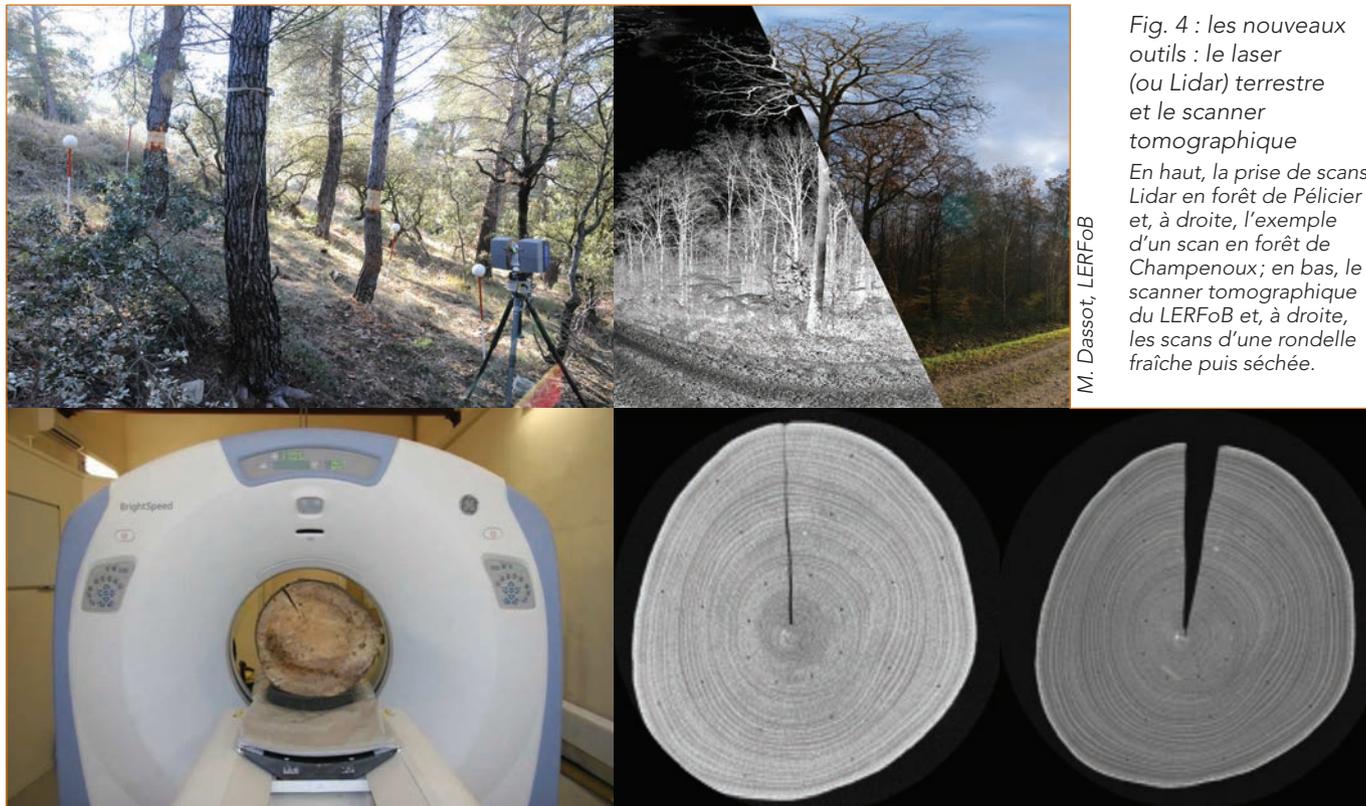
L'arrivée en métrologie des lasers a révolutionné les méthodes de mesures en travaux publics et en géomatique. De même, elle ouvre des horizons nouveaux en dendrométrie. Aussi, en parallèle des travaux de modélisation, le projet intègre des études plus prospectives sur les outils modernes : le laser terrestre

pour estimer des grandeurs 3D des arbres en condition de terrain et le scanner tomographique à rayon X pour explorer la variabilité de densité interne des bois (figure 4).

Des résultats à différents niveaux

Ce projet se termine en juin 2013. Il a permis tout d'abord de mettre en commun les archives de données de cubage et de biomasses à différentes échelles, véritable socle d'un travail de construction transversale de nouveaux outils d'estimations de volume, biomasse, minéralomasse, PCI (voir l'article suivant). Les travaux de recherche ont donné lieu à plus d'une trentaine de publications dans des revues scientifiques ou des colloques de chercheurs, et d'autres sont encore en phase de rédaction.

Nos RenDez-Vous techniques vont retracer dans deux dossiers les grandes lignes des résultats acquis pendant ce projet, prioritairement ceux qui peuvent être intéressants pour les gestionnaires. Après la présente introduction générale, le premier consacre un article aux données réunies pour le projet, puis s'intéresse aux travaux de modélisation : ceux de l'INRA sur les coefficients d'expansion et de houppiers, puis ceux de FCBA sur les pourcentages d'écorce. Il se termine sur deux articles autour du Lidar terrestre, car le projet Emerge a été l'occasion pour l'ONF d'explorer le potentiel de cet outil et ses apports pour la gestion : l'un porte sur les aspects opérationnels, tandis que l'autre traite des perspectives plus larges en recherche issues des travaux du LERFoB. Le second dossier concernera le coeur du projet autour de la modélisation des volumes, de la biomasse, de la minéralomasse et du PCI par l'INRA et l'ONF, les avancées sur l'outil scanner tomographique pour comprendre la structure interne des arbres, et enfin des exemples de mise en perspective de ces nouveaux outils pour les applications aux peuplements ou à la ressource.



M. Dassot, LERFoB

C. Freyburger, LERFoB

Fig. 4 : les nouveaux outils : le laser (ou Lidar) terrestre et le scanner tomographique

En haut, la prise de scans Lidar en forêt de Pélacier et, à droite, l'exemple d'un scan en forêt de Champenoux; en bas, le scanner tomographique du LERFoB et, à droite, les scans d'une rondelle fraîche puis séchée.

Les lecteurs constateront que ce projet a permis de mettre en réseau un certain nombre de chercheurs et gestionnaires, de rassembler les données, les questions, les approches de différentes disciplines, et de bâtir un socle commun pour répondre à l'ambition initiale. Aussi bien en terme de modélisation que sur les développements méthodologiques autour des scanners, le cercle déjà large des partenaires du projet s'est étendu à l'étranger avec d'autres organismes de recherche ou techniques, des universités et des instituts étrangers, afin de confronter et partager nos résultats.

Quelques outils généraux ont été construits et peuvent être utilisés dès à présent, d'autres sont à venir en fonction des besoins des gestionnaires, des chercheurs et de l'Inventaire forestier national. La phase d'assimilation des résultats et de déploiement des outils devra être prise en charge en interne par les différents organismes mais le partage du socle initial permettra d'assurer la cohérence entre les estimations.

Au travers des différents articles plus techniques qui suivront nous essaierons de vous présenter ce socle : les résultats acquis, les possibilités de développement en fonction des besoins et des priorités, mais aussi les perspectives ouvertes pour la recherche.

Christine DELEUZE
François MORNEAU
ONF, Département R&D

Thierry CONSTANT
Laurent SAINT-ANDRÉ
INRA, Laboratoires LERFoB et BEF

Alain BOUVET
FCBA, Direction Innovation Recherche

Antoine COLIN
IGN, Département expertise forestière et environnementale

Patrick VALLET
Irstea UR EFNO, Écosystèmes forestiers

Alice GAUTHIER
IDF-CNPPF

Marc JAEGER
CIRAD, UMR Amap

Remerciements

Le pilotage technique de ce projet de recherche a été assuré par les représentants des partenaires, co-auteurs de cet article, mais aussi par Alexandre Piboule, Fleur Longuetaud, Frédéric Mothe : merci à eux.

La force de la mise en commun des données des partenaires : inventaire national, gestion et recherche

Le projet EMERGE a réuni en consortium les principaux acteurs forestiers ayant développé des outils d'estimation de volume et biomasse à différentes échelles. Compte tenu de l'ambition du projet, exposée dans l'article précédent, une tâche fondamentale a été de collecter les mesures de cubage plus ou moins détaillées, ainsi que les mesures plus récentes de biomasse et minéralomasse, archivées depuis des décennies par ces organismes, pour pouvoir disposer de la puissance d'analyse nécessaire. Les collecter puis les réunir sur une même plateforme de base de données paraît élémentaire, mais c'est en soi un résultat original et d'une portée considérable.

Cet article vise à présenter les différentes bases de données concernées, leurs complémentarités, ainsi que leurs limites et les mesures supplémentaires qui ont été nécessaires. Ce faisant, il donne une idée de la valeur exceptionnelle du travail accompli, bien au-delà du projet lui-même.

Méthodes de cubage : une longue tradition forestière

Le projet EMERGE a bénéficié d'une longue tradition de dendrométrie française, que l'on observe dès les années 1930 avec la mise en place par Oudin (Inspecteur principal des Eaux et Forêts, chef de la première section de la station de recherches et expériences forestières à Nancy) d'un protocole national de cubage des arbres pour les principales essences forestières gérées (figure 1).

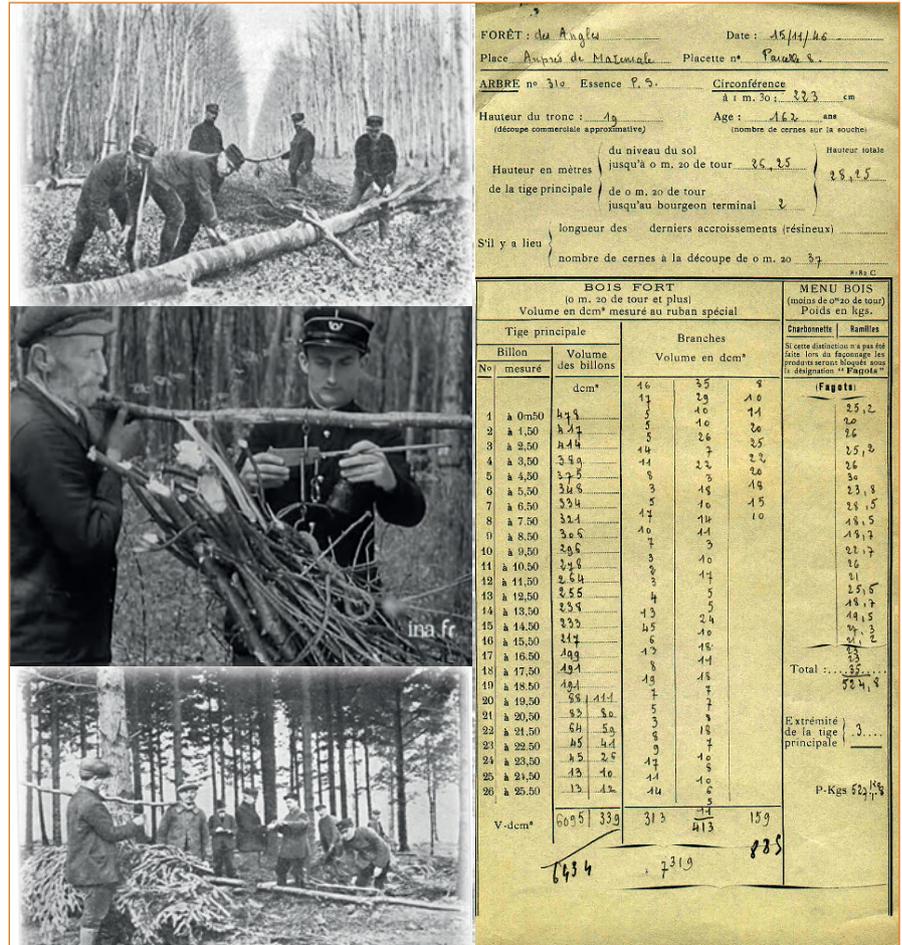


Fig. 1 : photos d'archives sur le protocole Oudin de cubage complet des arbres en 1930, avec les pesées de menus bois ainsi que l'exemple d'une fiche papier scannée

Fig. 2 :

classement des fiches des archives INRA, pour scannage avant saisie...

des manipulations minutieuses et fastidieuses, mais indispensables pour ménager une ressource fragile et préserver son organisation.



EMERGE

Travaux anciens de cubage initiés en 1930 par Oudin

Le protocole Oudin avait pour objectif d'obtenir des tarifs de cubage pour toutes les parcelles expérimentales suivies par la station de recherche à l'occasion d'exploitation d'éclaircies ou de coupes finales. La méthode était graphique, selon l'approche du professeur Hüffel (1919), pour donner une courbe moyenne, tracée à la main, entre des volumes et des circonférences. Dès cette époque, le volume était séparé entre le volume de tige ou de branche découpé bois fort et le volume de menus bois (figure 1).

Le dispositif expérimental général - et donc ces mesures de cubage - concernaient les principales essences forestières utilisées en gestion, réparties sur les grands massifs forestiers représentatifs pour ces essences, souvent en forêt publique. Les arbres étaient choisis au moment du martelage pour représenter toutes les classes de diamètre du peuplement initial et des arbres abattus. Le volume de la tige était mesuré par un cubage systématique de billons de un mètre, avec un ruban spécial donnant le volume en dm^3 à partir de la circonférence à mi-hauteur du billon (mesures à 0,50 m, 1,50 m, etc.). Ces mesures permettent de reconstituer le profil des troncs mètre par mètre. Les branches étaient cubées de la même manière et l'ensemble des menus bois (en deçà de la découpe 7 cm) était estimé par pesée. Un échantillon de menus bois permettait d'établir pour la coupe le lien poids-volume de ces menus bois. Une partie des tiges pouvait être ensuite écorcée pour donner des profils d'écorce le long des troncs.

Une fiche standard associée à ce protocole a ensuite été construite et l'ensemble, déployé sur toute la France, est resté en vigueur jusque dans les années 80 ! Toutes ces fiches papier ont été conservées dans les archives INRA à Champenoux et leur nombre a été estimé à environ 80 000. Les menus bois n'ont cependant

été mesurés que jusque dans les années 50 (soit finalement environ 13 000 arbres avec les branches et menus bois).

Le protocole de cubage de l'Inventaire forestier national dans les années 60

De son côté, l'Inventaire forestier national a mis en place dans les années 60 un protocole de cubage d'une partie des arbres mesurés afin d'obtenir des tarifs de cubage pour l'ensemble des arbres inventoriés. Jusque fin 1983, l'IFN a réalisé des mesures de cubage sur les tiges et sur les surbilles de branches (découpe marchande) avant de s'en tenir à la seule tige principale.

Ces données anciennes de cubage couvrent 99 couples département-cycle IFN. Seuls 4 départements ne possèdent pas de tels cubages (17, 64, 70 et 85) et 12 seulement ont été mesurés sur 2 cycles à une dizaine d'années d'intervalle (05, 07, 12, 21, 25, 26, 30, 49, 53, 57, 69 et 88). Au total 1 106 099 arbres ont pu être rassemblés venant de cette base de données.

Les données sur les placettes sont celles disponibles dans le protocole IFN de l'ancienne méthode : structure, propriété, département, année du relevé. Les données arbres sont les données du protocole inventaire (voir encadré), qui permettent de

La référence nationale du volume bois-fort tige de l'IFN : protocole et méthode de calcul

Le volume bois fort de la tige est estimé par l'IFN avec un protocole de mesure et de calcul standardisé depuis les années 60 ce qui en fait un volume de référence pour la ressource française.

Le protocole « inventaire » schématisé sur la figure ci-contre indique les variables mesurées sur le terrain : l'essence de l'arbre, D_{13} le diamètre à 1,30 m, H_{tot} la hauteur totale, D_{26} le diamètre à 2,60 m, c'est-à-dire à la hauteur supérieure du premier billon, H_{dec} la hauteur de fort décrochement ou de défaut et hauteur supérieure du second billon, avec D_d le diamètre à cette hauteur, et enfin D_m le diamètre médian du second billon. Le volume de la surbille de la tige au-delà de H_{dec} est ensuite estimé par cubage de billons réguliers jusqu'à la découpe bois fort. S'y ajoutaient jusque fin 1983 des mesures de surbilles de branches jusqu'à une découpe marchande.

Sur ces mesures standardisées, le volume de référence IFN est calculé par la somme de 3 volumes :

- le volume commercial du premier billon jusqu'à la hauteur de 2,60 m, avec la formule de Huber,
- le volume géométrique du second billon jusqu'à la hauteur de H_{dec} avec la formule de Simpson,
- la somme des volumes commerciaux des billons de tige pour la surbille.

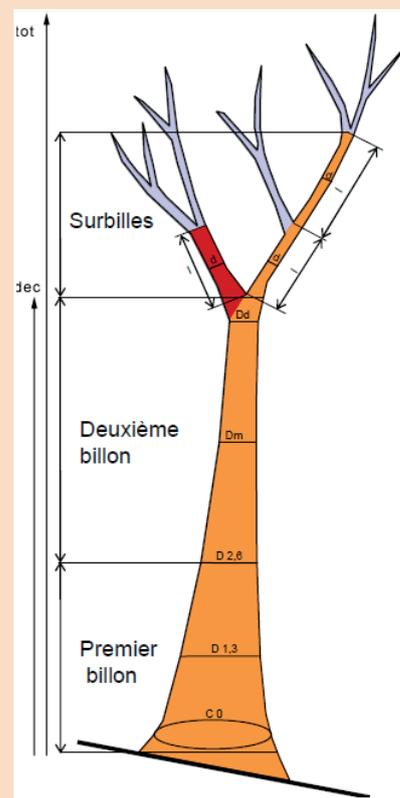


Schéma des mesures du protocole cubage de l'IFN

En orange la tige jusqu'à la découpe 7 avec une partie de surbille au-delà de H_{dec} ; en rouge la surbille de branche.

reconstituer le volume de tige découpe bois fort (diamètre de 7 cm) et de surbilles de branches de chaque arbre (Meurillon, 2009). Ce protocole utilise une variable particulièrement informative sur la forme de l'arbre et donc pour son volume : Hdec, la hauteur de découpe de la tige, correspondant à une découpe 7 cm lorsque la tige ne présente aucun décrochement ni défaut, mais qui rend compte de la découpe bûche-ron sinon.

La force de ces données, d'ailleurs échantillonnées dans ce but précis, est leur représentativité nationale en terme d'essences (plus de 60 répertoriées dans la ressource française), de couverture géographique, de conditions de gestion (ou de non-gestion d'ailleurs), et sur une période de plus de 50 ans maintenant.

Un recensement complémentaire des volumes demandé au Centre Technique Forestier Tropical

À la même époque, l'État et des industriels ont confié au CTFT des mesures sur des chantiers d'exploitation afin d'acquiescer des estimations de cubage dans les régions non couvertes les premières années par l'inventaire forestier. Ont donc été exclues de cette campagne les 4 régions déjà mesurées à l'époque par l'IFN : Aquitaine, Auvergne, Corse et Nord-Pas-de-Calais.

Le protocole, assorti d'une fiche standard, était un peu différent de celui de l'IFN, avec des mesures jusqu'à la découpe 4 cm, et il a été appliqué à :

- 15 000 arbres de futaie (profil de tige sur et sous écorce jusqu'à découpe 4 cm et profil de branches jusqu'à découpe 4 cm) ;
- 15 000 arbres de taillis (uniquement profil de tige sur écorce jusqu'à la découpe 4 cm).

Les travaux partagés de cubage en gestion : protocoles 1972 et 1983

Enfin différents acteurs forestiers se sont par ailleurs coordonnés et ont

mis en place dès les années 70 un protocole commun pour construire des tarifs de cubages utilisés ensuite en gestion. Ce protocole, rédigé en 1972 par l'Office National des Forêts (département R&D à Fontainebleau), était commun avec l'Association Forêt-Cellulose (intégrée dans FCBA en 2007), le Centre National de la Recherche Forestière (INRA), les Centres Régionaux de la Propriété Forestière, le Centre Technique Forestier Tropical (devenu CIRAD-Forêt en 1984), le Centre Technique du GREF (devenu Cemagref, puis Irstea en 2011), l'École Nationale des Ingénieurs des Travaux des Eaux et Forêts, (intégrée à l'ENGREF, puis AgroParisTech en 2007), l'Institut pour le Développement Forestier (intégré au CNPPF, devenu CNPF en 2010), l'Inventaire Forestier National (intégré à l'IGN en 2012). Annexées à ce protocole national, des fiches standardisées étaient disponibles, ainsi qu'une codification homogénéisée (codes essences, codes structures, codes régions, etc.).

Plus simple que le protocole Oudin cité précédemment, la méthode s'attachait principalement au cubage de la tige par dixièmes de hauteur, avec en plus des mesures de circonférence à certains niveaux caractéristiques ; pouvait s'y ajouter, dans certains cas, le cubage des branches jusqu'à la découpe 7 cm, mais aucune mesure de menus bois. En revanche l'objectif était plus large que les quelques essences étudiées en recherche sylvicole par Nancy et concernait toutes les essences utilisées en gestion et commercialisées. En 1983 ce protocole national a été repris et consolidé par le même groupe d'organismes afin de mieux préciser la nature et la définition des mesures à réaliser, ainsi que l'échantillonnage.

Au département R&D de l'ONF, les mesures fournies pour la construction de tarifs (pour une essence et une région) ont été systématiquement saisies et conservées, si bien qu'une base de données a pu être construite

au démarrage du projet EMERGE : environ 28 113 profils d'arbres dont 286 avec des branches (charme et hêtre) avec le protocole de 1972 et 14 759 profils d'arbres dont 1 635 avec des branches (chêne et hêtre surtout) pour le protocole 1983. Ces données ont été récoltées dans les forêts de l'État et des Collectivités. En parallèle, FCBA a conservé de son côté les données issues de ces mêmes protocoles, soient 12 851 profils d'arbres supplémentaires concernant plutôt des forêts privées.

D'autres études avec des protocoles dédiés

Par ailleurs, des données d'études réalisées selon des protocoles un peu différents ont été archivées par exemple à l'IDF et Irstea ; elles donnent des mesures complémentaires sur quelques essences (par exemple des mesures de châtaignier venant de l'IDF).

Les données de biomasse et minéralomasse : une origine INRA

En parallèle de cet ensemble de données concernant les volumes, des mesures de biomasse et minéralomasse ont aussi été rassemblées, mais l'historique en a été plus rapide puisqu'il s'agissait de données de recherche sur une trentaine d'années, émanant principalement du laboratoire de BEF-INRA, avec un protocole standardisé. D'autres établissements, notamment FCBA (ou plutôt à l'époque l'AFOCEL), ont aussi réalisé ce type de mesures, mais en collaboration avec BEF-INRA et selon le même protocole, elles étaient donc aussi conservées au laboratoire BEF-INRA.

Au démarrage du projet, des mesures de biomasse et minéralomasse (concentrations en C, N, P, K, Ca, Mg, S, Na, Mn et Al) étaient disponibles par compartiments, c'est-à-dire par découpes et tige/branche, avec une séparation de l'écorce au-delà de la découpe 7 cm, pour environ 1 367 arbres.

Par ailleurs des mesures de biomasse seule existaient pour 6 500 arbres dont plus de 4 000 peupliers (données FCBA).

L'ensemble des échantillons manipulés pendant 30 ans par l'équipe BEF-INRA puis enrichi par les campagnes de terrain EMERGE a été conservé sous forme de poudre de bois sèche et représente une véritable xylothèque pour des analyses complémentaires (autres mesures physiques ou chimiques, autres protocoles de laboratoire).

Organisation des données

Les données « historiques » que nous venons de présenter existaient au démarrage du projet, sous forme

papier (fiches INRA et CTFT), sous forme de fichiers informatiques (en format texte par exemple pour les données ONF, avec un fichier par lot d'arbres), et même parfois sous forme de base de données (données IFN et FCBA), mais elles pouvaient être aussi éparpillées dans différents fichiers numériques (Excel ou autre format). Il a fallu, pour les rendre réellement disponibles et utilisables, un énorme effort de saisie et de compilation.

Échantillonnage, scan et numérisation des fiches papier

Le plus rude a évidemment été de traiter les fiches papier : les 80 000 fiches INRA et les 30 000 fiches CTFT. Finalement 53 000 fiches INRA seulement et

toutes les fiches CTFT ont été scannées sur une période de plus de 8 mois (figure 2). Ensuite, il a fallu numériser (saisir) les entêtes de ces fiches, à savoir les données générales sur le peuplement et l'arbre échantillonné (forêt, place, date, C130, différentes hauteurs) ainsi que les données calculées (volumes de la tige, des branches et parfois des menus bois), que l'on appelle « méta-données » ; ce qui a demandé près de 14 mois. Sur ces premières données générales, un second échantillon d'environ 18 000 fiches a été intégralement numérisé, avec les profils détaillés des tiges, de l'écorce et des branches. Cette dernière tâche a duré 8 mois et s'est terminée par une consolidation générale des données, si bien que des tests

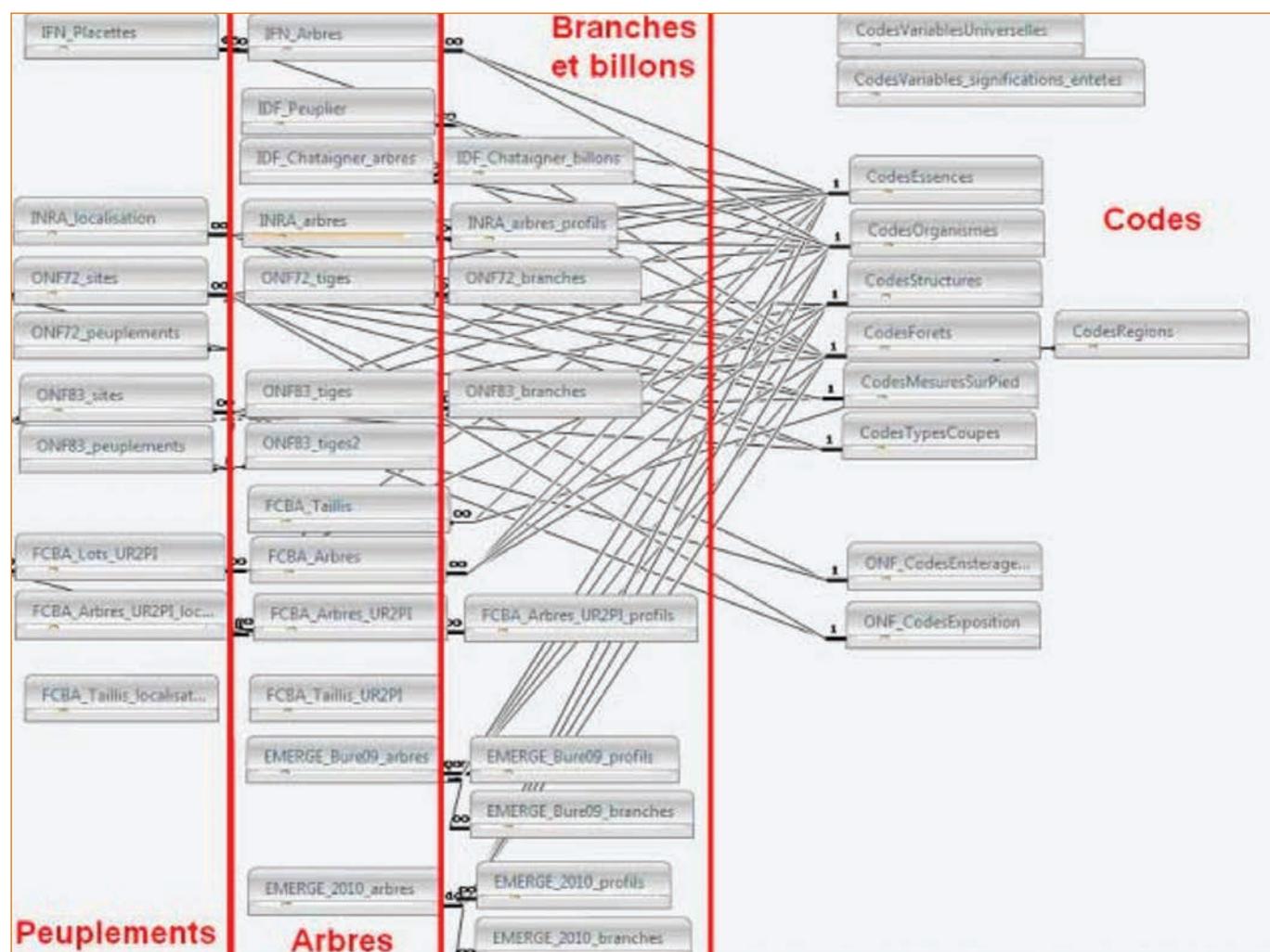


Fig. 3 : schéma relationnel des bases de données EMERGE, avec 3 échelles : peuplement, arbre et intra-arbre (branches ou profils), ainsi que les tables documentaires (codes partagés)

Chaque table est nommée avec une indication de l'organisme propriétaire (ifn_, inra_, fcba_, onf_, emerge_, idf_).

effectués ensuite ont montré un taux d'erreur de saisie de 0,03 %, ce qui est extrêmement faible compte tenu de la masse des fiches numérisées et parfois de leur qualité de conservation. À noter que, pour les 18 000 fiches complètes, des vérifications de calculs (cumuls des cubages par billons ou des pesées par fagots) ont révélé un taux d'erreur sur les fiches papier elles-mêmes d'environ 1,5 % dont une partie a pu être corrigée lors de la saisie (les calculs de longues colonnes de chiffres comme sur la fiche de la figure 1 se faisaient à la main!).

Même si les différentes étapes se sont en partie chevauchées, l'ensemble de ces données anciennes n'a été complètement disponible à la modélisation qu'à l'été 2011, avec des vérifications jusqu'en été 2012.

Des bases de données indépendantes, mais homogènes, dans une plateforme commune

L'ensemble des données numérisées, ainsi que les bases de données préexistantes ont été vérifiées et homogénéisées puis versées sur une plateforme commune de base de données de près de 500 Mo hébergée sur un serveur à l'INRA de Champenoux et administrée par le partenaire INRA. Depuis février 2012, chaque partenaire peut y accéder à distance avec un accès sécurisé. Cette plateforme EMERGE (figure 3) contient plusieurs tables que l'on peut regrouper en différentes catégories :

- tables générales, d'information; elles ne sont pas nécessaires à la récupération ou l'exploitation des données;
- tables de codes (CodesEssences, CodesOrganismes, CodesVariables); elles sont nécessaires pour faire correspondre des variables parfois codées (exemple : numéros d'essences) entre différents organismes de façon homogène;
- tables de cubage au niveau arbre; elles contiennent par exemple le

genre, l'espèce, la hauteur, la circonférence à 1,30 m...

- tables aux échelles supérieures (lot, peuplement); elles contiennent par exemple le type d'exploitation, l'exposition, l'altitude...
- tables aux échelles inférieures (branche, billons); elles contiennent par exemple des données de circonférence de la tige sur et parfois sous écorce à différentes hauteurs (profils) et des mesures de branches. Un fichier des tables est disponible pour décrire les différentes variables, leur définition, leur unité.

Cette plateforme a été créée comme outil de travail du projet, mais l'ensemble des partenaires s'est accordé pour souscrire une nouvelle convention de consortium de façon à continuer à partager ces données au-delà de la fin du projet EMERGE.

Deux campagnes de mesures complémentaires réalisées pendant le projet

Les données ainsi rassemblées sont la force des partenaires pour construire les tarifs « intégratifs » prévus. Il fallait cependant des mesures supplémentaires pour garantir la cohérence entre les protocoles d'origine et entre les différentes variables, et pour compléter les données sur les aspects mal couverts par cette ressource « historique ». Ainsi deux campagnes de terrain ont été menées les deux premiers hivers du projet sur plus de 200 arbres supplémentaires. L'ensemble des données citées précédemment ont été acquises simultanément sur ces arbres : cubage, pesées, échantillonnages de minéralomasse et scans à rayon X sur un échantillon de rondelles. Le second hiver, l'acquisition d'un Lidar terrestre a permis de rajouter les scans Lidar sur pied (avant abattage) des arbres échantillonnés.

Un échantillonnage choisi pour combler quelques lacunes

Les essences ont été choisies pour combler les lacunes les plus impor-

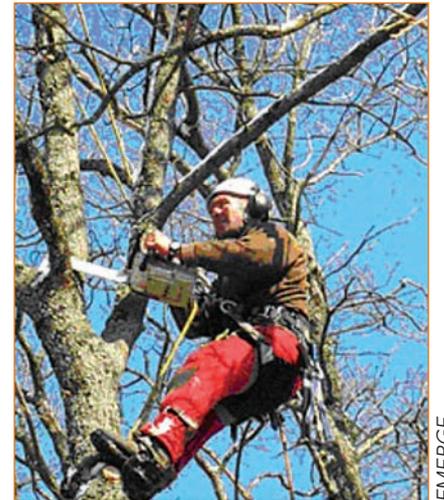


Fig. 4 : coupe de branches avant abattage sur chêne pubescent (Jérôme Desviaux, ONF) pour éviter les casses qui compromettraient les mesures

tantes des données anciennes, en particulier en fonction des manques sur les données en biomasse et minéralomasse : essences peu représentées, avec une faible couverture géographique ou de conditions de croissance (comme la structure forestière), ainsi que des essences potentiellement intéressantes à des fins énergétiques. Par exemple des hêtres et des chênes de réserve de taillis-sous-futaie ont été choisis pour évaluer les différences de répartition de biomasse et de concentration en minéralomasse pour ces arbres aux houppiers particulièrement développés.

Dès le premier hiver, l'INRA-BEF a piloté, sur le site d'étude de Bure en forêt domaniale de Montiers (55), une campagne de mesures concernant 32 hêtres et 23 érables pour tester l'effet d'un gradient de sol, mais aussi 5 hêtres et 5 chênes de réserve de TSF ainsi que 8 bouleaux, 10 charmes, 9 érables champêtres et 7 trembles parmi les arbres de taillis du TSF.

Suite à ces premières données, un second échantillonnage a été décidé en décembre 2009 par le comité de pilotage pour élargir le spectre en essences, domaine géographique et conditions de croissance. La seconde

campagne de terrain a été pilotée par l'INRA-LERFoB et l'ONF sur 4 régions contrastées avec des questions complémentaires :

- près de Nancy (54), en forêt de Champenoux, un gradient de sylviculture et d'âge a été testé sur chêne sessile avec 6 arbres d'une expérimentation IDF dans un perchis (3 arbres détourés et 3 témoins) ainsi que 12 arbres d'un dispositif d'éclaircies INRA pour deux densités contrastées, avec ou sans fourche, et 3 gros arbres de réserve de TSF;
- près de Manosque (04), en forêt de Pélicier, 3 stades de développement du chêne vert ainsi qu'un vieux peuplement de pins d'Alep ont été ciblés. Pour ces essences à feuillage persistant, le protocole a été adapté afin de mesurer la biomasse et la minéralomasse des feuilles et aiguilles;
- près d'Eauze (32), 4 sites ont été sélectionnés pour les essences : aulne, robinier et chêne pubescent (8 arbres chacun) en forêt communale d'Estang et en forêt privée sur la commune de Montréal, mais aussi des eucalyptus en deuxième rotation d'un TCR en forêt privée sur la commune de Castelnau d'Auzan (3 brins par cépée, pour 6 cépées);
- enfin en forêt domaniale de Saint Gobain (02), d'autres essences ont été choisies : tilleul, bouleau, frêne, aulne (toujours 8 arbres par essence).

Ces campagnes de terrain ont été les premières occasions d'échanges techniques sur les protocoles : INRA BEF et LERFoB en 2009, puis tous les partenaires en 2010 (voir l'encadré en fin d'article). Elles ont permis par ailleurs de partager les méthodes et les échantillons avec un autre projet de recherche du même appel d'offre ANR : le projet Sylvabiom « *Nouveaux concepts de cultures ligneuses durables pour la production de biomasse à des fins énergétiques* » piloté par l'INRA d'Orléans et qui échantillonnait des essences complémentaires :

Cupressocyparis leylandii, *Sequoia*, TTCR de peuplier, jeunes mélèzes et jeunes douglas. Ces échanges ont débouché en particulier sur les recommandations de protocoles fournies dans le manuel sur la construction des équations allométriques édité en 2012 par la FAO et le Cirad (Picard et al. 2012).

Les opérations de terrain : démontage, tri, mesures de cubage, pesées...

Après des mesures classiques d'arbres debout (c130, hauteur), l'arbre était abattu sur une zone dégagée afin de repérer, découper et trier l'ensemble des branches et du tronc. À Eauze, les houppiers des chênes pubescents, particulièrement imbriqués, ont obligé à une découpe de certaines branches avant l'abatage (figure 4). Ensuite les menus bois étaient rangés en fagots par découpe 0-4 cm ou 4-7 cm (figure 5) afin d'être pesés, de même que les billons de la tige, à l'aide d'un peson soulevé par une pelleuse ; la tige ainsi que les branches au-delà des coupes 7 cm étaient cubées plus complètement et enfin les billons de branches pesés sur une balance (figure 6).

De plus, les sempervirents (chêne vert et pin d'Alep dans le Sud et eucalyptus dans le Sud-Ouest) ont demandé un effeuillage systématique afin de séparer le poids des menus bois du poids des feuilles ou aiguilles (figure 7). Quant aux aulnes, leurs fruits le plus souvent persistants ont nécessité aussi un traitement particulier.

... et prélèvements suivis d'analyses en laboratoire : gros effort pour la minéralomasse

Enfin tout le travail de découpe et de tri s'accompagnait de prélèvement de rondelles et de tronçons de branches pour des mesures en laboratoire (figure 8). À partir de ces prélèvements en forêt, des échantillons standardisés ont été préparés au laboratoire INRA-BEF : séparation

du bois et de l'écorce pour les troncs et branches, nouvelle sélection de morceaux de rondelles et de tronçons pour préparer des échantillons composites représentatifs de la tige ou des branches entières et par découpe (>7 cm, 4-7 cm et 0-4 cm), en séparant bois ou écorce au-delà de 7 cm de découpe.

En comptant les arbres du projet Sylvabiom, 369 arbres ont ainsi été traités en 4 ans, soit 3191 échantillons pesés afin d'en déterminer la densité, puis broyés finement pour les analyses minérales (figure 9). La composition minérale de 1 400 de ces échantillons a été déterminée par méthode traditionnelle (C, N, Ca, K, Mg, P, S, Al, Mn et Na) et l'ensemble a été passé au scanner proche infra-rouge. Cela a permis, à partir d'une première calibration sur les 1 400 premiers échantillons, d'estimer indirectement, mais de façon rapide la composition minérale de tous les autres.

Combinées à la biomasse par compartiment, les concentrations minérales ainsi obtenues permettent d'attribuer à chaque partie de l'arbre la quantité correspondante des éléments minéraux présents, et donc de calculer des exportations pour différents scénarios d'exploitation selon les hypothèses de coupes.

Des mesures tests avec de nouveaux outils

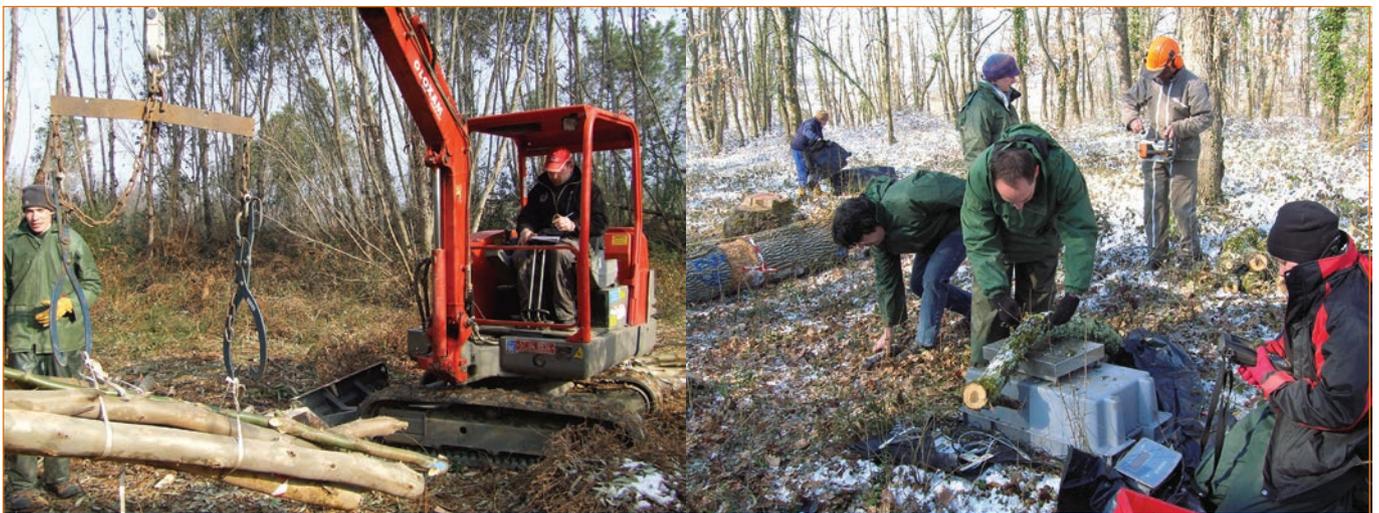
Par ailleurs des mesures ont été faites au scanner laser terrestre sur une partie des arbres avant leur abattage afin de tester cette nouvelle méthode de mesure automatique sur arbres debout (voir les deux derniers articles de ce dossier).

Enfin un sous-échantillon de rondelles de tiges et de branches a été sélectionné pour des mesures en laboratoire avec le scanner à rayon X de l'INRA-LERFoB, afin d'en déduire des cartes de densité plus détaillées (cela fera l'objet d'un article dédié dans le prochain dossier).



EMERGE

Fig. 5 : pour chaque arbre, tri des branches par découpe, mise en fagots des découpes 0-4 cm et 4-7 cm, billonnage et prélèvement de rondelles de tronc pour les mesures en laboratoire (forêt de Saint-Gobain)



EMERGE

Fig. 6 : mesures de biomasse des billons et fagots avec peson levé par pelleteuse en FD de Pélacier ; mesures et pesées des branches ($\varnothing \geq 7$ cm) par l'équipe LERFoB près d'Eauze (32)



EMERGE

Fig. 7 : effeuillage sur pin d'Alep à Manosque



EMERGE



Fig. 8 : prélèvement d'échantillons dans chaque compartiment et tout le long du tronc et des branches principales

Ces données sont elles aussi archivées et mises en base, mais selon des modalités distinctes, dans le groupe plus restreint des partenaires impliqués dans ces travaux sur les scanners.

Les données de la plateforme EMERGE : un véritable trésor

Au-delà des mesures et échantillons eux mêmes, obtenus pendant les deux campagnes de terrain, ce travail conséquent nous a fait aussi réaliser la richesse des anciennes données compilées dans la base EMERGE. La seule campagne 2010 a monopolisé, pour 125 arbres, près de 350 hommes/jours pour 249 tonnes manipulées, pesées sur le terrain grâce à la pelleteuse et environ 5 tonnes d'échantillons ramenés aux laboratoires. Cette comptabilité globale ne rend cependant pas compte de la grande disparité de temps passé selon les arbres, puisqu'il ressort des données détaillées une relation exponentielle entre la taille de l'arbre et le temps cumulé de mesure : le foisonnement des houppiers de gros arbres fait exploser le temps nécessaire à la séparation des branches et des menus bois par découpe, aux pesées puis aux prélèvements d'échantillons. La projection de cette relation sur les données des anciennes fiches INRA qui comportent des mesures de menus bois permet d'estimer le temps de terrain correspondant à environ 18 800 hommes.jours. Certes le protocole Oudin n'intégrait pas de prélèvement d'échantillons, mais toutes les opérations de terrain étaient manuelles, sans tronçonneuse ni pelleteuse ! L'estimation des temps passés par nos prédécesseurs est donc plutôt en deçà de la réalité de ce travail colossal.

En ce qui concerne les mesures de minéralomasse, les projets Sylvabiom et EMERGE ont permis de traiter 369 arbres en 4 ans, pour une base initiale de 1367 arbres constituée sur 30 années. Comme pour les volumes, les chiffres ne sont pas strictement comparables, mais montrent une montée en puissance sur ces données.

Des données complémentaires à différentes échelles

Une garantie de robustesse pour les travaux de modélisation

L'idéal serait d'avoir des mesures et des échantillons pour toutes les essences, toutes les conditions de croissance, les stades de développement, les périodes d'observation, et pour toutes les variables évoquées précédemment. Mais toutes ces variables n'ont été renseignées simultanément que pour les 226 arbres des deux campagnes de terrain, et la comptabilité précédente en hommes.jours montre qu'il n'aurait guère été possible d'en mesurer plus pendant le projet. L'échantillon qui en résulte paraît cependant bien pauvre pour représenter la variabilité des essences et des conditions de croissance de la ressource française. À l'opposé, cette représentativité est le point fort des données de l'Inventaire forestier, mais seulement pour un nombre réduit de mesures dendrométriques (encadré protocole IFN).

Tout l'enjeu des travaux de modélisation et des bases de données intermédiaires (bases de données gestion et recherche) est alors de construire des ponts entre ces données extrêmes. L'idée est de choisir pour une grandeur d'intérêt, une forme de modèle en limitant les variables explicatives. Ce travail peut se faire sur des données détaillées du type recherche, qui permettent de sélectionner la forme de modèle la plus appropriée puis d'en réduire le nombre de variables. Dans un deuxième temps la variabilité du modèle ainsi réduit est explorée sur les données moins détaillées, mais avec une représentativité plus large, comme les données d'inventaire ou de gestion : les paramètres du modèle sont associés à ces variables de contexte. Enfin le modèle final est testé sur d'autres données indépendantes. Les données des campagnes du projet sont plus particulièrement destinées, d'une part, à croiser les

grandeurs d'intérêt volume, biomasse ou minéralomasse et, d'autre part, à explorer des cas atypiques, peu représentés dans les échantillons précédents pour tester les modèles.

Les points de complémentarité

Dans l'esprit de ces travaux, la puissance des données réunies dans la base EMERGE réside en particulier dans leurs complémentarités. La première concerne la représentation des essences : si les données IFN détaillent plus de 60 essences forestières, celles de la gestion en distinguent une trentaine quand les données plus fines de recherche n'en comptent qu'une douzaine. Par ailleurs, pour les simples volumes, la mutualisation des données de type gestion a permis aussi d'enrichir la gamme avec quelques essences peu documentées dans les bases de l'ONF, comme les châtaigniers de l'IDF ou les peupliers de FCBA.

La deuxième complémentarité est évidemment géographique avec une portée toujours nationale des données IFN, tandis que les données recherche sont focalisées sur quelques sites bien connus et les données gestion sur des massifs « gérés ». Une étude ciblée sur le chêne ligérien a montré que l'addition des différentes bases couvre quasiment toutes les forêts significatives de la zone ligérienne.

La troisième complémentarité est temporelle. Les fiches anciennes de l'INRA couvrent principalement, pour les mesures les plus complètes, la période de 1920 à 1950, tandis que les données de gestion ont été plutôt recueillies entre les années 70 et la fin du 20^e siècle, avec un pic de mesures dans les années 80. Les données de biomasse et minéralomasse, plus récentes, démarrent à la fin des années 70, avec une montée en puissance dans le cadre du projet. Cette complémentarité dans le temps pourrait permettre d'analyser par exemple des aspects fins de changement de forme des arbres



Fig. 9 : constitution d'échantillons standardisés pour les analyses minéralomasse sur les rondelles ou les menus bois, et à droite broyage fin des échantillons pour les mesures minéralomasse

reliés aux changements de productivité, même si ce type de question n'a pas du tout été abordé dans la courte période du projet.

Enfin la complémentarité des données par essence en terme de tailles a également été examinée, et c'est ce qui a conduit à mesurer spécifiquement des gros arbres de réserve de TSF lors des deux campagnes de terrain. Il apparaît en effet dans les données recherche, particulièrement pour les anciennes fiches de l'INRA, une forte représentativité des arbres de taille moyenne, même si quelques gros arbres de plus de 1 m de diamètre étaient échantillonnés. Par ailleurs, les relations entre hauteurs et circonférences des arbres, essence par essence, ont montré un décalage entre les données recherche et les données gestion : les arbres des fiches INRA évoquent des arbres plutôt de jeunes futaies, tandis que les arbres de gestion, typiquement ceux des bases ONF, sont plus représentatifs de futaies matures issues de conversion.

Quel avenir pour ce partage de données : conclusions et perspectives

L'ensemble de la base de données EMERGE est le socle des analyses et travaux développés dans les différents articles de ce dossier consacré à la restitution des principaux résultats du projet. Cependant, indépendamment des avancées qu'elle a permis d'obtenir, cette base est en soi un résultat majeur. Si notre projet ANR se termine en juin 2013, le partage

de données va se poursuivre, à la demande de tous les partenaires, aussi bien autour des données de volumes que de celles de biomasse et minéralomasse.

La combinaison des échelles, les complémentarités des types de variables abordées et des sources de variations ouvrent d'énormes possibilités de modélisations croisées et cohérentes. Les chercheurs pourront les utiliser et les compléter en fonction de nouvelles problématiques. Les retombées pour les gestionnaires, notamment à l'ONF, sont doubles : tout d'abord de nouveaux outils ou « tarifs » de cubage « intégratifs » ont été développés, d'autres sont en cours ou pourront être calibrés en fonction des besoins de l'établissement ; en outre le lien est établi avec le volume de référence IFN, base de nombreuses perspectives ressources à différentes échelles.

Par ailleurs, le travail de rassemblement des données et recueil de mesures complémentaires a donné une impulsion scientifique déterminante. Les deux campagnes de terrain ont été l'occasion des premières rencontres des différents groupes de chercheurs du projet pour le partage des protocoles ; ces groupes d'experts se sont ensuite consolidés pour échanger des réflexions approfondies autour des modèles et autres traitements de ces données.

Après avoir souvent travaillé essence par essence, la base permet maintenant d'avoir une approche plus « générique », c'est-à-dire d'explorer

les formes ou relations communes au moins aux résineux et aux feuillus, pour différentes variables de la dendrométrie classique. Au-delà des quelques résultats du projet, cette base ouvre donc un champ important en dendrométrie, mais aussi dans bien d'autres domaines.

La plateforme EMERGE pourrait aussi être vue comme une compilation hétéroclite de données recueillies avec des objectifs et selon des protocoles très différents, et qui n'aura jamais la force d'une base de données de même ampleur qui aurait été raisonnée d'emblée pour l'ensemble des objectifs poursuivis (...avec un protocole décidé en 1930 !). Cette difficulté méthodologique correspond aux ponts qu'il faut construire entre les bases à chaque question posée, première étape de la modélisation. De même, l'échantillon des deux campagnes de terrain reste limité et on peut se dire rétrospectivement qu'il aurait fallu mesurer plus de vieux douglas ou des merisiers de TSF... Mais les travaux du projet ouvrent aussi des perspectives intéressantes sur des moyens plus rapides (Lidar terrestre pour les volumes, scanner tomographique pour les biomasses, NIRS-MIRS pour les minéralomasses) d'obtenir les mesures d'arbres « atypiques » qui seront nécessaires pour tester encore les outils construits.

En définitive le projet EMERGE, et en particulier la base de données, apporte une pierre solide à l'édifice de la dendrométrie même s'il ne clôture pas complètement la question.

Christine DELEUZE

ONF, Département R&D

François MORNEAU

jusqu'en 2011 : IFN, direction technique puis ONF, Département R&D

Fleur LONGUETAUD

Laboratoire LERFoB-INRA, Champenoux

Laurent SAINT-ANDRÉ

Laboratoire BEF-INRA, Champenoux

Nina OGNOUABI

CRDPI, République du Congo

Alain BOUVET

FCBA, Direction Innovation Recherche

Remerciements

Nous voulons rendre hommage, pour leur contribution déterminante, à :

- toutes les personnes mobilisées dans la phase de terrain et citées dans l'encadré ci-contre ;

- l'équipe du CRDPI (Centre de Recherches sur les Plantations Industrielles), pilotée par Nina Ognouabi, pour la saisie numérique des anciennes fiches de l'INRA et du CTFT ;

- l'équipe d'analyse du laboratoire BEF, notamment Noëlle Bouxirot pour le traitement des échantillons après les campagnes de terrain ;

- *last but not least*, l'équipe qui a assuré la mobilisation des données, leur mise en base et leurs vérifications : Michaël Rivoire, Philippe Santenoise, Tristan Senga-Kiessé, Astrid Genet, Nancy Mendow, Isabelle Meurillon, Frédéric Mothe, Daniel Rittié, Antoine Colin, Cédric Maillet, Yannick Vivien.

Bibliographie

Oudin A. 1930. Vues d'ensemble sur l'organisation en France des recherches de sylviculture et d'économie forestière : Les méthodes. Annales de l'École nationale des Eaux et Forêts vol. 3, n° 2 pp. 231-262

Hüffel G., 1919. Économie forestière, tome II. 2^e édition. Paris : La Maison Rustique, 502 p.

ONF (collectif), 1972. Protocole national pour le cubage d'arbres-échantillons. Paris : ONF (documentation technique). 34 p.

ONF (document de travail), 1983. Nouveau protocole pour le cubage d'arbres – échantillon. Paris : ONF (documentation technique). 27 p.

Meurillon I., 2009. Les anciennes données de cubage des surbilles de l'Inventaire Forestier National. Rapport de stage en entreprise – 1^{ère} année d'ingénieur FIF, 19^e promotion. Nancy : AgroParisTech 42 p. + annexes

Picard N., Saint-André L., Henry M., 2012. Manuel de construction d'équations allométriques pour l'estimation du volume et la biomasse des arbres : de la mesure de terrain à la prédiction. Rome, Montpellier : FAO, CIRAD. 218 p.

Une mobilisation importante sur le terrain pour les deux campagnes 2009 et 2010

Cet article est l'occasion de remercier l'ensemble des personnes mobilisées sur le terrain pour réaliser les mesures de cubage et les récoltes d'échantillons pour la biomasse et la minéralomasse.

Grand merci, donc :

- aux pilotes de ces deux campagnes, à savoir Astrid Genet en 2009 et Nancy Mendow en 2010,
- aux personnels R&D de l'ONF mobilisés début 2010 pour la recherche des peuplements répondant au second échantillonnage, exigeant et réparti sur 4 régions contrastées en France : Jérôme Bock, Jean Ladier, Philippe Desplanches et Gwénaëlle Gibaud,
- aux personnels ONF qui nous ont accueillis dans leurs UT et triages,
- aux responsables des agences travaux ONF et aux ouvriers mobilisés dans chaque région pour l'abattage et toutes les manutentions nécessaires au protocole : l'ensemble des chercheurs du projet a salué leur professionnalisme, s'adaptant aux contraintes des mesures et des prélèvements,
- aux équipes des laboratoires BEF et LERFoB réceptionnant les échantillons et assurant ensuite leur traitement,
- à Emmanuel Cornu, INRA-LERFoB, enfin, pour son implication dans les campagnes de terrain, notamment pour les mesures du laser terrestre, et dans le travail sur les scans pour assurer leur exploitation.

Les équipes ont d'autant plus de mérite que, dans chaque région sauf à Saint-Gobain, elles ont été accueillies par une tempête de neige qui a compliqué ou retardé le démarrage des campagnes.

Équipe de terrain multi-partenaires, ici dans la forêt communale de Montreal (Gers)



Les coefficients d'expansion pour déduire différents volumes de branches à partir de volumes de tige

La mesure du volume des houppiers des arbres est extrêmement laborieuse alors que la valeur commerciale du bois est faible. Cependant il est de plus en plus nécessaire d'estimer correctement ces houppiers en volume et en biomasse dès lors qu'on envisage de les valoriser à des fins énergétiques. De même, lorsqu'il s'agit d'évaluer les quantités de carbone stockées en forêt : les inventaires forestiers nationaux sont bien armés pour estimer des volumes de tiges, mais les volumes des houppiers sont estimés souvent indirectement.

Dans les deux cas, une méthode possible est d'attribuer au houppier une proportion du volume de tige ou de grume estimé par ailleurs, c'est-à-dire que l'on suppose que l'accroissement total de volume de l'arbre est relié à l'accroissement de sa tige et que l'on peut expliciter cette relation.

Cet article se propose d'éclairer cette relation entre volume de tige et volume de houppier, plus complexe qu'il y paraît et qui peut donner lieu à de multiples définitions. En explorant deux définitions assez usuelles, l'une en recherche, l'autre en gestion, il se propose aussi de donner des ordres de grandeurs par essence et contexte et surtout d'analyser les sources principales de variation.

Différentes définitions des coefficients d'expansion ou des coefficients de houppiers

Les coefficients d'expansion et les coefficients houppiers sont des coefficients de passage entre deux grandeurs : une mesure de tige ou de grume facilement accessible, ou

en tout cas estimée de manière assez fiable, et une mesure de l'arbre entier plus délicate à appréhender. Cette première définition très générale peut donner lieu à une multitude de déclinaisons plus précises qui concernent des rapports entre différentes parties de l'arbre, à spécifier rigoureusement, mais aussi entre différentes unités de mesure : volume, biomasse humide, biomasse sèche, stères, volumes ou plutôt tonnages de plaquettes forestières (à une humidité donnée)... Il existe alors des coefficients de conversion (encombrement, masse volumique, densité sèche, carbone) d'une unité à l'autre, mais avec aussi la limite d'en connaître la définition exacte, le domaine de validité, la fiabilité. Nous

ne traitons dans cet article que des coefficients destinés à l'estimation des volumes.

Quel volume de référence ?

Le volume de tige est la référence à partir de laquelle on cherche à calculer le volume total. Mais la tige, et donc son complémentaire le houppier, peut être définie de différentes manières selon les usages.

Pour les estimations d'inventaires nationaux, le volume de la tige est généralement géométrique (encadré 1) et défini selon la découpe de tige en vigueur. En France, c'est la découpe dite « bois fort » qui est utilisée par l'Inventaire forestier national : 7 cm de diamètre (sur écorce) avec un

1-Volume commercial et volume géométrique d'une grume

Le **volume commercial** est, par convention, le volume d'un cylindre de même longueur que la grume arrêtée à la découpe commerciale, traditionnellement 20 cm pour feuillus et 14 pour résineux, et dont la section correspond à la section médiane de cette grume : méthode de calcul connue aussi bien en France qu'à l'étranger sous le nom de formule de Huber, inspecteur forestier bavarois du 19^e siècle (Pardé et Bouchon, 1988). NB : au-delà de la formule de cubage, cette convention correspond notamment au calcul standard des « volumes présumés sur écorce » des coupes (qui permet entre autres l'agrégation d'estimations homogènes).

Le volume exact est le volume d'eau qui serait déplacé en plongeant la grume dans une cuve. Ce volume peut être approché par le calcul du **volume géométrique**, en supposant que la grume est un assemblage de billons coniques successifs le long de la tige. Plus les mesures de circonférence le long de la tige sont rapprochées, plus ce volume par troncs de cônes se rapproche du volume exact.

Il est possible de calculer des correspondances entre ces deux volumes pour les formes simples (Pardé et Bouchon, 1981) : pour un cylindre ou un paraboloïde de révolution par exemple, les deux volumes sont équivalents, tandis que le volume commercial est en deçà du volume géométrique pour les formes de cônes ou néloïdes de révolution. Dans le cas des données INRA, soit plus de 7 500 arbres pour lesquels on a les profils complets des tiges, le volume géométrique est approché par des cônes de un mètre et nous l'avons comparé, à découpe équivalente (20 cm pour feuillus et 14 cm pour résineux), avec le volume commercial. Pour les feuillus, le volume commercial est globalement très légèrement supérieur au volume géométrique de 2 %, tandis que la tendance est inverse pour les résineux et du même ordre de grandeur (2 %).

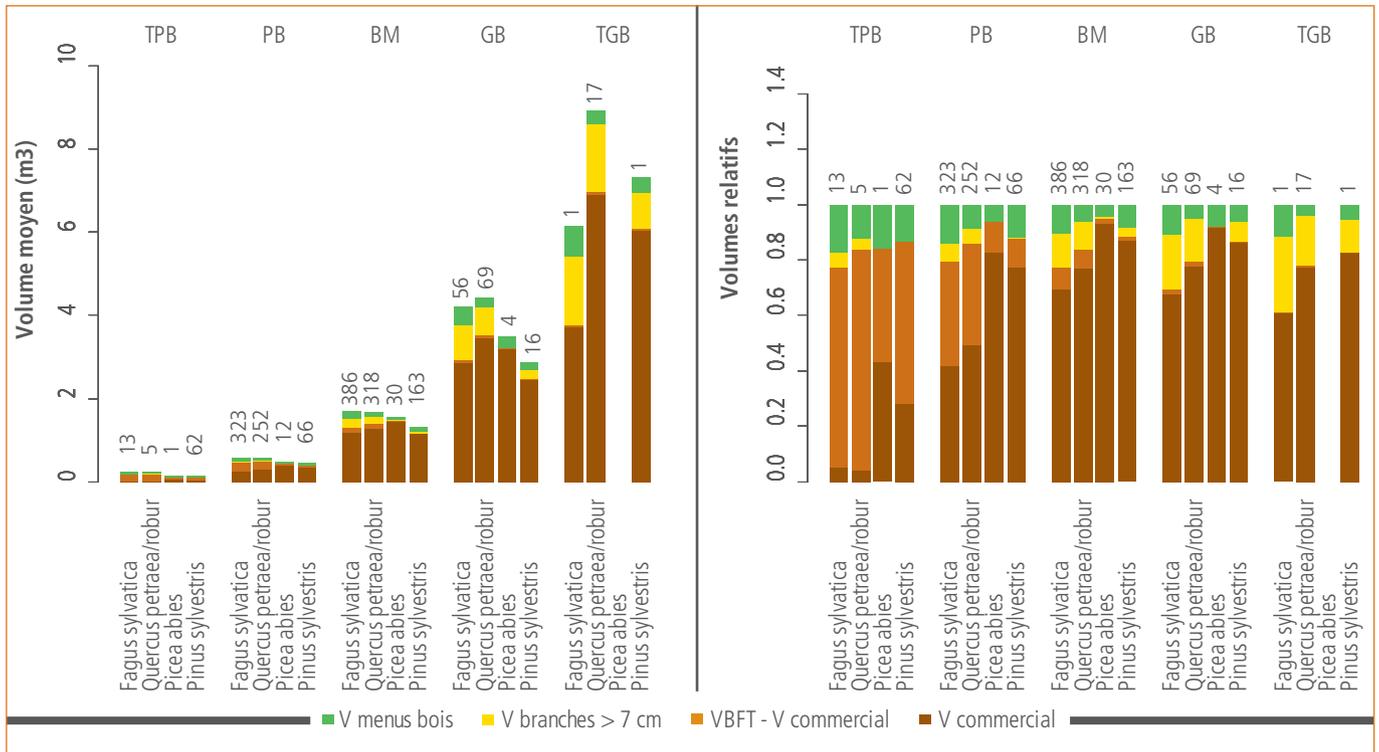


Fig. 1 : répartition des volumes géométriques de l'arbre moyen de chaque catégorie de grosseur, pour 4 essences (hêtre, chêne, épicéa et pin sylvestre), en valeur absolue (à gauche) et en proportion (à droite)

Diamètre à 1,30 m : 7,5 < TPB ≤ 17,5 < PB ≤ 27,5 < BM ≤ 47,5 < GB ≤ 67,5 cm < TGB).

En marron foncé le volume de la tige jusqu'à la découpe commerciale (14 cm pour les résineux et 20 cm pour les feuillus); en marron clair, la surbille de tige (découpe 7 cm); en jaune le volume des branches jusqu'à la découpe 7 cm; en vert le volume des menus bois. Dans notre échantillon (2495 arbres INRA ayant à la fois des analyses de tiges et des mesures de menus bois, voir tableau 1), il n'y a pas de TGB d'épicéa.

calcul standardisé du volume. Mais il existe d'autres définitions du volume de tige (Gschwantner et al., 2009) : sur 24 pays européens par exemple, la découpe 7 cm n'est utilisée que par 6 pays en tout, tandis que la plupart des autres pays définissent la tige jusqu'à l'apex (découpe 0 cm); il existe aussi quelques cas de découpes à 5 ou 7,5 cm. La différence est marginale pour les gros arbres mais elle a un impact certain pour les plus petits.

Pour les estimations en gestion, le volume de référence est plutôt le volume dit « commercial » (encadré 1) et dépend des habitudes de commercialisation. À l'ONF, le volume annoncé des tiges de la catégorie « arbres » s'arrête traditionnellement à la découpe 20 cm pour les feuillus et à la découpe 14 cm pour les résineux, la catégorie « arbres » commençant à 25 cm de diamètre à 1,30 m (D130) en général, ou 30 cm

pour hêtre et chênes (depuis 2008, la définition des catégories et découpes pour le calcul du « volume présumé sur écorce » est du ressort de chaque direction territoriale).

Quel volume de houppier ?

Une fois le volume de référence défini, le houppier correspond à son complémentaire : surbille, branches et menus bois (découpe 0 à 7 cm). Souvent on ne considère que la partie bois fort. Sur l'exemple des données du projet, la figure 1 montre comment se répartit le volume géométrique des différentes parties d'arbre. Par définition, le volume à découpe commerciale n'apparaît réellement qu'avec les bois moyens (BM); le volume des très petits et petits bois (TPB et PB, qui n'entrent pas encore dans la catégorie « arbre » définie précédemment) réside surtout dans la tige bois fort. Il n'y a quasiment pas de volume de branche pour les résineux sauf pour les très gros bois

(TGB) de pins (pas d'épicéas en TGB dans ces données). En absolu, la part de volume dans le houppier (au sens surbille, branches et menus bois) est assez faible avant la catégorie gros bois (GB) mais elle est énorme en proportion pour les plus petits arbres. De même, les menus bois augmentent avec la taille totale de l'arbre, mais représentent finalement une proportion plus importante pour les plus petites tiges.

Quelle échelle de calcul : l'arbre, le lot, le peuplement ou la ressource ?

La plus grande source de confusion réside enfin dans l'échelle d'application de ces coefficients. Nous avons implicitement raisonné jusqu'ici à l'échelle de l'arbre. Cependant des travaux de tous ordres évoquent des coefficients d'expansion et de houppiers à une échelle globale : celle de la coupe, du peuplement, voire de la ressource.

À l'échelle de la ressource nationale, le premier choc pétrolier des années 70 a conduit la littérature scientifique à se pencher sur ces coefficients afin de déduire, au niveau régional ou national, les quantités de biomasse de branches qui seraient disponibles à des fins énergétiques. Dans les années 2000 s'est ajouté l'objectif d'estimer des quantités de carbone stockées dans les forêts dans le cadre de la réduction des émissions de gaz à effets de serre (protocole de Kyoto). À cette large échelle, les outils sont semblables et visent à utiliser les évaluations de volumes de tiges des inventaires forestiers régionaux ou nationaux pour en déduire une quantité totale de biomasse ou de carbone (voir encadré 2).

À l'échelle des parcelles ou lots de vente, le gestionnaire utilise d'autres coefficients pour estimer les co-produits, valorisables en énergie ou trituration, de la récolte principale de grume. À l'ONF on utilise des coefficients de houppier applicables à la parcelle ou à des lots d'arbres à partir d'une certaine catégorie de grosseur, pour estimer des volumes de surbille et branches, à partir de volumes commerciaux de grume.

Des coefficients au final très variables

On voit bien, en évoquant les divers usages des coefficients d'expansion, qu'ils peuvent refléter des objets très différents. Or si les définitions sont explicites dans les articles scientifiques, elles sont le plus souvent sous-entendues dans les autres documents et il est parfois très difficile de savoir sur quelle référence ou selon quelle unité sont établis les coefficients. Il est donc très délicat par exemple de les comparer ou de les réutiliser.

Par ailleurs, ces coefficients d'expansion varient avec la taille et l'âge des arbres, aussi bien au niveau individuel, qu'au niveau du peuplement. Ils dépendent beaucoup de l'essence et sont en général plus forts pour les

2-Les coefficients d'expansion à l'échelle de la ressource : exemple des travaux CARBOFOR en France

À l'échelle de la ressource française, le projet CARBOFOR (Loustau, 2004 et 2010) a exploré le mode de calcul des stocks de carbone en forêt de métropole. Ce travail a permis de calculer des coefficients d'expansion globaux pour les résineux (1,33) et pour les feuillus (1,61). Le calcul s'est fait à l'échelle globale de la ressource française en prenant le rapport entre un volume total aérien d'un côté et un volume total bois fort tige de l'autre, chacun estimés indépendamment à l'échelle de toute la ressource française par des tarifs de cubage (tarifs Vallet *et al.*, 2006 pour le volume total et tarifs de l'inventaire forestier national pour les volumes bois fort de tige; voir encadré du volume de référence IFN de l'article précédent).

Ces coefficients globaux, applicables uniquement aux volumes tels que définis par l'Inventaire forestier, reflètent à la fois la variation du coefficient individuel d'expansion en fonction de la taille de l'arbre ou de l'essence, et la façon dont la ressource se répartit en composition, en localisation sur le territoire ou avec d'autres facteurs. La figure 5 explique bien par exemple que si la part en volume des gros et très gros bois augmente au niveau de la ressource nationale, les coefficients moyens des groupes d'essences augmenteront, notamment celui des feuillus. À noter aussi que le seuil de recensabilité (tiges de plus de 7,5 cm diamètre dans le cas de l'Inventaire forestier national) a un impact important sur le coefficient global d'expansion puisque, s'il est augmenté, les plus petits arbres qui ont les proportions les plus fortes en houppier ne sont plus comptabilisés.

Ces coefficients globaux ne peuvent donc pas être utilisés directement pour un arbre ou un peuplement car ils évoluent avec la répartition en essence, en âge et en taille de la ressource française (en voir l'illustration dans l'IF n° 27). Dans la pratique, les estimations périodiques des stocks de carbone à l'échelle de la ressource sont réalisées avec les tarifs de cubage du volume total, ce qui permet d'intégrer l'évolution de la ressource nationale. Les coefficients d'expansion moyens feuillus et résineux peuvent être recalculés *a posteriori*.

feuillus que pour les résineux, et enfin ils peuvent varier avec les conditions de croissance : localisation, densité du peuplement, sylviculture. L'ordre de grandeur de ces variations tous facteurs confondus pour le rapport entre volume total et volume de tige (VEF présenté ci-après) peut aller par exemple de 1,15 à 3.

Les deux définitions retenues dans le cadre du projet EMERGE

La profusion des définitions vient notamment du manque de données accessibles pour aborder la question. Les mesures de houppier sont extrêmement laborieuses, surtout pour les plus gros arbres, du fait du foisonnement des branches et de la segmentation nécessaire à l'approche du volume. Il est donc parfois plus facile de mesurer des objets agrégés au niveau d'une

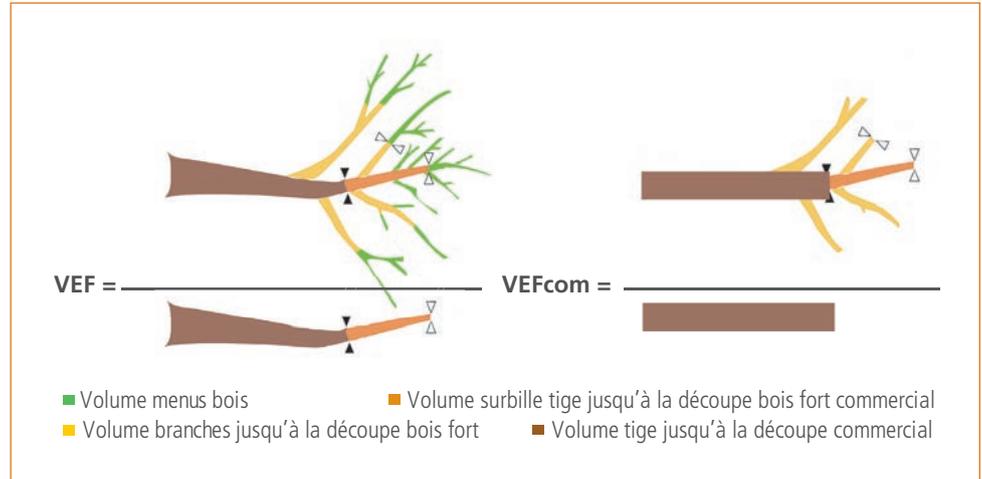
parcelle exploitée (piles de bois enstérées, camions de plaquettes sortis du bois...). Le volume de référence est alors souvent donné par l'estimation commerciale (grumes), mais elle peut tenir compte de découpes particulières, fonction de défauts locaux des tiges, et il arrive qu'il y ait un écart entre les arbres inventoriés par une coupe et ceux réellement sortis. Enfin, si on estime les menus bois d'après les plaquettes sorties de parcelle, il faut se rappeler que l'exploitation peut en laisser une partie sur le sol.

Deux définitions correspondant à des usages différents

Il ne s'agit pas dans cet article d'aborder toute cette complexité, mais d'explorer deux définitions simples de ces coefficients avec les données du projet et d'étudier leurs variations selon l'essence, la taille et la morphologie des arbres :

Fig. 2 : représentation schématique des deux définitions de coefficient de passage de la tige au houppier choisies pour cet article

Le coefficient d'expansion (VEF) permet de passer du volume bois fort tige au volume total d'un arbre (branches et menus bois compris); le coefficient de houppier (VEFcom), utilisé plutôt en gestion, permet de passer du volume commercial grume au volume total bois fort (sans les menus bois.).



Genre et espèce	Données avec mesures de menus bois				Données avec profils complets de tiges				Données complètes terrain du projet EMERGE			
	Nb d'arbres	Panel de D130 (cm)	Panel de Htot (m)	Panel de volumes (m³)	Nb d'arbres	Panel de D130 (cm)	Panel de Htot (m)	Panel de volumes (m³)	Nb d'arbres	Panel de D130 (cm)	Panel de Htot (m)	Panel de volumes (m³)
Feuillus												
Acer pseudoplatanus					6	25-39	16.5-23.5	0.43-1.26	23	12-43	16.3-22.9	0.10-2.15
Alnus sp.									16	24-49	17.7-28.0	0.57-2.95
Betula sp.	16	12-31	14.7-28.5	0.08-1.02	7	21-30	19.0-28.5	0.31-0.92	13	10-52	10.1-28.9	0.04-3.94
Carpinus betulus	77	8-38	11.3-30.0	0.03-2.38	62	20-48	15.7-30.0	0.23-2.46	2	19-30	18.2-22.9	0.30-1.04
Carya tomentosa					11	20-29	19.5-25.5	0.30-0.86				
Fagus sylvatica	1987	7-79	5.5-42.5	0.01-7.46	2367	20-107	13.7-44.0	0.25-20.08	34	11-76	16.8-27.1	0.08-10.72
Fraxinus excelsior	115	8-43	11.5-26.7	0.04-2.47	167	20-58	19.8-32.1	0.34-4.79	8	26-65	20.6-29.9	0.74-7.36
Juglans nigra					14	23-36	21.0-26.3	0.38-1.32				
Populus tremula									2	22-30	21.8-25.9	0.58-0.95
Quercus ilex									23	7-20	4.2-10.4	0.01-0.22
Quercus palustris	24	7-24	8.9-16.5	0.02-0.44	10	21-27	15.0-20.0	0.24-0.52				
Quercus petraea/robur	1748	7-102	6.0-40.0	0.02-18.12	2489	20-118	12.0-42.5	0.23-19.96	24	18-94	16.2-32.8	0.20-13.04
Quercus pubescens									8	22-46	16.5-20.4	0.46-2.01
Quercus rubra	110	7-35	10.9-23.5	0.03-0.96	26	20-35	15.8-25.0	0.29-0.91				
Robinia pseudoacacia									8	15-24	20.1-23.5	0.19-0.55
Tilia sp.									7	21-43	22.9-25.1	0.54-2.89
Résineux												
Abies alba	1095	7-90	6.9-37.8	0.02-10.25	569	14-103	10.5-39.5	0.11-12.60				
Abies nordmanniana	40	7-38	3.5-27.0	0.02-1.62	6	18-35	16.0-24.0	0.20-1.17				
Abies sp.					6	16-37	16.8-21.5	0.19-1.21				
Cedrus atlantica/libani					9	21-68	15.1-34.4	0.26-5.22				
Larix decidua	92	9-42	9.0-25.6	0.04-1.95	42	19-52	15.0-26.8	0.24-2.44				
Picea abies	318	8-67	7.7-41.3	0.02-6.59	53	17-63	12.8-41.3	0.13-5.10				
Picea sitchensis	12	9-14	9.5-14.0	0.04-0.14								
Pinus cembra					7	32-54	13.4-16.0	0.57-1.68				
Pinus halepensis					109	15-50	10.7-21.5	0.09-1.76	8	18-64	10.9-17.7	0.17-3.52
Pinus laricio	158	13-51	13.3-33.4	0.08-3.68	87	14-81	15.9-38.0	0.14-9.30				
Pinus nigra	23	10-35	8.9-27.0	0.04-1.28	20	14-35	13.0-25.0	0.15-1.21				
Pinus pinaster	777	7-44	5.1-23.5	0.01-1.70	31	17-58	8.8-26.0	0.09-3.45				
Pinus strobus	32	8-36	7.9-25.0	0.03-1.34	3	21-36	17.0-25.0	0.31-1.25				
Pinus sylvestris	1012	7-71	9.4-29.3	0.02-7.70	1285	14-71	10.7-31.8	0.09-7.30				
Pinus uncinata	166	8-40	6.7-20.5	0.03-1.65	117	14-42	7.6-22.0	0.07-1.81				
Pseudotsuga menziesii	390	7-34	7.0-29.5	0.02-1.12	25	17-34	18.5-29.5	0.20-0.87				

Tab. 1 : ensemble des données de la base EMERGE utilisées dans cet article

Les fiches anciennes de l'INRA ont fourni : à gauche, 8192 arbres avec mesures de branches et de menus bois et, au milieu, 7528 arbres avec des profils de tige complets qui permettent de recalculer des volumes géométriques ou commerciaux à différentes coupes; 2495 arbres appartiennent à ces deux tableaux en même temps. À droite, les 176 arbres mesurés dans le cadre du projet, avec menus bois et profils complets de tige.

- VEF (Volume Expansion Factor) : c'est la proportion entre le volume total (V_{tot}) et le volume bois fort tige (VBFT), l'un et l'autre étant des volumes géométriques ; nous parlerons de « coefficients d'expansion » ;
- VEFcom : c'est le rapport entre un volume composite commercialisé (V_{Bftot} : volume commercial de tige+volume géométrique de surbille+volume géométrique des branches jusqu'à la découpe bois fort) et le volume commercial de tige (V_{com} : tige arrêtée à la découpe 20 pour les feuillus et découpe 14 pour les résineux) ; nous parlerons ici de « coefficients de houppier ».

La figure 2 illustre combien ces définitions reflètent des objets différents. La notion de coefficients d'expansion (VEF) est d'un usage courant en recherche et inventaire ressource tandis que celle de coefficients de houppier (VEFcom) s'approche plutôt des usages de gestion, comme valeur maximum du volume commercial ; nous reprenons d'ailleurs le terme

des gestionnaires, mais en italiques pour signaler à la fois la parenté et le distinguo.

Les données utilisées pour le calcul (modélisation)

Pour calibrer (ajuster) des modèles correspondant aux coefficients proposés en fonction de variables simples (essence, D130 et hauteur totale H_{tot}), on dispose de mesures détaillées pour plus de 13 000 arbres individualisés et localisés (tableau 1).

Ces données proviennent des anciennes fiches de mesures INRA (voir article précédent), avec parfois les mesures de menus bois, parfois les profils de tiges, parfois les deux informations. Les données incluent les menus bois datent d'avant les années 50, ce compartiment ayant été abandonné faute de moyens dans les échantillonnages plus récents. Autant que l'on peut le déduire du protocole (Oudin, 1930) et des distributions d'arbres, cette base de données est assez représentative d'arbres récoltés dans des peuplements gérés, mais avec plutôt

des peuplements réguliers type futaie. Tous les types d'arbres étaient échantillonnés et l'on comptabilise 9 % d'arbres fourchus, qui ont été explicitement mesurés (mesures des deux brins de fourche).

Les mesures réalisées pendant le projet ont ensuite servi à tester les modèles ainsi construits sur 176 arbres (représentant 12 feuillus et un résineux) sélectionnés pour représenter d'autres conditions, comme les réserves de taillis-sous-futaie, ou des essences peu représentées dans les fiches INRA.

Modélisation des coefficients d'expansion (VEF = $V_{tot}/VBFT$)

Dans un premier temps, nous avons travaillé sur les coefficients d'expansion (VEF), c'est-à-dire sur le rapport du volume total (tige, branches et menus bois) au volume de tige, découpe bois fort. Pour cette première définition, la modélisation nécessite des données arbres incluant les mesures de menus bois : elles

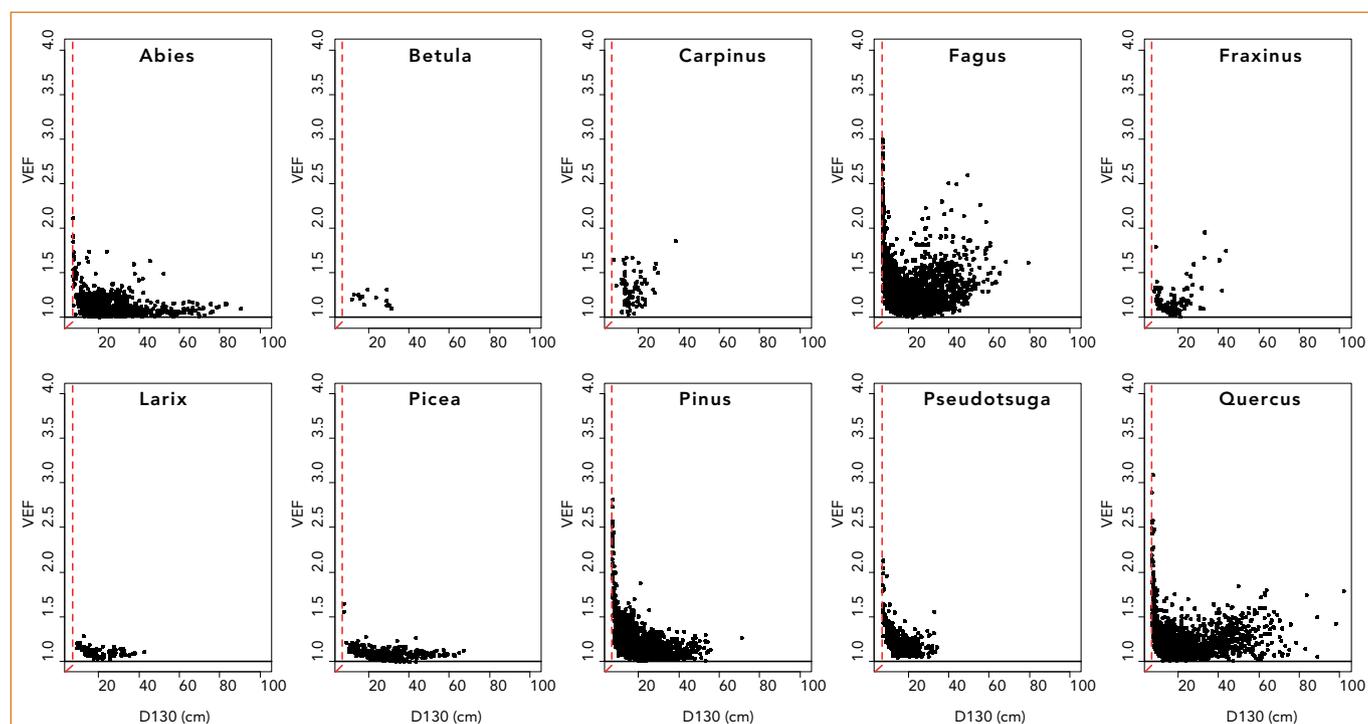


Fig. 3 : coefficient d'expansion (VEF) observé en fonction du diamètre à 1,30 m pour 10 genres bien documentés dans les données anciennes de l'INRA

Le pointillé rouge indique la limite de recensabilité de 7 cm en deçà duquel les volumes ne sont pas calculés.

sont disponibles pour 8 192 arbres représentant 19 essences, dont 10 sont assez bien représentées dans les données (figure 3).

Modélisation du coefficient d'expansion

Globalement les coefficients d'expansion peuvent être exprimés en fonction de la taille des arbres, donnée par le diamètre à 1,30 m et la hauteur totale (modèle n° 1). Pour les plus petits arbres, la part du volume tige est très faible par rapport au volume total et conduit à des coefficients importants. Une forme (équation) exponentielle décroissante permet de décrire cette première tendance en fonction du diamètre à 1,30 m. Ensuite le coefficient d'expansion semble passer par un minimum puis à nouveau augmenter pour les plus gros arbres. Plusieurs modèles ont été testés pour représenter cette tendance qui s'avère finalement dépendante de la forme plus ou moins trapue de l'arbre représentée par le rapport D_{130}/H_{tot}^2 (NB : la variable $\sqrt{D_{130}/H_{tot}}$ a été nommée « robustesse » (Patrick Vallet *in* Loustau, 2004)). En pratique cela se traduit par une augmentation du coefficient d'expansion quand, à hauteur équivalente, les arbres sont plus gros. Cet effet diamètre est cependant modulé par un effet élancement : à diamètre équivalent, les arbres plus grands ont une proportion de houppier plus faible que des arbres plus petits. En définitive, le coefficient d'expansion augmente pour les plus gros arbres à partir du moment où leur hauteur se stabilise. C'est donc plus qu'une simple augmentation proportionnelle du volume houppier avec le volume de la tige.

Le modèle fournit des paramètres par essence (ou par genre), avec une différence marquée entre les feuillus et les résineux : pour les plus gros arbres, les branches et menus bois représentent environ 30 % en moyenne du volume de la tige chez les résineux, tandis que chez les feuillus, ce volume atteint

80 %. De plus, l'amplitude de la base de données permet, avec des outils statistiques adaptés, d'obtenir des modèles génériques feuillus ou résineux servant à l'estimation des houppiers pour des essences non représentées, ou trop peu, dans ce jeu de données (on parlera dans la suite de l'article de feuillus moyens ou résineux moyens).

L'erreur quadratique moyenne obtenue pour ce modèle, sur toutes les essences, est globalement de 0,136 ce qui correspond à une erreur moyenne sur le volume total de 0,151 m³. C'est pour les bois moyens qu'elle est la plus faible (8,8 % d'erreur sur les volumes) et pour les catégories extrêmes qu'elle est la plus forte (figures 3 et 4) : l'erreur sur le volume total est de 12,9 % soit 0,005 m³ pour les très petits bois, tandis que sur les arbres de plus de 40 cm de diamètre elle est de 13,7 % soit 0,476 m³.

Illustration

À des fins d'illustration graphique, nous avons aussi ajusté une variante basée uniquement sur le diamètre (D130), et dont la figure 5 donne une représentation pour les essences du jeu de calibration, ce qui permet de comparer les tendances entre essences : l'augmentation de la taille du houppier par rapport à la tige dépend de la grosseur de l'arbre (D130), avec une pente plus de deux fois plus forte pour les feuillus que pour les résineux (respectivement 4,624 et 1,686).

Pour certaines essences dont l'échantillon de calibration était réduit, la tendance de la courbe au-delà de la zone de données (en pointillés sur la figure 5) peut paraître excessive : pour le douglas, par exemple, il faudrait refaire cet ajustement avec des arbres plus gros, l'échantillon d'avant 1950 étant représentatif d'une ressource qui venait juste d'être introduite. On s'attendrait pour cette essence à une courbe plus proche de celle de l'épicéa ou du mélèze. En revanche, le hêtre et les chênes

(tous chênes confondus dont une écrasante majorité de sessiles et pédonculés) bénéficient d'un échantillon étendu donc les résultats sont solides. Ils montrent que, toutes choses égales par ailleurs, la part de volume de houppier augmente plus fortement pour les gros hêtres que pour les gros chênes. Cela témoigne des facultés d'auto élévation du chêne, sans qu'il soit possible de tester un effet plus fin de l'espèce, la plupart des chênes n'étant pas distingués entre pédonculé et sessile dans le jeu de données anciennes.

Tests du modèle 1 sur les données indépendantes

Le modèle complet (modèle n° 1) a ensuite été testé sur les données de 176 arbres mesurés pendant les deux premières années du projet. Pour 5 essences, le modèle par genre était disponible : bouleau, charme, chêne sessile/pédonculé, frêne, hêtre. Pour les autres, on a utilisé les modèles feuillus moyens ou résineux moyens : cela concerne aulne érable sycamore, pin d'Alep, peuplier tremble, robinier, tilleul mais aussi chênes vert et pubescent car le modèle « chêne » (également testé) est ajusté sur d'autres espèces de *Quercus*. Sur ces données indépendantes (figure 4 à droite), l'erreur d'estimation est du même ordre que sur les données de calibration, cependant les arbres choisis permettent d'aller plus loin dans le diagnostic :

■ On constate tout d'abord que, lorsque le modèle spécifique d'une essence est disponible, il existe peu de différence entre le modèle de l'essence et le modèle feuillus ou résineux moyen. Ceci explique que le modèle moyen donne aussi de bons résultats pour les 7 essences pour lesquelles nous n'avons pas de modèle spécifique.

■ Le modèle « chêne » donne de bons résultats pour les chênes pédonculés et les chênes sessiles : si les données de calibration n'ont pas permis de distinguer les deux espèces dans le modèle, cela n'affecte pas la qualité de prédiction du coefficient d'expansion

$$VEF = \frac{V_{tot}}{V_{BFT}} = \underbrace{\exp(\beta_1 - D_{130})^{\beta_2 + b_2}}_{\text{Partie de forte décroissance pour les petits arbres}} + \underbrace{\exp(\beta_3 + \beta'_3 \cdot G + b_3) \cdot \frac{D_{130}}{H_{tot}^2}}_{\text{Asymptote pour les gros arbres qui augmente avec D130 et diminue avec Htot}} + 1 + \epsilon$$

Modèle 1 : modélisation du coefficient d'expansion à partir du diamètre D130 et de la hauteur totale de l'arbre Htot, donnés en mètres
 Le paramètre G sépare les feuillus (G=1) des résineux (G=0). Les paramètres b_n donnent les variations par genre des paramètres globaux β_n
 Les deux parties principales à gauche du modèle sont contraintes à être positives (sous forme d'exponentielle) assurant ainsi un total plus grand que 1, conformément à la définition « physique » du coefficient. ε représente l'erreur d'estimation.

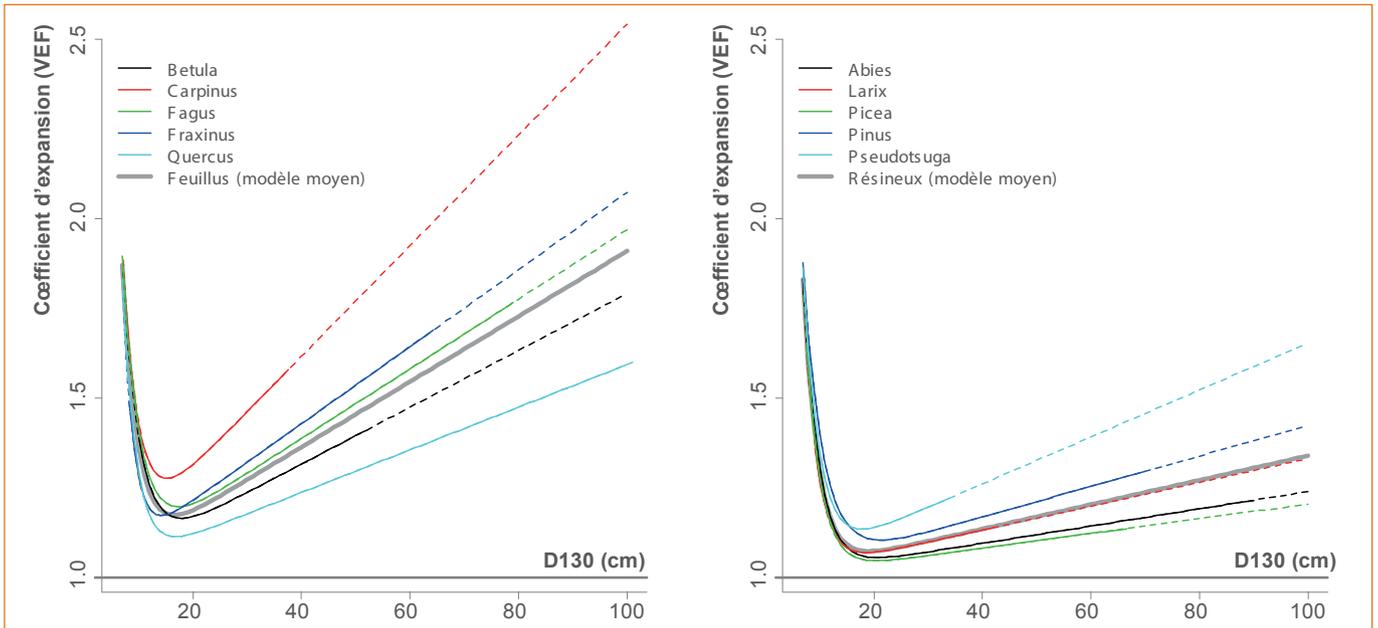


Fig. 5 : tendance moyenne des coefficients d'expansion en fonction du diamètre à 1m30 pour 10 genres

Les traits pleins présentent le modèle dans la zone où des données sont disponibles et les traits pointillés, son extrapolation en dehors de la zone de données. Les courbes grises correspondent au modèle 1 feuillus moyens (à gauche) ou résineux moyens (à droite).

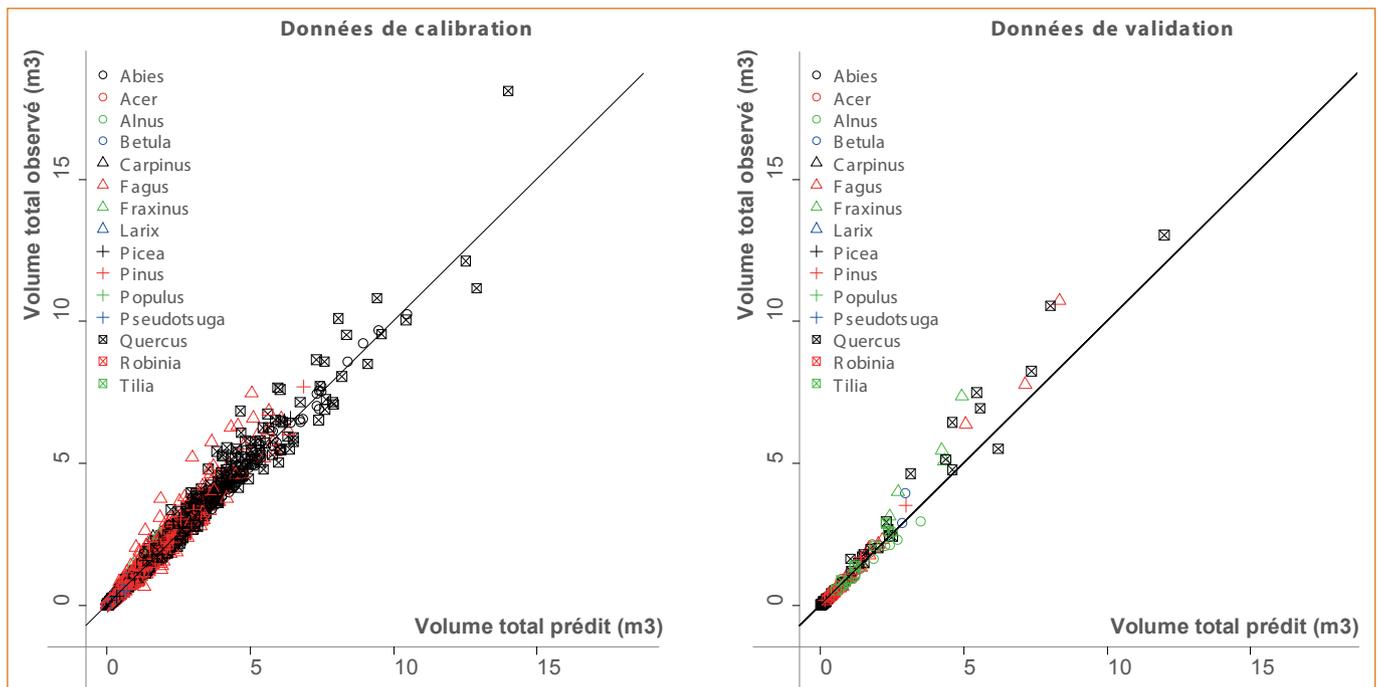


Fig. 4 : relation entre volume total prédit par le modèle de coefficient d'expansion (modèle n°1) et le volume mesuré, à gauche pour les données utilisées dans l'ajustement et à droite pour les données indépendantes

Les droites représentent le cas où les valeurs prédites et les valeurs mesurées coïncideraient.

sur les données test. Nous avons appliqué aussi ce modèle spécifique aux chênes vert et pubescent : il décrit très bien le chêne pubescent (sauf un fourchu dont il sous-estime le volume de houppier), en revanche il surestime la part de houppier des chênes verts, étant précisé que les feuilles avaient bien été séparées des menus bois. Le chêne vert a des particularités, des branches en général assez fines et un système d'élagage par branches entières, qui peuvent être à l'origine de sa différence de comportement d'avec les autres chênes.

■ Pour les chênes sessile et pédonculé ainsi que pour le hêtre, les plus gros écarts entre volume prédit et mesuré sont observés pour de très gros arbres, ceux de l'échantillon test qui ont été choisis dans des réserves de taillis-sous-futaie : le modèle sous-estime de 20 % environ leur volume total.

■ Par ailleurs, pour les hêtres et les érables, un gradient de sol a été échantillonné et le modèle ne montre aucun biais par rapport à ce gradient de fertilité. Les seules informations de taille, c'est-à-dire D130 et Htot, suffisent à représenter les variations de coefficient d'expansion le long de ce gradient.

■ Enfin on a échantillonné sur chêne sessile un gradient d'éclaircie, croisé à une information morphologique sur la fourchaison : le modèle permet toujours de bien représenter le coefficient d'expansion le long du gradient de sylviculture mais il sous-estime (de 5 à 10 %) le coefficient d'expansion pour les arbres fourchus tandis que la prédiction est correcte pour les arbres non fourchus.

En résumé, ces premiers ajustements expriment assez bien les coefficients d'expansion pour une dizaine d'espèces ou, à défaut, pour des feuillus ou des résineux avec, en entrée, une simple information sur la taille de l'arbre : son diamètre et sa hauteur. Ces données suffisent à représenter l'effet des variations de sols et de sylviculture. En revanche la variabilité associée à la morphologie

de houppier n'est pas décrite, et le modèle sous-estime les volumes de houppiers et de menus bois pour les arbres fourchus, ou fortement branchus comme des réserves de TSF.

Modélisation des coefficients de houppier ($VEF_{com} = VBF_{tot} / V_{com}$)

Dans la seconde partie de ce travail, nous nous sommes intéressés à une autre définition importante, aussi proche que possible de l'utilisation qu'on en fait en gestion à l'ONF, pour l'estimation des produits présumés (volumes houppier) des coupes, par exemple : le rapport d'un volume total tige et branches jusqu'à la découpe 7 cm (VBF_{tot}), c'est-à-dire sans les menus bois, rapporté au volume commercial de tige (V_{com}).

Pour utiliser les données anciennes de l'INRA, il a donc tout d'abord fallu reconstituer les mesures correspondant à la définition du volume commercial : longueur de la grume jusqu'à la découpe 14 ou 20 cm, selon qu'il s'agit de résineux ou de feuillus, et section médiane de cette grume. Ceci a été possible pour les arbres dont on avait les profils complets de tiges.

Présentation des données

Pour cette seconde partie, nous disposions d'un jeu de calibration de 7528 arbres avec profils complets de tiges et données de branches à la découpe bois fort (tableau 1), soit environ autant que dans la première partie bien qu'il ne s'agisse pas des mêmes arbres. Huit genres feuillus et six genres résineux sont représentés, mais de façon très inégale puisque chêne, hêtre, pin et sapin représentent à eux seuls 95 % de l'effectif.

La représentation du coefficient de houppier observé pour ces arbres en fonction du diamètre à 1,30 m (figure 6) montre un nuage de points de même forme globale que ce qu'on avait pour le coefficient d'expansion V_{tot}/V_{BFT} , avec une forte diminution au démarrage

pour les plus petits diamètres, mais avec beaucoup moins de variabilité autour de cette tendance et une asymptote horizontale pour les forts diamètres : contrairement au coefficient d'expansion, ce coefficient de houppier ne semble pas augmenter avec la grosseur des arbres.

Modélisation des coefficients de houppier

La même démarche de modélisation a été appliquée à ces nouvelles données, en testant un modèle moyen feuillus ou résineux, puis un effet plus local du genre. Le modèle (modèle n° 2), de forme identique pour les feuillus et les résineux, ne comprend comme variable explicative que le diamètre à 1,30 m. Comme dans le cas précédent, la première partie du modèle décrit une forte décroissance exponentielle du coefficient en fonction de ce diamètre. Le paramètre β_1 traduit les coupes retenues pour la définition du volume commercial de référence (20 cm pour feuillus et 14 cm pour résineux) et donne le signal de la forme exponentielle décroissante du coefficient quand le diamètre de l'arbre se rapproche de la découpe commerciale. Ensuite la partie droite du modèle est constante par essence et correspond à une asymptote horizontale : « $\exp(\beta_3 + b_3) + 1$ ». La hauteur totale ainsi que d'autres variables transformées de D130 et Htot ont été testées mais n'ont pas été retenues statistiquement. Le modèle n° 2 de coefficient de houppier est donc beaucoup plus simple que le modèle n° 1 de coefficient d'expansion, même si cette simplicité n'était pas recherchée particulièrement.

Là encore, des coefficients par essence sont ajustés pour les essences disponibles dans les données de calibration, tandis que des coefficients « moyens » sont globalement estimés pour feuillus ou résineux, pour une utilisation ensuite sur d'autres essences. Avec ce modèle, l'erreur quadratique moyenne sur le coefficient de houppier est de 0,36 pour les feuillus et de 0,14 pour les résineux,

ce qui représente respectivement 0,40 m³ et 0,12 m³ sur le volume total de bois fort.

Les ajustements montrent qu'au delà d'une trentaine de centimètres de diamètre, la variabilité des coefficients de houppier entre genres est beaucoup plus forte chez les feuillus que chez les résineux (figure 7). La hauteur de l'asymptote horizontale varie entre 1,22 (chêne) et 1,63 (charme) pour les feuillus et entre 1,03 (sapin et épicéa) et 1,07 (pin) pour les résineux (tableau 3). Notons toutefois que, pour les genres qui ne sont représentés dans les données de calibration que par des arbres de petits diamètres (*Acer*, *Betula*, *Juglans* et surtout *Carya*), l'estimation de la hauteur de l'asymptote est moins précise.

Le premier résultat de ce travail est de montrer que le coefficient de houppier a deux avantages pratiques par rapport au coefficient d'expansion présenté précédemment :

- d'une part la hauteur de l'arbre ne l'influence pas significativement (contrairement à l'effet positif sur le coefficient d'expansion);

- et d'autre part l'effet du diamètre se stabilise rapidement pour les gros arbres vers une valeur donnée par le paramètre de l'asymptote horizontale β_3 .

Il est intéressant de noter que, pour le charme, les coefficients de houppier sont relativement élevés alors que l'échantillon de données allait jusqu'à des diamètres à 1,30 m de 50 ou 60 cm : la valeur asymptotique est donc bien calée sur ces plus gros arbres et cette essence semble avoir une proportion de houppier particulièrement forte.

Les volumes totaux de bois forts estimés à partir de volumes commerciaux présentent toujours une forte variabilité, surtout pour les feuillus (figure 8), dont une partie vient du fait que le volume de référence choisi est un volume commercial, moins précis qu'un volume géométrique (cf. encadré 1).

Tests du modèle 2 sur des données indépendantes

Comme précédemment, ce modèle a été testé sur les données collectées

pendant le projet en utilisant le modèle par essence pour les essences présentes dans les données de calibration et les modèles moyens résineux ou feuillus dans tous les autres cas.

Ces données indépendantes permettent d'évaluer l'incidence de facteurs supplémentaires sur le modèle :

- pour hêtre et érable, les gradients de sols montrent que, comme dans le cas des coefficients d'expansion, le modèle décrit bien les variations observées en n'utilisant que l'information de taille des arbres;
- pour les réserves de TSF et pour les chênes fourchus, le modèle prédit bien les coefficients de houppier, contrairement au cas des coefficients d'expansion : la part de surbille et branches découpe 7 reste proportionnelle au volume commercial;
- pour les essences non disponibles dans l'échantillon de calibration, les modèles feuillus ou résineux moyens donnent de bons résultats;
- enfin pour les chênes pubescents et chênes verts, le modèle feuillu moyen donne de meilleures prédictions que le modèle chêne basé sur des chênes sessiles et pédonculés.

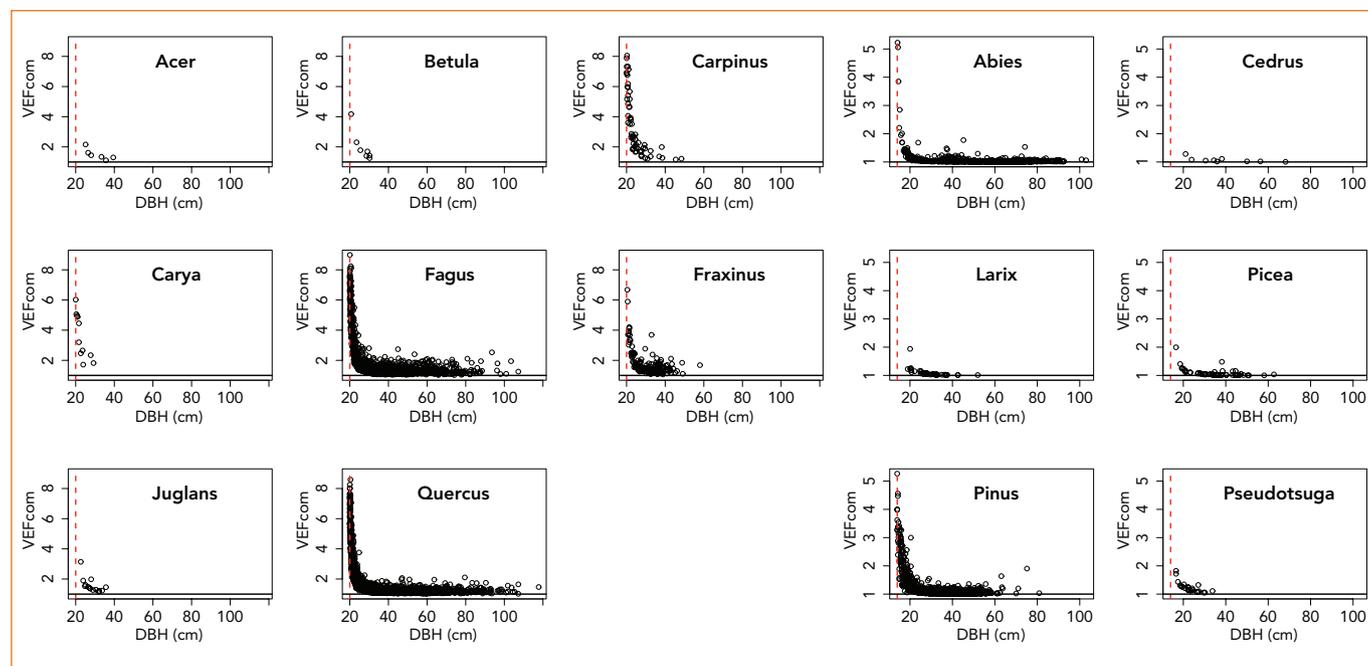


Fig. 6 : représentation du coefficient de houppier (VEFcom) observé en fonction du diamètre à 1,30 m pour 14 genres bien documentés dans les données anciennes de l'INRA

Le pointillé rouge indique la limite de 20 cm pour feuillus et 14 cm pour résineux, en deçà de laquelle un volume commercial de tige ne peut être calculé.

$$VEF_{com} = \frac{V_{BFtot}}{V_{Com}} = \underbrace{\exp(\beta_1 - D_{130})^{\beta_2 + b_2}}_{\text{Partie de forte décroissance pour les petits arbres}} + \underbrace{\exp(\beta_3 + b_3)}_{\text{Asymptote horizontale pour les gros arbres}} + 1 + \epsilon$$

Modèle 2 : modélisation du coefficient de houppier

Les valeurs exponentielles sont toujours positives ce qui assure que le coefficient de houppier est plus grand que 1. ϵ est l'erreur d'estimation. Le paramètre β_1 est lié à la découpe commerciale (résineuse ou feuillue) et est donné, comme le diamètre, en mètres, tandis que le paramètre β_2 donne la force de la décroissance exponentielle. Le paramètre β_3 donne la valeur de l'asymptote horizontale, c'est à dire le coefficient de houppier pour les plus gros diamètres.

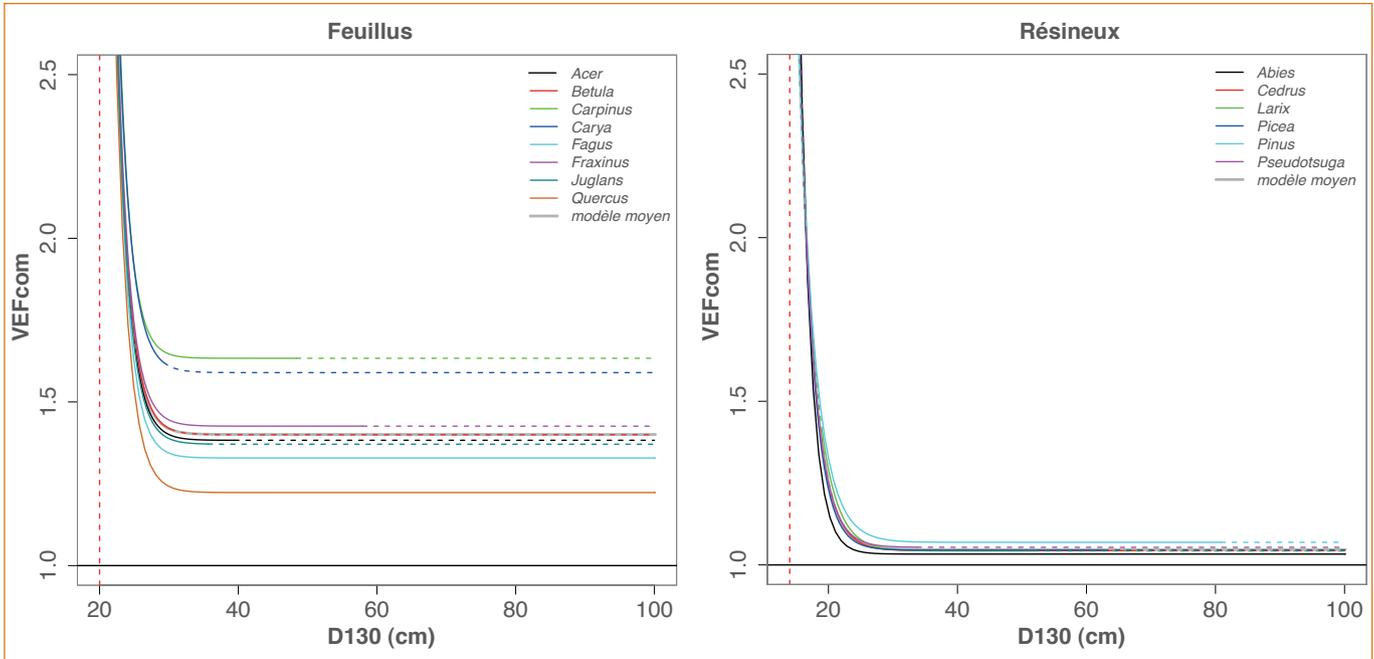


Fig. 7 : modèle n°2 de coefficient de houppier (VEFcom) en fonction du diamètre à 1m30 pour 14 genres et pour les modèles feuillus et résineux moyens

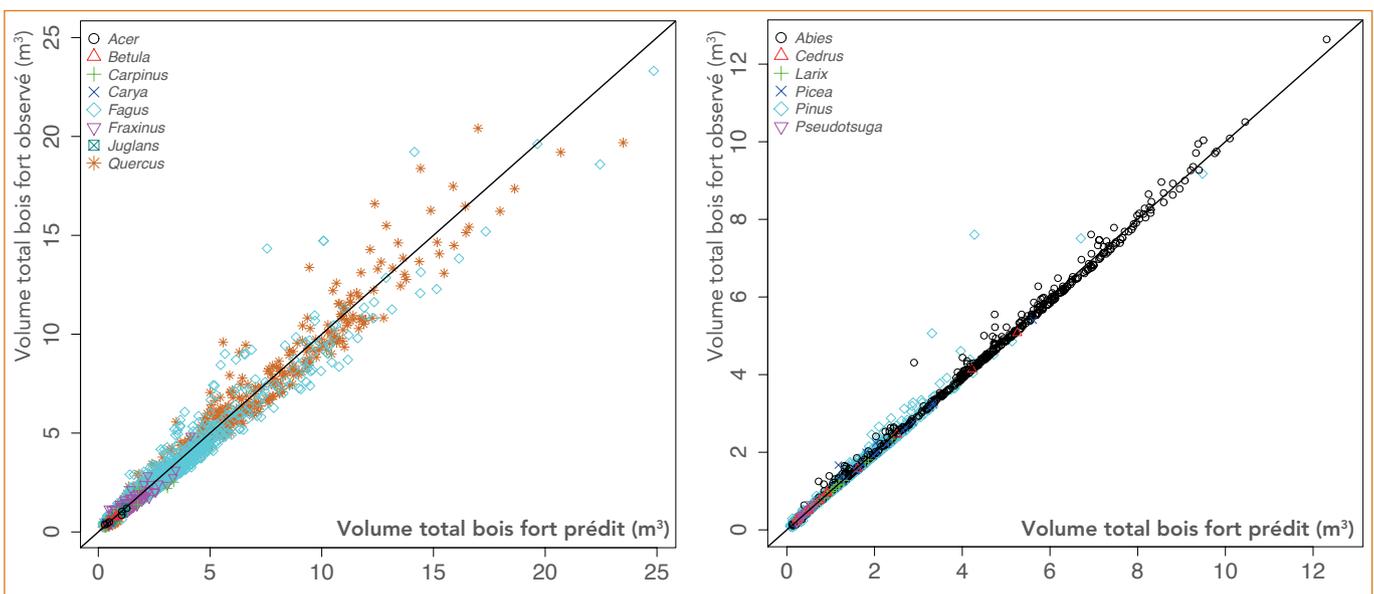


Fig. 8 : relation entre volume total bois fort prédit par le modèle de coefficient de houppier (modèle n°2) et le volume mesuré, à gauche pour feuillus et à droite pour résineux

Discussion - Quelles leçons en tirer pour la gestion ?

Le premier point à retenir de ce travail est la sensibilité des résultats aux définitions retenues, illustrée ici avec les définitions contrastées des coefficients d'expansion et des coefficients de houppier. Cette sensibilité apparaît à la fois dans les valeurs des coefficients et dans leur variabilité. Par exemple, contrairement au cas des coefficients d'expansion qui décrivent le volume jusqu'au fin bout des branches, les coefficients de houppier se révèlent plus stables et plus faciles à prédire :

- au delà d'un certain diamètre, ils sont constants pour une essence donnée;
- ils sont peu influencés par la structure, TSF ou futaie, et par la morphologie du houppier (fourchu ou non);
- les modèles moyens résineux ou feuillus donnent des résultats assez fiables lorsque le modèle pour l'essence n'est pas disponible.

Même si notre approche du coefficient de houppier est assujettie à la définition théorique d'un volume commercial maximal, elle justifie a posteriori la pratique courante de gestion qui consiste, pour l'estimation des volumes de houppier, à appliquer aux tiges relevant de la catégorie « arbre » des coefficients constants, choisis par essence. Ou plutôt elle montre que cette pratique se justifie au-delà d'un certain seuil de diamètre (D130), en l'occurrence 30 cm pour hêtre et chêne et 25 pour les autres feuillus et les résineux. À partir de cette gamme de diamètres, le coefficient de houppier individuel présenté ici peut s'appliquer à l'échelle de la parcelle ou du lot d'arbres.

Mais la forme du modèle (figure 7) montre aussi que pour des arbres plus petits, l'utilisation de cette valeur constante conduirait à une sous-estimation systématique du houppier. Chez les résineux, la part de volume de branches reste de toute façon assez faible, mais chez les feuillus elle est loin d'être négligeable : pour des bois de 20-25 cm

	Seuil de D130 : β_1 Unité : mètre	Force de décroissance initiale : $\beta_2 + b_2$	Asymptote horizontale : $\exp(\beta_3 + b_3) + 1$
Feuillus			
Feuillus moyens		57,100740	1,400591
Acer		56,919354	1,382874
Betula		55,367867	1,399879
Carpinus		60,987551	1,633410
Carya	0,229036	54,861648	1,589598
Fagus		59,468456	1,328866
Fraxinus		55,970523	1,426072
Juglans		57,245528	1,370945
Quercus		55,984996	1,223136
Résineux			
Résineux moyens		45,438728	1,046709
Abies		58,054794	1,033180
Cedrus		43,850406	1,043675
Larix	0.164603	39,235442	1,042669
Picea		47,520109	1,045189
Pinus		38,308880	1,069032
Pseudotsuga		45,662737	1,053838

Tab. 3 : valeurs des paramètres du modèle n°2 par essences ou pour feuillus ou résineux moyens

Attention : le modèle n°2 écrit de manière équivalente pour feuillus et résineux, correspond à des volumes commerciaux différents, découpe 20 pour feuillus et 14 pour résineux ; les valeurs indiquées ici ne doivent être utilisées que si on les applique bien à la définition de référence. Sous cette réserve, la valeur asymptotique « $\exp(\beta_3 + b_3) + 1$ » de chaque essence permet de prédire pour les gros arbres les volumes de branche avec une erreur de 1 à 2 %.

de diamètre, par exemple, la part de houppier peut représenter deux à trois fois celle de la grume. Pour les petits bois, il faut donc revenir à l'équation du modèle et faire le calcul par (classe de) diamètre, avec le paramètre « $\beta_2 + b_2$ » de l'essence concernée (tableau 3).

Enfin une mise en garde s'impose.

Nous avons vu que le paramètre β_1 est lié à la définition du volume commercial de référence ; or le houppier est le complément de ce volume de référence : par conséquent, tous les paramètres du modèle dépendent de β_1 et les valeurs données ici pour les feuillus/résineux ou par essence ne répondent donc qu'à cette définition théorique précise. En pratique, l'usage s'écarte de cette définition, parce que le choix du diamètre de

découpe peut varier (typiquement pour les pins) et parce que la découpe tige théorique est difficile à situer : on s'en tient le plus souvent à une découpe « physique » aux premières charpentières. Ces écarts ne permettent pas d'utiliser directement les résultats de notre modèle.

Conclusions et perspectives

Le premier intérêt de ce travail sur le calcul des volumes de branches à partir de volumes de tige est d'illustrer la grande variabilité des définitions des coefficients dits de houppier ou d'expansion. Faute de connaissances et d'outils, il est souvent tentant d'utiliser des coefficients de la littérature pour les applications locales qui n'ont rien à voir avec ce pour quoi ils sont conçus : il faut

savoir précisément de quoi on parle faute de quoi on s'expose à des erreurs majeures.

Au-delà de cette approche générale, l'article propose, pour deux exemples de définitions assez courants, respectivement en recherche et en gestion, des outils (modèles) standardisés pour calculer les volumes complets des arbres par essence à partir de mesures de diamètre et de hauteur. Les données qui ont permis de les construire sont anciennes, essentiellement représentatives de la sylviculture en futaie du début de siècle dernier, mais ils ont été testés sur les 176 arbres mesurés dans le cadre du projet, choisis entre autres pour représenter des conditions mal « couvertes » initialement. Les tests montrent que les modèles se comportent plutôt bien hormis les cas d'arbres fourchus ou réserves de TSF détaillés dans l'article : l'ampleur de la base de données, l'éventail assez large des tailles et des conditions de croissance et enfin l'approche globale de modélisation ont permis d'obtenir des modèles robustes, pour lesquels les effets sylvicoles et géographiques sont pris en compte à travers les variations des hauteurs et des diamètres.

Certains lecteurs seront frustrés de ne pas trouver ici de coefficients qui donnent les menus bois à partir du volume commercial; ou les volumes de branches découpe bois fort à partir du volume géométrique bois fort tige; ou encore le volume de houppier bois fort à partir d'un volume commercial pour d'autres découpes... Mais nous avons surtout voulu faire prendre conscience aux utilisateurs que chaque étape du choix d'un coefficient a ensuite un impact sur le calcul, et que sa validité est strictement inféodée à sa définition : le type de volume tige de référence (géométrique ou commercial), la définition du houppier (avec ou sans menus bois), le seuil choisi entre ces deux entités (découpe bois fort, découpes commerciales). Même les illustrations données ici pour les coefficients de houppier ne permettent pas encore

le transfert en gestion courante : nous n'avons pas traité les deux niveaux traditionnels de découpe des pins, ni les découpes particulières en usage dans certaines régions, et surtout nous n'avons pas évalué l'incidence des inévitables adaptations terrain, notamment pour situer la hauteur de la découpe.

L'objet du projet EMERGE était de mettre à plat ces différentes sources de variabilité et de développer des outils généraux pour avancer sur cette thématique : pour les coefficients d'expansion et de houppier, la base des données réunies dans le projet et les différents modèles proposés permettent maintenant de faire des choix pour revisiter les outils utilisés en gestion.

Fleur LONGUETAUD

Frédéric MOTHE

Philippe SANTENOISE

INRA, laboratoire LERFoB

Philippe DESPLANCHES

ONF, DT Sud-Ouest, direction Forêt

Antoine COLIN

IGN, direction interrégionale Nord-Est, département expertise et prestations

Christine DELEUZE

ONF, département R&D

Remerciements

Les auteurs remercient Cécilia Rivera, Michaël Rivoire, Tristan Senga-Kiessé et Laurent Saint-André pour leur contribution aux travaux présentés ici.

Bibliographie

Le travail principal présenté dans cet article a donné lieu à un article scientifique publié dans *Forest Ecology and Management* :

Longuetaud F., Santenoise P., Mothe F., Senga Kiessé T., Rivoire M., Saint-André L., Ognouabi N., Deleuze C., 2013. Modeling volume expansion factors for temperate tree

species in France. *Forest Ecology and Management* vol. 292, pp. 111-121

Colin A., Hervé J-C., Lucas S., 2011. L'IF n° 27, Volume de bois sur pied dans les forêts françaises : 650 millions de mètres cubes supplémentaires en un quart de siècle. 12p. <en ligne : <http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/spip.php?rubrique33>>

Oudin A. 1930. Vues d'ensemble sur l'organisation en France des recherches de sylviculture et d'économie forestière: Les méthodes. *Annales de l'École nationale des Eaux et Forêts*, vol. 3, n° 2 pp. 231-262

Gschwantner T., Schadauer K., Vidal C., Lanz A., Tomppo E., di Cosmo L., Robert N., Englert Duursma D., Lawrence M. 2009. Common tree definitions for national forest inventories in Europe. *Silva Fennica* vol. 43, n° 2 pp. 303-321

Loustau D. (coord.), 2004. Rapport Carbofor : Séquestration de Carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles. Programme GICC 2001 «Gestion des impacts du changement climatique» JUIN 2004. Convention Gip ECOFOR n° 3/2001. 125 p. <en ligne : <http://www.gip-ecofor.org/gicc/?q=node/192>>

Loustau D. (coord.), 2010. Forests, carbon cycle and climate change. Ouvrage collectif issu du projet CARBOFOR. Versailles : Editions QUAE, collection Update Sciences and Technologies, 348 p.

Pardé J., Bouchon J., 1988. *Dendrométrie*. ENGREF, 328 p.

Vallet P., Dhôte J.F., Le Moguédec G., Ravart M., Pignard G., 2006. Development of total aboveground volume equations for seven important forest tree species in France. *Forest Ecology and Management* vol. 229, n° 1-3 pp. 98-110.

Taux d'écorce pour les principales essences forestières françaises

Traditionnellement, les quantités de bois sont exprimées en mètres cube sur écorce. C'est l'unité la plus couramment utilisée par les propriétaires forestiers, les gestionnaires, les exploitants, les industriels et aussi les chercheurs. En effet, les mesures les plus faciles à réaliser sur un arbre ou une grume sont des mesures de circonférence ou diamètre sur écorce et des hauteurs totales pour les arbres sur pied ou des longueurs de grumes pour les arbres abattus. Ensuite, on peut utiliser l'un des nombreux tarifs ou barèmes existants pour estimer le volume sur écorce. On peut aussi directement cuber des grumes bord de route. Or, ce volume est constitué principalement de deux éléments : le bois et l'écorce. Inutile de préciser que ces deux éléments ont des valeurs marchandes et des usages très différents (notamment l'énergie pour l'écorce) et qu'il est donc important de quantifier la part de chacun d'eux. Pour ce faire, les exploitants forestiers et les industriels utilisent souvent des pourcentages d'écorce.

De nombreuses estimations existent pour ces pourcentages d'écorce, prenant en compte l'essence, le diamètre de l'arbre, la région d'origine des bois, le type de bois (bois d'œuvre ou bois d'industrie). Face à cette profusion de données, il est bien difficile de s'y retrouver et de savoir quel chiffre utiliser dans un contexte particulier. La base de données constituée dans le cadre du projet EMERGE permet d'éclairer la variabilité du pourcentage d'écorce des différentes essences et les sources de variation, grâce à près de 500 000 arbres avec mesure d'écorce. À notre connaissance, aucune des études réalisées sur le sujet en France (ou même à l'étranger) n'a porté sur un nombre d'arbres aussi important.

À titre d'exemple, dans une étude menée par le CTBA dans les années 1990 et dont les résultats servent toujours de référence pour de nombreux professionnels (Vautherin 1993, Vautherin 1996), il avait été mesuré environ 200 arbres par essence, avec des mesures d'épaisseur d'écorce tous les mètres le long des grumes.

Comme pour les volumes, la définition précise de ce pourcentage est nécessaire : pourcentage sur un volume total ou sur la surface terrière à une hauteur donnée. Pour un pourcentage en volume, à nouveau se pose la question de la définition du volume : grume, bois-fort, tige entière, arbre complet ?

Cet article permet d'éclairer la définition de ce pourcentage (ou taux) d'écorce et les différents facteurs de variabilité pour les principales essences forestières, à l'échelle de la ressource nationale. La première partie concernant les variations en fonction de la hauteur dans la tige permet d'explicitier le lien entre taux d'écorce en volume de tige et pourcentage sur la surface terrière à 1,30 m. Puis les variations de ce pourcentage à 1,30 m sont représentées pour différents facteurs.

De quelles données disposons-nous ?

Cette étude s'appuie sur l'un des acquis majeur du projet EMERGE : la base de données multi-organismes de plus d'un million d'arbres décrite dans cette publication. De cette base ont été extraits les arbres pour lesquels nous disposons de mesures d'épaisseur d'écorce.

Données de type recherche

Le point commun entre les différentes sources de données de type



A. Berthelot, FCBA

Mesure d'une épaisseur d'écorce à la jauge à écorce

recherche est que l'on a toujours plusieurs arbres par peuplement et que, pour chaque arbre, on dispose de mesures à différents niveaux le long de la tige (profils de tige). La différence essentielle réside dans la méthode de mesure de l'écorce :

- mesure de circonférence sur écorce et épaisseur d'écorce mesurée à la jauge à écorce pour FCBA (photo) ;
- mesure de circonférence sur écorce puis sous écorce (après écorçage complet de la grume) pour l'INRA ;
- mesure d'épaisseur d'écorce sur rondelle pour quelques données récentes de l'INRA.

Dans tous les cas, il est possible de calculer à un niveau donné le pourcentage d'écorce en surface ou, par arbre, le taux d'écorce en volume en s'intéressant éventuellement à différents tronçons dans l'arbre : tige jusqu'à la découpe bois fort, bille de pied d'une longueur définie...

Nous disposons au total de mesures d'écorce sur plus de 12 000 arbres, soit plus de 225 000 mesures d'épaisseur d'écorce. Ces mesures couvrent 35 essences différentes, dont 12 avec plus de 200 arbres mesurés répartis sur au moins 10 peuplements donc pour lesquelles les

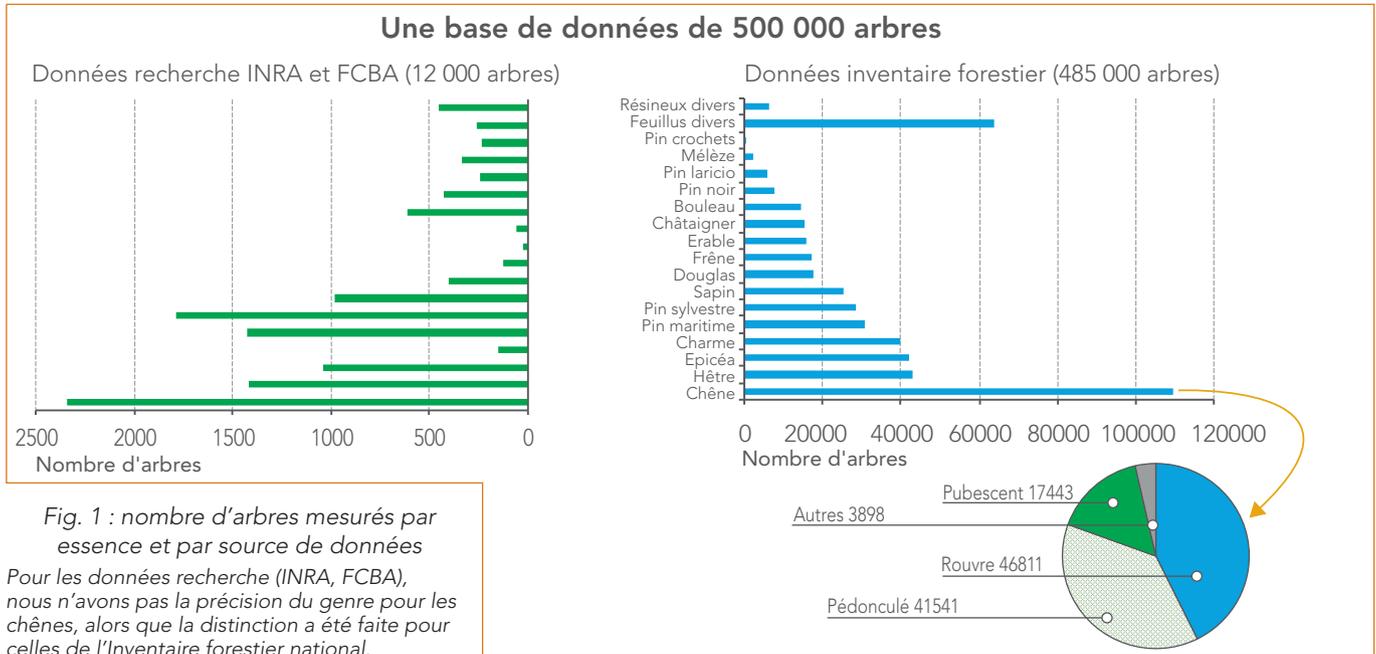


Fig. 1 : nombre d'arbres mesurés par essence et par source de données. Pour les données recherche (INRA, FCBA), nous n'avons pas la précision du genre pour les chênes, alors que la distinction a été faite pour celles de l'Inventaire forestier national.

résultats sont relativement consistants. Il est utile de préciser que ces données, certes nombreuses, ne sont pas issues d'un échantillonnage statistique représentatif de la ressource française actuelle mais ont été récoltées au fil du temps lors d'études ponctuelles. Elles permettent d'explorer finement la variation du pourcentage d'écorce le long de la tige, et de la mettre en perspective avec différentes conditions de croissance (localisation, structure, âge, tailles) pour quelques essences importantes en gestion.

Données de l'Inventaire forestier national

Lors des levés de terrain, parmi les nombreuses mesures réalisées sur les arbres, les équipes de l'Inventaire forestier national ont mesuré pour certaines campagnes les épaisseurs d'écorce à 1,30 m (jauge à écorce). Nous ne disposons donc que d'une seule mesure par arbre, mais d'un nombre d'arbres très importants (environ 485 000 arbres mesurés). Ces données issues d'un plan d'échantillonnage rigoureux sont directement représentatives de la ressource et elles permettent une étude des sources de variabilité à l'échelle nationale (caractéristiques dendrométriques, origine géogra-

phique, type de peuplement...). Elles sont donc très complémentaires des données de type recherche.

La comparaison entre ces deux sources de données (figure 1) montre bien leur complémentarité et, par exemple, que les données recherche sont focalisées sur quelques essences comme épicéa, pin maritime, pin sylvestre, bouleau, mélèze, chêne ou hêtre avec au contraire d'autres essences sous-représentées comme charme, châtaignier ou érable.

Variation du taux d'écorce dans l'arbre

Le pourcentage d'écorce (en surface) n'est pas constant dans l'arbre, il peut évoluer en fonction de la hauteur, le sens et l'ampleur de cette évolution variant selon l'essence. En conséquence, le taux d'écorce (en volume) dans la bille de pied pourra être différent de celui de la surbille et des autres billons éventuellement façonnés dans l'arbre.

Quel profil de pourcentage d'écorce selon les essences ?

Sur les pins maritime, sylvestre, laricio et noir, cette évolution est extrêmement marquée. Sur pin sylvestre par exemple, on peut observer un

pourcentage d'écorce de 20 % à 1,30 m et de moins de 10 % en haut de la tige. Pour les autres essences étudiées (celles pour lesquelles nous disposons de suffisamment d'arbres), la variation de long de la tige est nettement moins sensible. Le pourcentage d'écorce a tendance à légèrement diminuer quand on monte dans l'arbre pour bouleau, douglas, mélèze et pin à crochets et à augmenter pour chêne, hêtre, charme, frêne, sapin et épicéa.

Ces différences observées entre essences sont très certainement liées à l'aspect plus ou moins « écailleux » ou « granuleux » du rhytidome¹. Cet aspect ayant tendance à s'accroître avec l'âge, il est normal qu'en haut de l'arbre, sur du bois plus jeune, l'écorce ait un aspect plus lisse et soit donc moins épaisse.

Globalement sur nos données recherche, nous pouvons distinguer 3 groupes d'essences (figure 2) :

- groupe 1 : essences dont le pourcentage d'écorce augmente en remontant dans la tige (chênes, hêtre, charme, frêne, sapin et épicéa) ;
- groupe 2 : essences dont le pourcentage d'écorce reste relativement stable le long de la tige (bouleau, douglas, mélèze et pin à crochets) ;

¹ Le rhytidome est l'appellation scientifique des botanistes pour les tissus externes morts constituant l'écorce des arbres. Selon les essences, ces tissus peuvent avoir un aspect écailleux et crevassé (exemple des pins) ou un aspect beaucoup plus lisse et une tendance à perdre régulièrement des lambeaux d'écorce (jeunes bouleaux par exemple)

- groupe 3 : quatre pins pour lesquels le pourcentage d'écorce diminue en remontant dans la tige, sauf dans la zone de houppier où il augmente à nouveau.

Comment en déduire un taux d'écorce en volume ?

Cette évolution du pourcentage d'écorce en section le long de la tige a pour conséquence pratique qu'un taux d'écorce en volume calculé sur un tronçon de la tige est différent du pourcentage d'écorce de la tige entière. Ainsi, pour les arbres du jeu de données recherche, si on calcule un pourcentage d'écorce (en surface) à partir d'une mesure réalisée à 1,30 m, cette valeur n'est pas représentative du taux d'écorce en volume total calculé pour le même arbre. Il faut appliquer un coefficient correctif pour passer de l'un à l'autre, coefficient bien sûr lié à l'essence, mais aussi à la dimension de l'arbre.

Fort logiquement, pour les 6 essences du groupe 1 (celles pour lesquelles le pourcentage d'écorce a tendance à augmenter avec la hauteur dans l'arbre), le taux d'écorce tige est très légèrement supérieur au pourcentage mesuré à 1,30 m, même si la différence est assez faible. Pour les autres essences, la tendance est logiquement inverse, avec des différences très importantes pour les pins. Pour le pin maritime par exemple (figure 3), un pourcentage d'écorce à 1,30 m de 32 % correspond à un taux d'écorce de 25,5 % pour la tige entière (jusqu'à la découpe 7 cm de diamètre).

Une relation liée à la taille de l'arbre

Ces tendances générales par essence sont à moduler en fonction de la taille des arbres (figure 4). Pour les essences du premier groupe (chêne, hêtre, charme, frêne, sapin et épicéa), le pourcentage d'écorce est quasiment constant le long de la tige, quelle que soit la grosseur de l'arbre ou peu s'en faut : on observe au plus 2 % d'écart entre le pourcentage d'écorce mesuré à 1,30 m et le taux d'écorce de la tige entière.

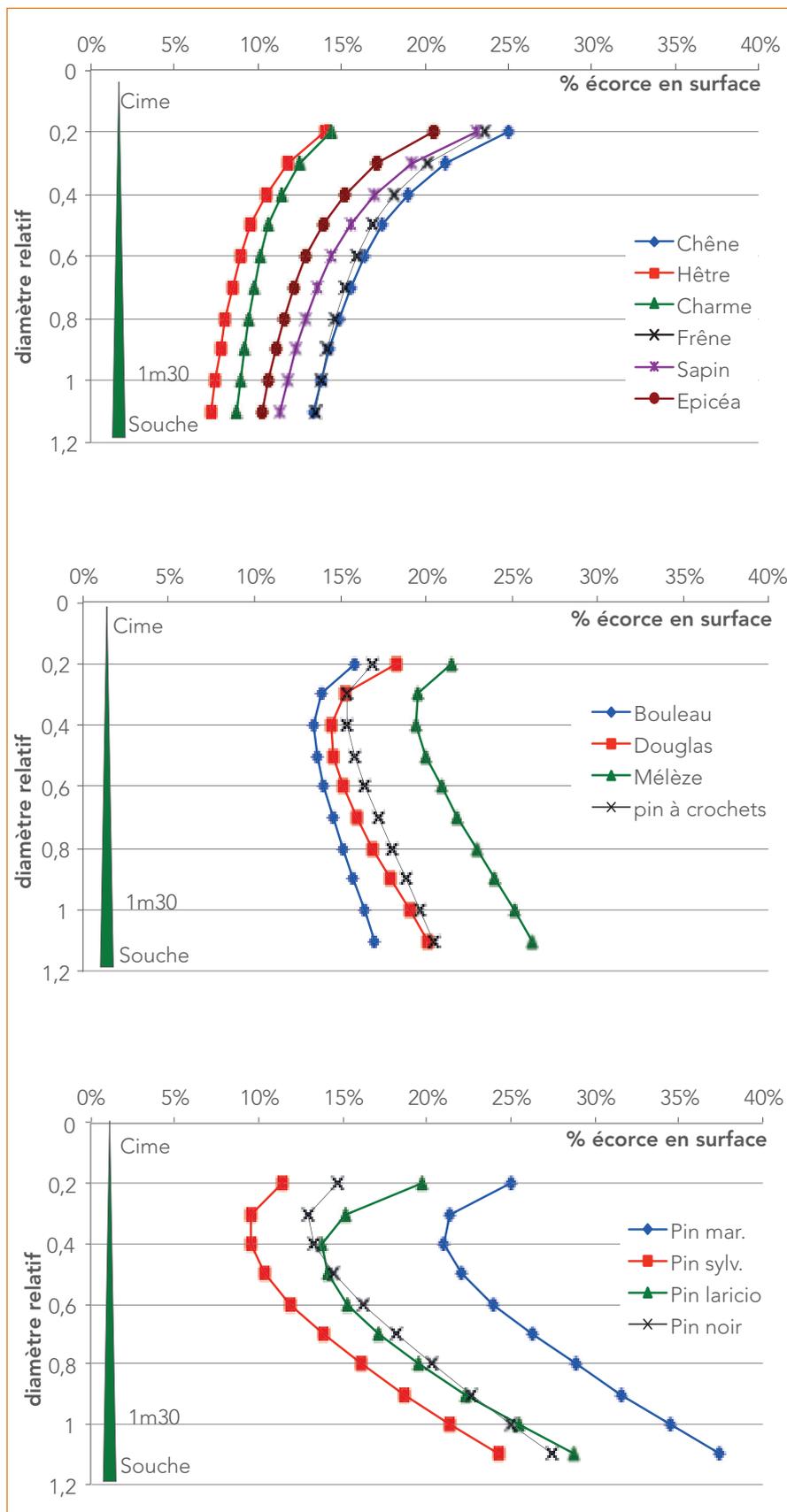


Fig. 2 : évolution du pourcentage d'écorce en surface le long de la tige (en diamètre relatif par rapport diamètre à 1,30 m)

Pour les essences du deuxième groupe (bouleau, douglas, mélèze et pin à crochets), le pourcentage d'écorce diminue légèrement quand on monte dans l'arbre. On observe au plus 2 % d'écart entre le pourcentage d'écorce en surface mesuré à 1,30 m et le taux d'écorce en volume de la tige entière. Cet écart peut varier en fonction de la taille de l'arbre : chez le bouleau par exemple, il est quasiment nul pour les petits arbres et atteint 2 % pour les arbres de 40 cm de diamètre à 1,30 m.

Pour les essences du troisième groupe (les pins) en revanche, les variations du pourcentage d'écorce le long de la tige sont très importantes et il y a donc lieu de moduler le taux d'écorce en fonction de la zone de la tige dont on parle, mais il peut aussi y avoir une influence de la taille de l'arbre. Ainsi, le taux d'écorce d'une grume (jusqu'à la découpe 7 centimètres de diamètre) de pin maritime est inférieur de 6 % au pourcentage d'écorce à 1,30 m, quelle que soit la grosseur de l'arbre ; pour le pin sylvestre, cette différence est de l'ordre de 5 % pour les petits arbres et peut atteindre 8 % pour les gros arbres.

Conséquences par type de produit ?

Bien sûr, les données dont nous disposons peuvent permettre de réaliser d'autres études selon les besoins, surtout pour les essences dont le pourcentage d'écorce fluctue énormément le long de la tige (calculer par exemple des taux d'écorce en fonction des types de produits façonnables dans une grume). Cependant, ce travail détaillé le long de la tige et pour différentes essences permet de donner des clés de lecture des pourcentages mesurés à 1,30 m et plus souvent étudiés pour en déduire des taux d'écorce en volume : les différences, on l'a vu, sont les plus importantes pour les pins avec par exemple une surestimation qui augmente avec la taille de l'arbre pour le pin sylvestre jusqu'à 8 %. Pour les deux premiers groupes d'essences, l'effet reste limité à moins de 2 %.

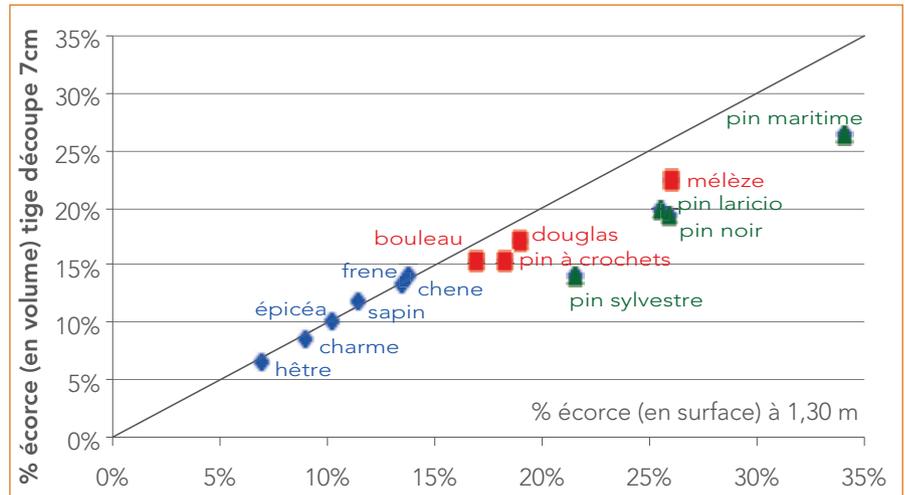


Fig. 3 : relation entre le pourcentage d'écorce en surface à 1,30 m et le taux d'écorce en volume de la tige (découpe bois fort)

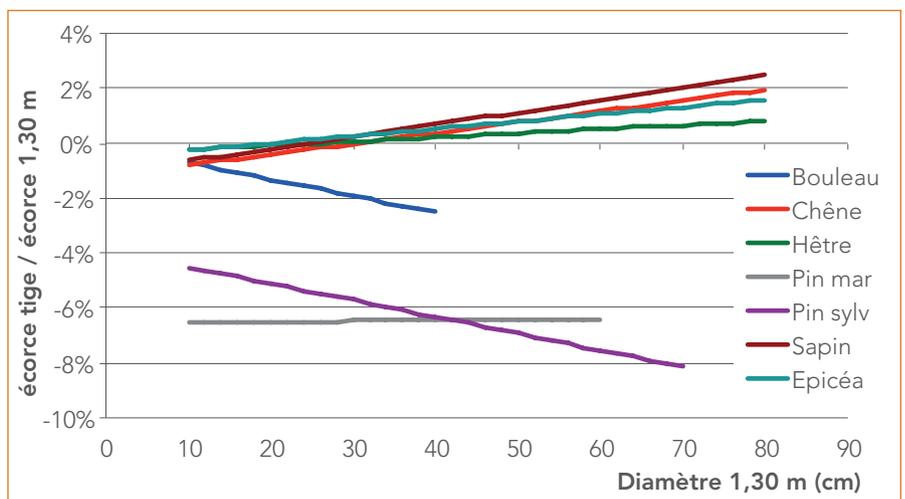


Fig. 4 : différence entre le taux d'écorce en volume de la tige et le pourcentage en surface à 1,30 m selon la taille de l'arbre, pour quelques essences (essences pour lesquelles nous disposons de plus de 500 arbres)

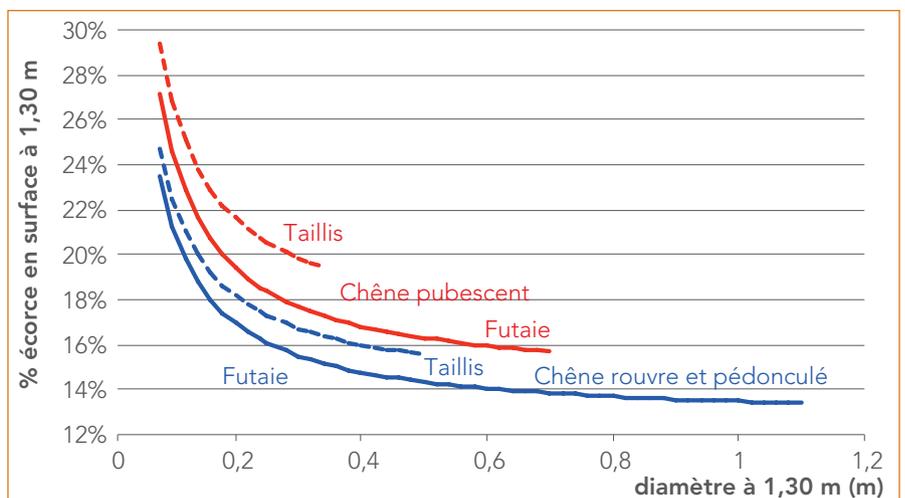


Fig. 5 : pourcentage d'écorce en surface à 1,30 m en fonction du diamètre à 1,30 m pour deux types de chênes et deux types de structure de peuplement

Variation du pourcentage d'écorce entre arbres

Le pourcentage d'écorce pour une même essence est très variable et les données de l'Inventaire forestier permettent de l'analyser à l'échelle de la ressource, via la mesure du pourcentage à 1,30 m. Une petite partie de cette variabilité peut s'expliquer par l'imprécision des mesures ou l'effet individuel arbre. Néanmoins, diverses études ont mis en évidence 3 facteurs importants pouvant expliquer cette variabilité : la dimension ou l'âge (dont nous venons de voir un aspect), la génétique et/ou l'environnement. La diversité intraspécifique ne sera pas développée ici, car les données dont nous disposons ne nous permettent pas de l'étudier finement. Nous n'aborderons que la diversité interspécifique à propos du chêne et du mélèze.

Pour les effets environnementaux notre prétention n'est pas ici de présenter de manière exhaustive tous les effets qu'il serait possible d'étudier à partir de ces données mais simplement d'illustrer à partir de quelques exemples l'importance de ces effets sur certaines essences. La richesse de ces données peut permettre des études plus poussées pour des besoins ponctuels. Les effets étudiés sont :

- l'altitude,
- l'origine géographique ; le zonage géographique retenu ici est une maille très large puisqu'il s'agit des 11 Grandes Régions ECOlogiques (GRECO) de l'Inventaire national (site : inventaire-forestier.ign.fr).

Lien entre pourcentage d'écorce et taille de l'arbre

Intéressons-nous dans un premier temps à l'effet dimensionnel des arbres, soit le diamètre à 1,30 m. En règle générale, pour une essence donnée, le pourcentage d'écorce décroît quand la taille de l'arbre augmente, cette décroissance étant plus ou moins importante selon l'essence. Seule exception notable : le bouleau

pour lequel la tendance est inverse, tendance observée aussi bien sur les données recherche que sur les données de l'Inventaire forestier. C'est sans doute parce que le bouleau est l'une des seules essences françaises à présenter un rhytidome annulaire dans le jeune âge, rhytidome qui a tendance à prendre un aspect écaillé induisant des épaisseurs d'écorce nettement plus importantes quand l'arbre vieillit.

Pour illustrer cet effet, pour chaque essence, les arbres ont été classés en 5 catégories de grosseur (tableau 1). Ces pourcentages d'écorce mesurés à 1,30 m sont différents des taux d'écorce tige ou portion de tige. Par exemple pour passer à des taux d'écorce tige jusqu'à la découpe 7 cm de diamètre, il faut appliquer les coefficients correcteurs évoqués précédemment. Pour d'autres tronçons de la tige, le calcul de coefficients de passage est possible à partir de nos données. Ils ne sont pas présentés ici. L'amplitude des intervalles de dispersion des données donne une idée de la variabilité observée. Cette variabilité est due en partie à l'imprécision de la mesure (compensée par le grand nombre de mesures effectuées), à des effets stationnels dont certains seront étudiés par la suite, à des effets génétiques non étudiables sur ces données et à la variabilité individuelle arbre.

Un effet de l'essence et de la structure de peuplement sur l'exemple du chêne

Il a été mis en évidence une différence entre le chêne pubescent et les chênes rouvre et pédonculé (les chênes rouge, vert, tauzin et liège ont été exclus de l'analyse) et également une différence entre les arbres de la strate de futaie et les arbres de la strate de taillis (différence déjà enregistrée dans une étude CTBA de Vautherin 1996, figure 5). On observe un pourcentage plus important pour le chêne pubescent comparativement aux deux autres (entre + 2 et + 3 %) et aussi plus

important pour les taillis par rapport aux futaies (entre + 1 et + 2 %). Par exemple un arbre de 25 cm de diamètre à 1,30 m a un pourcentage d'écorce à 1,30 m autour de 16 % s'il s'agit d'un chêne pédonculé de futaie et d'environ 20 % si c'est un chêne pubescent de taillis. Il n'apparaît pas de différence significative entre chêne rouvre et chêne pédonculé, pas plus que d'effet région pour ces chênes.

Un effet régional sur l'exemple du châtaigner

Pour le châtaignier, une différence a été trouvée entre les GRECO telles que définies par l'Inventaire forestier national. À caractéristiques dendrométriques équivalentes, les arbres des régions du nord B et D (Centre-Nord et Vosges) ont des pourcentages d'écorce plus faibles que les arbres des régions plus au sud F et G (Sud-Ouest et Massif Central) et la différence n'est pas négligeable (3,5 % pour le même diamètre : figure 6). L'altitude ne peut pas expliquer ces différences, car si on limite l'analyse à une gamme d'altitude commune aux 4 régions, on trouve le même classement des régions.

Un effet régional et/ou de l'altitude sur les exemples de l'épicéa, du sapin et du mélèze

Pour l'épicéa commun (figure 7), là encore, une différence entre régions a été relevée : les régions de plaine (B, C et D) ont un pourcentage d'écorce légèrement inférieur à ce que l'on trouve en moyenne montagne : Massif Central (région G), Jura (région E) et Alpes (région H) pour les peuplements situés à moins de 1 000 m d'altitude. Pour les peuplements des Alpes situés à plus de 1 000 mètres d'altitude, on peut distinguer en plus deux classes d'altitude, le pourcentage d'écorce augmentant avec l'altitude. Pour le sapin, on observe également une augmentation du pourcentage d'écorce avec l'altitude, mais l'effet région est difficile à analyser, car les

Essences	TPB ≤ 17,5 cm			17,5 < PB ≤ 27,5 cm			27,5 < MB ≤ 47,5 cm			47,5 < GB ≤ 67,5 cm			67,5 cm < TGB		
	Eff	%moy	Ampl	Eff	%moy	Ampl	Eff	%moy	Ampl	Eff	%moy	Ampl	Eff	%moy	Ampl
1 - Essence pour lesquelles le pourcentage d'écorce à 1,30 m est très proche du taux d'écorce en volume tige entière															
Charme	29388	6.3	4.4-8.1	4925	5.4	4.0-6.8	1842	5.3	3.9-6.6						
Chêne	33233	22.4	17.8-27	18550	17.9	14.8-21	29102	15.0	12.6-17.5	11614	13.4	11.2-15.6	1669	12.2	10-14.3
Frêne	7199	12.6	8.6-16.6	3287	11.7	9-14.3	3654	11.2	9.1-13.3	928	10.8	9.1-12.5			
Hêtre	13422	6.4	4.5-8.3	6681	5.6	4.1-7.1	12247	5.3	4.1-6.4	5142	5.1	4.1-6.1	903	4.9	4.0-5.8
Sapin pectiné	6096	12.1	9.1-15.1	4339	10.7	8.4-13.0	8687	10.8	8.9-12.8	3294	10.4	8.8-12	444	9.6	8.2-10.9
Épicéa commun	16705	13.2	10.1-16.4	9832	11.1	8.8-13.4	10197	10.8	8.8-12.7	2519	10.4	8.8-12.1	201	9.4	7.9-10.9
2 - Essences pour lesquelles le pourcentage d'écorce à 1,30m est légèrement supérieur au taux d'écorce en volume tige entière															
Bouleau	8561	13.3	9.3-17.3	2847	16.2	11.4-21	1623	17.6	12.8-22.3						
Douglas	6117	15.5	12.2-18.8	4758	14.6	12-17.2	4870	15.6	13.1-18.2	639	17.0	14-20			
Mélèze d'Europe	499	23.1	18.9-27.2	397	20.3	16.5-24.2	549	20.3	16.1-24.5	143	21.0	17.1-24.8			
3 - Essences pour lesquelles le pourcentage d'écorce à 1,30m est très nettement supérieur au taux d'écorce en volume tige entière															
Pin laricio	2525	28.5	23.5-33.6	1774	27.2	23.2-31.2	1031	25.8	22.1-29.5	132	22.2	19.1-25.3			
Pin maritime	7169	37.7	32.6-42.8	6273	37.0	32.7-41.3	12470	33.7	29.3-38.1	2454	29.1	25-33.3	125	22.4	18.6-26.3
Pin noir d'Autriche	2529	29.0	24.5-33.4	2062	28.4	24.7-32.0	2117	26.5	23-30	252	24.3	20.9-27.7			
Pin sylvestre	6522	25.6	20.6-30.5	6737	24.1	20.3-28.0	10469	22.4	18.9-25.9	1720	20.4	17-23.8			
4 - Essences pour lesquelles la relation pourcentage d'écorce à 1,30 m - taux d'écorce en volume tige entière n'a pas été étudiée															
Aulne	3681	16.6	12.4-20.8	1934	17.2	14.3-20.2	1303	16.4	14-18.9	138	15.5	13-17.9			
Érable	9761	13.6	9.0-18.2	2700	9.7	6.6-12.8	1971	8.1	5.8-10.4	260	7.2	5.5-8.9			
Châtaigner	6931	15.6	11.7-19.5	3090	15.2	12-18.3	2191	14.0	11.6-16.4	489	12.9	10.8-15.1	181	10.9	8.6-13.2
Merisier	3172	13.2	9.4-17	1325	10.8	8.3-13.3	936	9.7	7.6-11.8	111	9.2	7.2-11.1			
Noisetier	5701	10.2	6.9-13.5												
Robinier	4907	23.4	18.1-28.6	1529	23.7	19.3-28.1	744	22.9	18.5-27.4						
Saule	5183	18.5	14-22.9	877	18.3	14.4-22.1	463	17.3	13.8-20.8						
Tremble	2991	16.9	12.9-20.9	1277	15.5	12.3-18.7	798	15.1	12.4-17.8						

On peut penser que les essences du groupe 4, toutes feuillues, se comportent comme celles du groupe 1 à savoir un taux d'écorce constant le long de la tige et donc un taux d'écorce en surface à 1,30 m très proche du taux d'écorce en volume de la tige entière. Cela semble vérifié pour robinier, aulne, châtaigner et érable pour lesquels nous disposons de quelques données.

Tab. 1 : effectif (Eff) et pourcentage d'écorce moyen en surface à 1,30 m (%moy) observé sur les données de l'Inventaire forestier, par catégorie de grosseur (en diamètre à 1,30 m)

TPB = Très Petits Bois ; PB = Petits Bois ; MB = Bois Moyens ; GB = Gros Bois ; TGB = Très Gros Bois
Ampl = intervalle dans lequel se situe la moitié des données observées, c'est-à-dire premier et troisième quartiles

effectifs sont plus faibles que pour l'épicéa commun et bien souvent une classe d'altitude donnée ne se trouve que dans une seule région.

Pour le mélèze d'Europe, autre essence d'altitude, on trouve également cet effet région (probablement lié à des différences d'altitude) avec une opposition entre régions de plaine, de moyenne montagne et de haute montagne, même si les effectifs sont trop faibles pour analyser plus finement l'effet altitude. À noter également une différence sensible entre mélèze d'Europe et mélèze du Japon (figure 8), à regarder surtout sur la région G (Massif-Central).

Un effet génétique sur l'exemple du séquoia

L'effet génétique est difficile à étudier sur nos données, car bien souvent, si nous connaissons la situation géographique des parcelles, nous n'avons aucune information sur les origines génétiques des arbres. Quelques exemples nous permettent néanmoins de confirmer un effet génétique. Dans un test clonal de *sequoia sempervirens* par exemple, nous avons échantillonné 3 arbres sur 4 clones différents. Deux de ces clones ont des pourcentages d'écorce de 45 % et les deux autres de 30 % (photos). Il s'agit bien là d'un effet génétique, car les arbres ont le même âge, le même diamètre et ont été prélevés sur la même parcelle.

Le même constat a été fait sur des clones de peuplier (pourcentage d'écorce de 6,5 % à 9,5 % pour les clones extrêmes) ou entre des clones de pin maritime. Ce critère est très rarement intégré dans les programmes de sélection ou d'amélioration génétique. Sélectionner des génotypes sur leur vigueur mesurée sur écorce pourrait cependant conduire à sélectionner en réalité des arbres qui produisent beaucoup d'écorce.

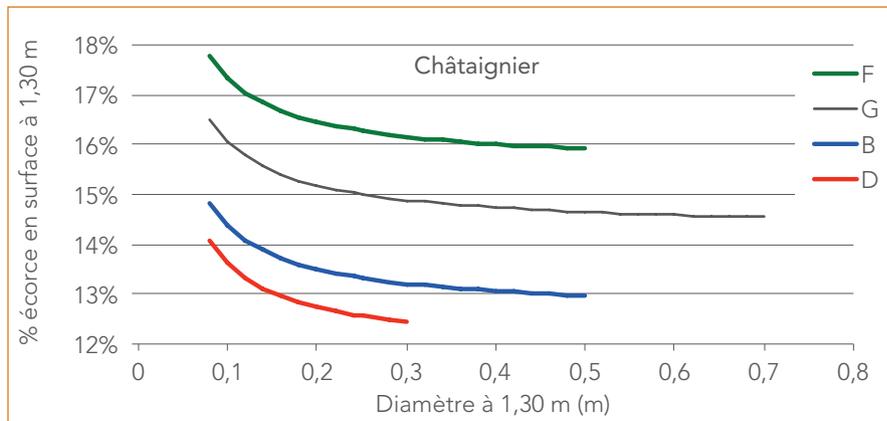


Fig. 6 : pourcentage d'écorce en surface à 1,30 m en fonction du diamètre à 1,30 m chez le châtaignier pour 4 GRECO,

les GRECO pour lesquelles nous disposons des données sur plus de 1 000 arbres. B : Centre Nord semi-océanique, D : Vosges, F : Sud-Ouest océanique et G : Massif-Central.

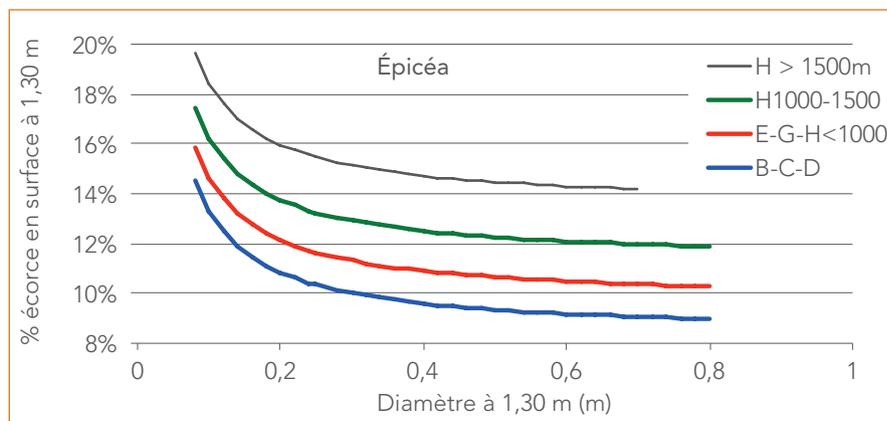


Fig. 7 : pourcentage d'écorce en surface à 1,30 m en fonction du diamètre à 1,30 m chez l'épicéa pour 6 GRECO contrastées et en séparant par altitude dans les Alpes

B : Centre Nord semi-océanique, C : Grand-Est semi-continentale, D : Vosges, E : Jura, F : Sud-Ouest océanique, G : Massif Central, H : Alpes.

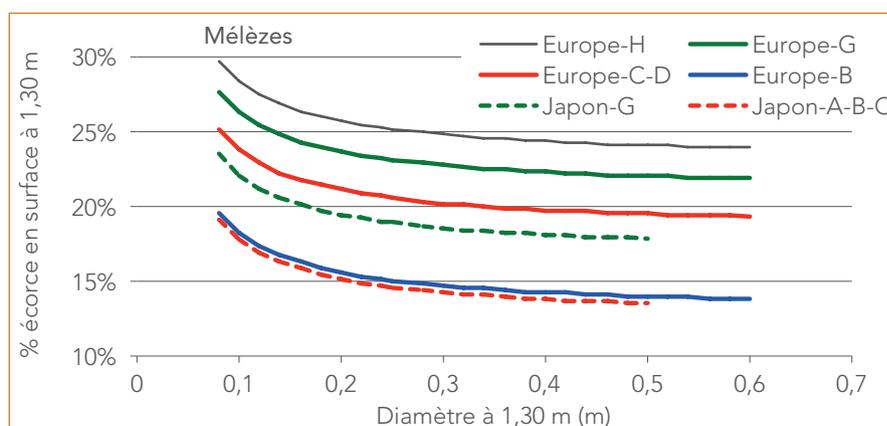


Fig. 8 : pourcentage d'écorce en surface à 1,30 m en fonction du diamètre à 1,30 m pour les mélèzes d'Europe ou du Japon pour 5 régions GRECO contrastées

A : Grand-Ouest cristallin et Océanique, B : Centre Nord semi-océanique, C : Grand-Est semi-continentale, D : Vosges, G : Massif Central, H : Alpes.

Conclusion

Le taux d'écorce est un élément important à prendre en compte à tous les niveaux : valorisation industrielle, transactions commerciales, aspects environnementaux. Ces taux sont par nature très variables, mais la prise en compte de certaines sources de cette variabilité permet d'affiner leur estimation.

Il convient avant tout de bien définir de quel taux ou pourcentage on parle, et sur quelle portion de l'arbre. Ces taux sont bien sûr très dépendants de l'essence et de la taille de l'arbre et ce sont généralement les seuls facteurs qui ont été pris en compte dans les études précédentes. Nous pouvons grâce à la base de données constituée dans le cadre du projet EMERGE profiter du très grand nombre de données à l'échelle ressource pour affiner ces taux par essences et catégories de diamètre. Nous avons également étudié l'évolution de ce taux d'écorce dans un arbre et mis en lumière le fait que pour certaines essences on ne peut pas se contenter d'un taux unique mais qu'il faut utiliser des taux différents selon la partie de l'arbre à laquelle on s'intéresse. Nous avons également illustré par quelques exemples la disparité qui peut exister au sein d'une même essence, une partie de ces différences pouvant être expliquée par des contraintes environnementales (climat, altitude). Il n'a pas été possible dans les temps du projet d'aller au-delà de ces résultats exploratoires. Cette base de données permettra à l'avenir d'approfondir ces analyses et de proposer entre autres des outils d'estimation plus opérationnels.

Alain BOUVET

FCBA, Direction Innovation Recherche

Christine DELEUZE

ONF, Département R&D



Clone 17 (45% d'écorce)

Clone 19 (30% d'écorce)

Effet génétique chez le séquoia

N. Eisner, FCBA

Remerciements

Les auteurs remercient Antoine Colin, François Morneau et Fleur Longuetaud pour leur contribution aux travaux présentés ici.

Bibliographie

Dagnelie P., Palm R. Rondeux J., Thill A. 1985. Tables de cubage des arbres et des peuplements forestiers. Gembloux : Presses agronomiques de Gembloux, 148 p.

Vautherin P., 1993. Cubage des bois ronds : vers des taux d'écorce moyens? CTBA info n° 42

Vautherin P., 1996. Le cubage des bois ronds feuillus : vers des taux d'écorce moyens? CTBA info n° 58

Le Lidar terrestre : une technologie prometteuse pour l'inventaire forestier

L'inventaire forestier vise à décrire quantitativement les peuplements d'une forêt en vue de son aménagement. Il fournit une évaluation de leur capital sur pied, de leur stade de développement et de leur structure. L'estimation de la surface terrière et de la distribution par classe de diamètre est en général assez précise. Par contre, d'autres grandeurs dendrométriques, telles que la hauteur ou la qualité des tiges, ne sont accessibles que de façon qualitative ou moyennant un investissement conséquent, justifié uniquement pour les peuplements à très fort enjeu. Par ailleurs, il faut toujours faire un compromis entre efficacité et précision. Les inventaires relascopiques, très rapides, fournissent une bonne résolution cartographique mais une faible précision. Les inventaires par placettes de comptage (mesure individuelle des arbres) sont nettement plus précis mais aussi plus longs et conduisent donc à réduire sensiblement le nombre de placettes. Enfin l'usage de placettes permanentes, qui nécessitent de localiser les arbres, offre la meilleure précision et la possibilité, moyennant une re-mesure, d'obtenir une estimation des accroissements. Mais elles génèrent clairement un surcoût lors de l'installation.

Pour estimer le volume, la seule possibilité réaliste réside dans l'utilisation de tarifs dont on ne maîtrise (respecte ?) pas toujours le contexte de validité, ou peu précis (tarifs à une entrée). Les actions centrales du projet EMERGE visent à améliorer ce point, tout en permettant la concordance de différentes approches (volumes à différentes découpes, biomasse, minéralomasse). En particulier, il s'agit de mieux appréhender le compartiment houppier, face aux nouveaux enjeux liés aux

changements climatiques : usages énergétiques du bois, évaluation des stocks de carbone, bilans de fertilité des sols...

En complément, le projet EMERGE comporte une action visant à évaluer les apports potentiels d'une nouvelle technologie pour la réalisation des inventaires forestiers : le Lidar terrestre, qui laisse espérer un excellent rapport coût / richesse et précision des mesures. Cette action comporte deux volets distincts. Le premier volet, piloté par le département R&D de l'ONF, avait comme objectif d'évaluer le potentiel du Lidar terrestre pour mesurer des placettes d'inventaire « enrichies ». C'est sur ces travaux que le présent article se focalise, tout en donnant un aperçu des autres possibilités de cette technologie à plus ou moins long terme. Le second volet envisage la description détaillée du compartiment constitué par le houppier de l'arbre, par la reconstitution de la géométrie de sa tige et de ses branches. Ce travail plus exploratoire est conduit au sein du LERFoB, et fait l'objet d'un autre article dans ce dossier.

Le Lidar terrestre, qu'est-ce que c'est ? Pour quoi faire ?

Le lidar terrestre est un appareil électronique, à peu près de la taille d'une boîte à chaussure, monté sur un trépied. Il émet à très grande vitesse des rayons lasers dans toutes les directions. À partir des échos renvoyés par les objets, cet appareil permet de reconstituer un nuage de points en trois dimensions représentant la « scène ». Ce nuage a une très haute résolution – de 20 à 180 millions de points pour une placette de 15 à 20 m – et une grande précision, chaque

point étant positionné à quelques millimètres près. L'encadré 1 détaille son fonctionnement et ses caractéristiques principales.

Une technologie a priori intéressante en forêt...

La transportabilité de l'appareil, sa portée (supérieure à 100 m) et une vitesse d'acquisition très élevée permettent aisément d'utiliser cette technologie pour scanner des placettes forestières. Par exemple, avec les matériels actuels, pour un scan de 8 minutes on obtient à une distance de 10 mètres du scanner un espacement entre deux points de 6,5 millimètres¹. Si on considère une portion d'un tronc de 30 cm de diamètre sur une hauteur de 20 cm (pour estimer le diamètre à 1,30 m par exemple), on obtient environ 1 400 points à une distance de 10 m, ou 700 points à 20 m. Cela permet d'envisager une estimation précise des diamètres à différentes hauteurs, même si une seule face de chaque tronc est visible. Qui plus est, il est possible si besoin de combiner des scans réalisés en différentes positions de la placette. Le sol renvoie également de nombreux échos laser, ce qui permet d'avoir un repérage vertical sur les tiges, pour positionner le diamètre de référence à 1,30 m par exemple. Enfin, le scan étant hémisphérique, il est possible d'acquérir des données sur l'ensemble d'une placette, y compris en hauteur.

...notamment pour les inventaires d'aménagement

Un scan terrestre permet ainsi de capturer la géométrie d'une placette forestière sous la forme d'un nuage de points 3D. On peut donc logiquement espérer obtenir un certain nombre de données dendrométriques, en analysant ce nuage de points.

La première variable d'intérêt est évidemment le diamètre à 1,30 m des arbres de la placette. La position des arbres apparaît aussi relativement facile d'accès, ce qui est important pour implanter des placettes permanentes (la localisation est utilisée pour retrouver les arbres au second passage). Ainsi il semble possible d'obtenir les données de base de l'inventaire, sous réserve d'attribuer une essence à chaque arbre dans le cas de peuplements mélangés. Mais c'est dans l'estimation du défilement du tronc et du volume de la tige (jusqu'à une certaine découpe) qu'on peut attendre la plus forte plus-value de cette technologie. C'est aussi dans l'évaluation quantitative de certains critères de qualité des tiges, tels que leur sinuosité, leur verticalité ou les caractéristiques de leur branchaison. L'observation des nuages de points (figure 1) laisse penser que l'information nécessaire est bel et bien disponible dans les données scannées. Cela dit, reste à les extraire sous une forme utilisable...

Passer de points à des arbres, une étape indispensable mais difficile

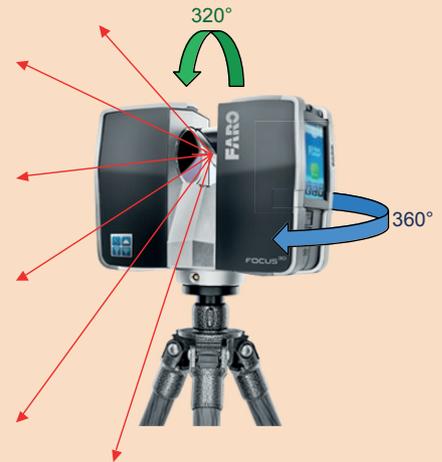
En effet, le problème principal, c'est que le système fournit un ensemble de points en 3D, et non pas directement les variables intéressantes. Il faut donc utiliser des algorithmes (chaînes de calcul) permettant d'extraire du nuage de points les informations recherchées.

La première étape est d'éliminer le bruit du nuage, c'est-à-dire des points ne correspondant pas à des objets réels, générés par des phénomènes parasites. Heureusement les logiciels fournis avec les scanners Lidar terrestre incluent en général des algorithmes de filtrage du bruit très performants. Ensuite, il faut séparer les points appartenant respectivement à la végétation et au sol, ce qui permet de générer un modèle numérique de terrain, qui servira de référence verticale en tout point de la placette. Puis il s'agit d'isoler au sein du nuage les points de chaque arbre,

1-Le scan Lidar terrestre, fonctionnement et caractéristiques principales

Principe de fonctionnement

Un rayon laser est émis en continu. Grâce à un miroir tournant à très grande vitesse, ce rayon balaye toutes les directions dans un plan vertical. Par ailleurs, le système tourne autour de l'axe vertical, permettant ainsi un balayage de toutes les directions horizontales. Des rayons sont donc émis de façon hémisphérique (hors une petite zone d'ombre sous le scanner, d'environ 40°). Pour chaque rayon émis, l'écho renvoyé par le premier obstacle rencontré est reçu, après avoir été redirigé par le miroir. Le système calcule le temps que le faisceau a mis à faire l'aller-retour pour déterminer la distance de l'objet.



Connaissant précisément l'angle horizontal et vertical selon lequel le rayon a été émis, le système calcule la coordonnée en trois dimensions du points d'impact et l'enregistre sur un disque dur intégré, ainsi que l'intensité du signal de retour (réflectance).

Caractéristiques principales du scanner FARO Focus 3D, utilisé par l'ONF :

- Portée effective : 120 m
- Poids (scanner, batterie incluse) : 5 Kg (plus 2 Kg pour le trépied)
- Vitesse maximale d'acquisition : 976 000 points par seconde
- Résolution maximale possible : 1,6 mm entre 2 points à 10 m (1h30 par scène)
- Résolution habituelle : 6,3 mm entre 2 points à 10 m (7 mn par scène)
- Caméra CCD, permettant d'intégrer une information de couleur pour chaque point (ajouter 2 minutes au temps de scan)

pour pouvoir ajuster une géométrie décrivant le tronc et éventuellement les branches. Le plus simple est d'ajuster une succession de cylindres pour décrire le tronc ou une branche.

Une des difficultés majeures est de gérer le fait que chaque rayon laser est arrêté au premier impact, ce qui génère des ombres portées, masquant ainsi une partie de la scène (portions de troncs, parties du sol, etc.). La figure 2 montre un exemple classique de ce phénomène nommé occlusion. Il faut donc, soit pallier ces données manquantes, soit multiplier les positions de scan pour minimiser les occlusions. Une autre difficulté vient du fait que les rayons sont espacés d'un angle constant. Plus on s'éloigne de l'appareil, plus l'espacement entre les points augmente. Il faut en tenir

compte pour fixer la taille des placettes, mais aussi dans le traitement des données. Ainsi en général, pour garantir une résolution suffisante, on ne travaille que sur la partie du nuage de points correspondant à une placette de 15 à 20 m de rayon.

Existe-il des logiciels utilisables pour la forêt ?

Pour utiliser des placettes scannées au lidar terrestre en inventaire, il faut donc disposer de logiciels de traitement des nuages de points.

Les logiciels généralistes ne sont pas adaptés

Il existe des logiciels généraux de géométrie 3D, qui permettent de filtrer les nuages de points et d'ajuster des objets géométriques

¹ Cela ne correspond qu'au quart de la résolution maximale possible, qui nécessiterait un temps de scan d'environ 1h30.

simples sur une partie des points (des cylindres par exemple). S'ils sont très utiles en recherche pour obtenir des références (comme dans l'article suivant de ce dossier) ou tester des approches, ces logiciels posent un problème majeur : les traitements sont en grande partie manuels, ce qui conduit à des temps d'analyse des nuages prohibitifs, même pour des opérateurs expérimentés.

De quels logiciels spécialisés dispose-t-on ?

Du côté des équipes de recherche, les premiers travaux sur l'utilisation du Lidar terrestre pour extraire des données dendrométriques datent de 2002 en Allemagne. Cependant, si au niveau international le nombre de laboratoires s'intéressant à cette question n'a cessé de s'accroître depuis, la plupart travaillent sur des cas d'études relativement restreints (plantations ou peuplements assez simples) et avec des outils difficilement transférables en production.

Sur la base des premiers travaux scientifiques sur le Lidar terrestre

en forêt, la société irlandaise Treemetrics® a mis au point depuis 2005 un logiciel qui permet d'extraire les troncs d'arbres pour une placette et de calculer leur volume. Les algorithmes utilisés, calibrés dans des plantations d'épicéa de Sitka, s'adaptent assez bien à des peuplements très réguliers (plantation de pins, hêtraies cathédrales...), mais sont beaucoup moins efficaces dans des peuplements stratifiés, présentant un sous étage significatif ou avec des tiges de forme complexe (cépées, fourches basses...). Extrêmement utile pour optimiser les découpes et le lotissement de plantations avant coupes, ce logiciel apparaît peu adapté à bon nombre de peuplements gérés par l'ONF (taillis-sous-futaies, peuplements irréguliers, présence de sous-étage...).

Spécificité des besoins de l'ONF

Du point de vue des inventaires d'aménagement, il est important de disposer d'algorithmes robustes, aptes à analyser des placettes issues des différents types de peuplements gérés par l'ONF. Ces algorithmes

doivent aussi être capables de traiter les cas difficiles, fréquents en forêt : arbres fourchus, arbres tordus, présence de régénération ou de végétation basse, branchaison complexe... Enfin, ces algorithmes doivent être les plus automatisés possibles, pour rendre envisageable leur utilisation en aménagement dans le futur.

Le département R&D de l'ONF (pôle de Nancy) a donc initié début 2010, dans le cadre du projet EMERGE, la mise au point d'un logiciel de traitement des placettes forestières, nommé Computree. À noter que la section Inventaire forestier national de l'IGN, partenaire privilégié dans ce projet, partage globalement les mêmes besoins que l'ONF quant à la variété potentielle d'applications de cette technologie.

Le projet Computree

La logique qui a guidé la construction de la plateforme Computree consiste à valoriser au mieux les travaux innovants des équipes de recherche, tout en gardant constamment à l'esprit



Fig. 1 : un exemple de scan Lidar terrestre

Sur la droite au premier plan, on peut voir une cible de calage sur un jalon, permettant de fusionner plusieurs scans.

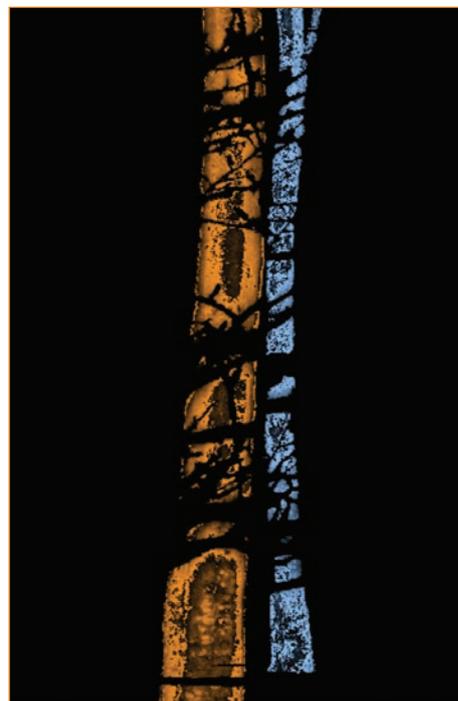


Fig. 2 : cas typique d'occlusion, à cause de branches situées entre le scan et l'arbre

les besoins du gestionnaire. Il s'agit donc de combiner des algorithmes mis au point par différents laboratoires, afin d'estimer des variables dendrométriques importantes pour l'inventaire. L'accent est également mis sur la performance des calculs, afin d'obtenir des temps d'analyse des nuages de points compatibles avec une utilisation opérationnelle.

Une plateforme modulaire et ouverte : mutualiser les travaux des partenaires

La plateforme a donc été conçue de façon à pouvoir utiliser la complémentarité d'algorithmes développés en parallèle dans différentes équipes. Un système de modules permet à chaque équipe de travailler de façon autonome, tout en rendant très aisée l'utilisation combinée des différents travaux. La plateforme est donc ouverte et modulaire, pour que la communauté scientifique et technique impliquée puisse facilement évoluer. De plus, une attention particulière a été portée aux capacités de visualisation et de diagnostic de la plateforme. Le but est, d'une part, d'avoir la possibilité d'étudier en profondeur le comportement des algorithmes et d'évaluer leur robustesse quand le type de peuplement varie; d'autre part, il s'agira lors de l'utilisation opérationnelle du logiciel, de pouvoir contrôler facilement la qualité des traitements réalisés.

Une communauté qui s'organise au niveau international

La plateforme a été conçue et est pilotée par le département R&D de l'ONF, en collaboration étroite avec Arts et Métiers ParisTech (Cluny). Ces deux partenaires principaux gèrent la plateforme en elle-même, et ont créé des algorithmes d'extraction du sol, de détection des tiges, et d'estimation des diamètres à 1,30 m.

En France, plusieurs équipes de recherche contribuent au projet. Le LERFoB (laboratoire d'étude des ressources forêt-bois / AgroParisTech et INRA) à Nancy, étudie l'estimation

de la qualité des tiges sous l'angle d'indicateurs d'inclinaison / courbure ainsi que de la détection des branches et des gourmands. Cette équipe réalise par ailleurs – pour le moment hors de Computree – des travaux sur l'architecture détaillée des houppiers (cf. article suivant de ce dossier). Le LE2I (laboratoire d'électronique, informatique et image / Université de Bourgogne et CNRS) au Creusot et l'ONF, encadrent une thèse de doctorat qui étudie la reconnaissance automatisée des essences forestières dans les placettes scannées au Lidar terrestre, par des approches d'analyse d'image. Cette thèse est co-financée par l'ONF et la région Bourgogne. Le LSIS (laboratoire des sciences de l'information et des systèmes / Université de Marseille et CNRS) à Marseille collabore avec l'ONF pour enrichir Computree d'algorithmes de pointe en traitement de données 3D, afin d'améliorer l'efficacité et la précision de la détection des tiges. L'IGN (institut national de l'information géographique et forestière) et l'ONF ont un partenariat centré sur l'estimation du volume des tiges et surtout sur la validation de Computree sur une vaste gamme de peuplements. En effet, depuis 2010, l'IGN réalise des scans Lidar terrestres sur une partie des placettes du réseau d'inventaire forestier national.

Au Québec, le département de géomatique de l'Université de Sherbrooke conduit des travaux pour estimer précisément le défilement des tiges et le volume des arbres. Des recherches sont également conduites sur l'estimation de l'indice foliaire, et plus généralement sur la répartition en trois dimensions des houppiers des arbres, sur la base d'approches par voxels (pixels en 3D). En Belgique enfin, l'Université de Gembloux travaille sur l'utilisation du Lidar terrestre en forêt tropicale – avec un cas d'application au Congo –, les arbres ayant dans ce contexte des formes particulières impactant fortement les estimations de volume

(empattements importants, cannelures marquées...). Par ailleurs, plusieurs autres équipes internationales (Allemagne, Australie) ont fait part de leur intérêt pour la plateforme en vue d'éventuelles collaborations.

Des résultats encourageants pour l'inventaire forestier

En 2011, un stage de master 2^e année, financé par le projet EMERGE a permis d'évaluer les algorithmes de Computree sur une gamme de peuplement assez large (110 placettes IFN dans toute la France, plus 17 placettes ONF en contexte de hêtraie mélangée en Meuse). Avec un unique scan central, le taux de détection moyen des arbres de plus de 7,5 cm de diamètre se situait, hors saison de végétation, entre 90 % et 95 % pour des placettes de 15 m de rayon; ce taux se dégradait (moyenne de 80 %) en cas de très forte densité de régénération ou de sous étage, ou si les scans étaient réalisés en saison de végétation, du fait de fortes occlusions. À l'inverse, l'utilisation de plusieurs scans par placette permettait d'avoir des taux de détection situés entre 95 % et 100 %. Une autre façon d'atteindre ce niveau de détection consistait à réduire le rayon des placettes à 10-12 m. Dans tous les cas, la position estimée des arbres détectés était très précise. Quant au diamètre à 1,30 m, l'écart avec des mesures de références était de moins de 10 % pour la majorité des arbres. Cependant, pour une petite proportion d'arbres subissant de très fortes occlusions, l'estimation était nettement moins bonne. L'encadré 2 présente la chaîne algorithmique utilisée lors de cette validation.

Le logiciel semble donc pouvoir être utilisé avec une bonne confiance dans des contextes de futaie régulière avec peu de sous-étage avec une bonne confiance. Les peuplements de taillis-sous-futaie, irréguliers ou à forte présence de sous-étage nécessiteront probablement d'avoir progressé sur la robustesse des algorithmes.

Ainsi, les travaux conduits à partir de 2012 avec le LSIS de Marseille, l'université de Sherbrooke et l'IGN se concentrent sur une meilleure robustesse des algorithmes aux occlusions et sur une amélioration de la précision des estimations. Ils visent également à estimer le volume des tiges.

Combien de scans pour une placette ?

À l'issue de cette première validation en 2011, il apparaît deux stratégies possibles pour obtenir une détection maximale des arbres. La première consiste à réaliser des placettes relativement petites – entre 10 et 12 m de rayon – avec un unique scan central. L'avantage est la rapidité : il faut compter 10 à 15 minutes par placette hors déplacements. Par contre, cela suppose de mesurer un plus grand nombre de placettes pour garder une bonne représentativité des peuplements.

La seconde possibilité est de choisir des placettes plus grandes – entre 15 et 20 m de rayon – en réalisant plusieurs scans par placette. Une approche systématique consiste à effectuer un scan central et quatre scans périphériques, puis à les combiner ; l'opération prendrait en moyenne 1h30 par placette. En effet, en plus du temps de scan, il faut prévoir le temps de placer des cibles de calage visibles depuis les différentes positions de scan, dont le rôle est de permettre une fusion millimétrique des nuages de points. De plus les nuages ainsi fusionnés occuperont plus de place en mémoire et conduiront à des temps de traitement sensiblement allongés. Il est également possible d'imaginer une version adaptée de la seconde stratégie, où le nombre de scans par placette et leur position seraient optimisés pour minimiser les occlusions. Cela conduirait à des placettes décrites par un à cinq scans (selon qu'on a affaire à des peuplements clairs sans sous-étage ou des placettes avec une très forte occlusion). Ce compromis

2- La chaîne algorithmique utilisée dans Computree (version de juillet 2011)

Filtrage du bruit (réalisé dans le logiciel fourni avec le scanner).

Chargement du nuage de points dans Computree.

Extraction de la placette (15 m ici).



Détection des points du sol (en marron).

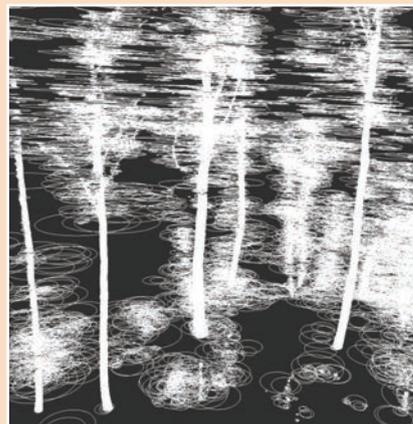
Création du MNT (en blanc, difficile à percevoir sur l'image).

Extraction des points de la végétation (en vert). Seuls ces points sont conservés pour la suite.



Les points sont regroupés en fonction de leur proximité, par tranches horizontales de 1 cm d'épaisseur.

Pour chaque groupe de points, un cercle est ajusté. Seul les groupes suffisamment circulaires sont conservés. Cela permet de ne garder que les points appartenant aux troncs et branches principales.



Regroupement des groupes de points horizontaux, en fonction de leur continuité verticale, afin d'obtenir des sections numériques, correspondants aux troncs ou branches principales.

La figure représente le modèle numérique de terrain (en blanc), les points végétation (en gris foncé), ainsi que les arbres détectés, en couleurs.



permettrait de réduire le temps d'acquisition moyen par placette (a priori de l'ordre de 30 à 45 minutes selon les contextes), mais nécessiterait que les opérateurs soient formés à l'optimisation de la position des scans. Les critères d'optimisation en question restent cependant à établir plus précisément.

La question de la reconnaissance des essences

Une autre question importante, lorsqu'on s'intéresse à des peuplements mélangés, est d'obtenir l'information sur l'essence des arbres mesurés. La thèse de doctorat initiée avec le LE2I du Creusot étudie la possibilité d'obtenir une reconnaissance automatisée à partir des scans laser. Cependant, il est difficile à ce stade de prévoir quel sera le niveau d'exhaustivité de ces méthodes. Il faudra donc peut-être envisager des méthodes semi-automatisées, combinant algorithmes et reconnaissance sur le terrain d'une partie des tiges.

Le Lidar terrestre pour répondre à de nouveaux enjeux

Le Lidar terrestre semble donc pouvoir fournir à moyen terme une solution efficace pour la mesure précise et détaillée de placettes d'inventaires, avec en particulier la possibilité d'accéder au volume des tiges et à des indicateurs de qualité. En complément, l'article suivant de ce dossier présentera des travaux visant à décrire finement l'architecture du houppiers, à l'aide de plusieurs scans Lidar terrestre autour d'un arbre unique, afin en particulier d'avoir une estimation précise du volume total à la découpe 7 cm.

Au-delà de la réalisation d'inventaires classiques, cette technologie laisse également entrevoir des possibilités nouvelles de description des forêts. En effet, elle permet d'obtenir une réelle description en trois dimensions de la géométrie des peuplements. Nous disposons ainsi



M. Dassot, LERFoB

de données à très haute résolution sur la structure des peuplements et plus généralement sur la répartition de la biomasse dans l'espace. Les applications envisagées sont de la description des habitats, l'évaluation des risques d'incendies, la modélisation de l'éclairage sous couvert et ses conséquences sur le potentiel de régénération et l'évaluation de l'état sanitaire des peuplements (en particulier à l'aide de l'évaluation de la surface foliaire : LAI).

Par sa construction ouverte et collaborative, nous espérons que la plateforme Computree permettra à ces nombreuses applications de se concrétiser par de outils à la fois innovants et opérationnels pour la gestion forestière.

Alexandre PIBOULE

ONF, département R&D

Michael KREBS

Arts et Métiers ParisTech
Cluny, Équipe Bois

Étienne TRICOT

Stage de fin d'étude -
Arts et Métiers ParisTech Cluny

Aurélien COLIN

Stage de master FAGE-
Université Henri Poincaré,
Nancy I / ONF

Le Lidar terrestre : vers un inventaire en volume...

L'article précédent présentait des perspectives d'utilisation du Lidar terrestre en inventaire forestier à court ou moyen terme. Mais au-delà de l'estimation automatique de la position et du diamètre à 1,30 m des arbres, la réelle plus-value de cette technologie réside dans la nature tridimensionnelle des nuages de points acquis. En effet, la densité de points élevée laisse espérer un cubage précis d'arbres sur pied. Idéalement il faudrait pouvoir cuber de façon automatique les arbres des placettes scannées, et c'est bien là un objectif opérationnel à moyen ou long terme.

Cependant, une première étape consiste à scanner des arbres individuels de façon détaillée et à évaluer la précision du volume obtenu à partir des données Lidar terrestre. C'est la suite logique des travaux du siècle passé ayant abouti aux tarifs de cubage que nous utilisons aujourd'hui. En effet, à cette époque, les chercheurs ont billonné entièrement des arbres adultes, pour mesurer précisément leur volume et établir des tarifs basés sur le diamètre à 1,30 m et la hauteur (Pardé et Bouchon, 1988). Ce travail colossal était par nature limité aux essences les plus courantes et à un effectif restreint d'arbres mesurables, du fait du coût considérable de ces opérations. Aujourd'hui, la technologie Lidar terrestre (ou T-Lidar), permet d'espérer réaliser des cubages de précision au moins équivalente, de façon beaucoup plus rapide et non destructive. Encore faut-il commencer par mettre la méthode au point et la valider face à des mesures de référence, et donc cuber manuellement des arbres adultes par ailleurs scannés.

Cet article présente les travaux du Lerfob en ce sens, réalisés dans le cadre de la thèse de Mathieu Dassot financée par le projet EMERGE et

encadrée par Thiéry Constant, Meriem Fournier et François Ningre (Dassot et al. 2012).

Du nuage de points à la maquette numérique 3D des arbres

L'article précédent s'intéressait à la reconstitution de placettes d'inventaires. L'enjeu consistait à détecter des arbres, puis à estimer la géométrie du tronc de la tige, en particulier dans sa partie inférieure. Ici le but est de scanner précisément des arbres

individuels. Il est donc possible d'éviter les effets de masquage dus aux arbres voisins en plaçant le scanner de manière optimale.

Comment scanner entièrement un arbre ?

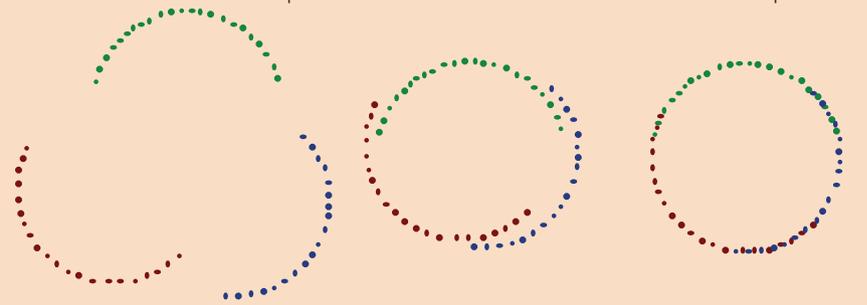
Pour avoir l'estimation la plus précise possible de la géométrie de l'arbre et donc de son volume il est souhaitable de le décrire sur l'intégralité de sa circonférence. Il est donc préférable de réaliser plusieurs scans autour de l'arbre de façon à numériser toutes les faces de la tige.

La fusion de scans multiples

Lorsque l'on réalise plusieurs scans sur une même scène se pose la question de la fusion des nuages de points. En effet, pour obtenir la forme fidèle des troncs, les points issus des différents points de vue doivent être combinés avec une grande précision. Une précision de l'ordre du millimètre permet d'éviter une déformation artificielle des troncs mesurés, et donc des erreurs sur le volume estimé. La localisation par GPS et l'orientation des scans par boussole ne suffisent pas pour cette qualité de calage, et des méthodes de géomètres seraient très coûteuses en temps.

Une solution opérationnelle proposée par les fabricants de scanners consiste à positionner dans la scène des sphères de calage (d'environ 15 cm de diamètre), qui serviront de points de référence dans chaque nuage. Au moins trois sphères différentes doivent être communes à chaque paire de scans pour obtenir une précision de fusion satisfaisante. Une fois les scans réalisés, le logiciel fourni avec le scanner (FARO Scene® dans notre cas), est capable de détecter automatiquement les points correspondant aux sphères dans les nuages. Il ajuste pour chacune une sphère numérique permettant une estimation très précise de son centre. Ensuite la géométrie de positionnement des sphères dans l'espace permet de positionner les scans relativement entre eux et des les fusionner automatiquement avec grande précision. Le nuage résultant peut être traité comme si il avait été acquis en une seule fois.

Le schéma ci-dessous illustre l'intérêt d'une fusion précise des nuages. Les points obtenus pour une section d'arbre, issus de trois points de vue sont représentés en rouge, vert et bleu. À gauche les points de vue non fusionnés. Au centre une fusion approximative génère une section chaotique, difficilement utilisable. À droite une section finement fusionnée permettra une reconstitution et des estimations précises.



De plus, si l'on s'intéresse au volume total, il faut décrire également avec peu d'occlusions les branches maîtresses de la tige. Là encore, le fait d'avoir plusieurs points de vue autour de l'arbre évite le masquage des branches entre elles.

La première difficulté à surmonter est alors de fusionner avec grande précision les différents nuages de points. L'encadré 1 présente la solution technique employée pour cela. *A priori*, trois scans bien répartis (figure 1) semblent un compromis optimal entre durée de scan et précision des données. En effet, il faut éviter de trop multiplier les scans pour des raisons de temps de mesure, mais aussi et surtout pour éviter d'obtenir un nuage de points fusionné de trop grand volume qui poserait des problèmes de stockage et de temps de traitement par la suite.

L'impact du vent sur le scan est un autre problème à ne pas négliger quand on s'intéresse à la partie houppier des arbres. Lorsqu'il y a trop de vent, les branches se balancent pendant le scan, ce qui génère des effets de bougé. De plus, lorsqu'on fusionne les scans, une même branche peut avoir été scannée à différentes positions, ce qui perturbe l'analyse de sa géométrie. Pour ce type de travaux il est donc souhaitable d'éviter les scans par temps venteux. Par ailleurs, il parait préférable de ne pas intégrer un des scans si celui-ci a subi des rafales, même si cela conduit à réduire l'exhaustivité de la description de l'arbre. Une autre approche est de ne prendre pour chaque branche que le scan qui donne le meilleur point de vue, afin d'éliminer les doublons dus au déplacement des branches sous l'effet du vent.

Pré-traitements

Comme dans le cas de l'analyse par placette, il faut ensuite filtrer le nuage de points pour éliminer le bruit. Il faut également isoler l'arbre mesuré dans le nuage. À terme, la segmentation automatique développée dans

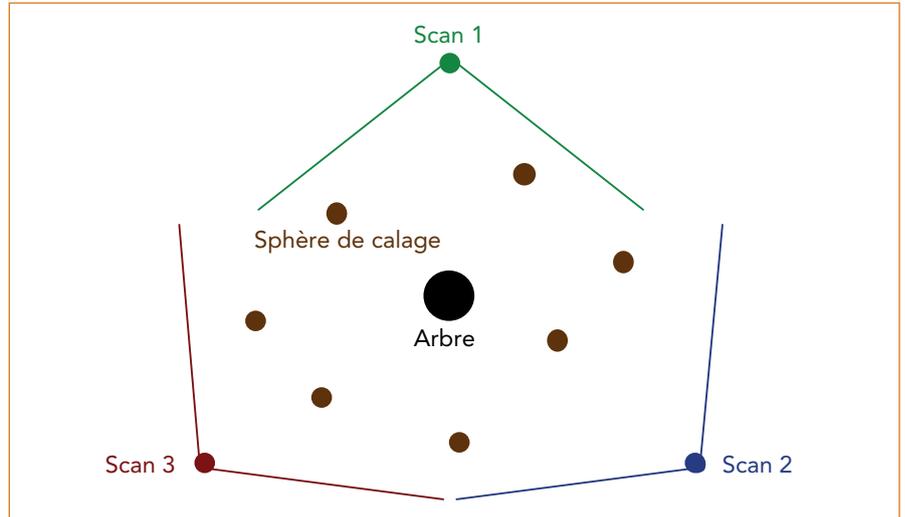


Fig. 1 : positionnement typique des différentes positions de scans et des sphères de calage par rapport à l'arbre mesuré

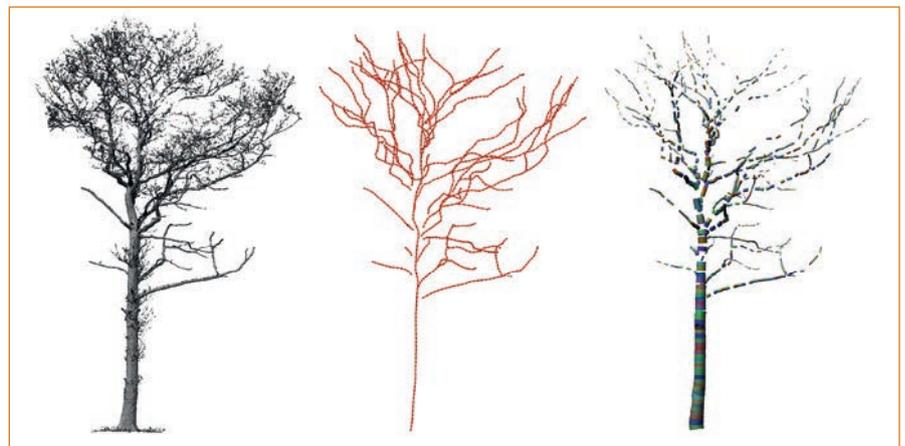


Fig. 2 : méthode de reconstitution de la maquette 3D de l'arbre

À gauche le nuage de points, au centre le squelette composé de segments linéaires, à droite la reconstitution par cylindres.



Fig. 3 : approche détaillée, illustrée pour un billon

À gauche les points bruts provenant de deux points de vue, au milieu la série des cylindres servant à l'estimation du volume et à droite le maillage géométrique correspondant.

Computree (voir article précédent) pourrait réaliser cette opération automatiquement. Computree n'étant pas encore suffisamment avancé au moment de ces travaux, et comme il fallait garantir de ne perdre aucune partie de l'arbre d'intérêt, cette individualisation a été réalisée manuellement dans le logiciel généraliste de traitement de nuages 3D PolyWorks, qui permet d'y parvenir en peu de temps.

Un arbre comme un squelette composé de cylindres

L'opération de reconstitution en 3D de la géométrie de l'arbre peut alors commencer. L'approche choisie consiste à représenter un arbre comme une succession de cylindres insérés les uns au bout des autres.

Pour les obtenir, la première étape consiste à reconstituer un squelette de l'arbre, décrivant l'insertion des branches les unes par rapport aux autres et par rapport au tronc. Chaque élément ligneux est ainsi reconstitué par une série de segments attachés les uns aux autres. Cette opération est réalisée pour le tronc et ensuite pour chaque branche jusqu'à une découpe d'environ 7 cm. Le logiciel Polyworks est là encore utilisé, car il fournit des outils permettant de faciliter cette opération, en « accrochant » les segments aux points du nuage. Dans un deuxième temps ces segments sont redécoupés, pour obtenir une précision de description homogène. On obtient ainsi un squelette composé de petits segments de 25 cm de long. Pour chaque segment unitaire de 25 cm, un cylindre est ajusté automatiquement sur les points du nuage, selon la direction du squelette, à l'aide de Polyworks. Quand l'ajustement de cylindre conduit à une représentation aberrante du segment, le cylindre est éliminé manuellement. Cela peut arriver dans les cas où l'élément est mal décrit par le nuage de points : zone d'occlusion, bruit résiduel, géométrie complexe... La figure 2 montre un exemple de maquette ainsi reconstituée.

Essence	Nombre d'arbres	Diamètres échantillonnés (cm)
Chêne sessile	17	18 à 94 cm
Chêne pubescent	3	28 à 36 cm
Robinier	4	15 à 23 cm
Aulne glutineux	5	32 à 48 cm
Frêne commun	4	28 à 65 cm
Tilleul à petites feuilles	3	33 à 43 cm
Bouleau verruqueux	4	22 à 52 cm
Pin d'Alep	2	42 à 44 cm

Tab. 1 : répartition de l'échantillon par essence et diamètre

Enfin, la maquette géométrique obtenue est exportée dans Microsoft Excel afin de réaliser une extrapolation des zones manquantes (zones sans points ou cylindres non retenus), et calculer les variables d'intérêt. Pour chaque élément on a un segment de longueur et de diamètre médian connu. Le volume est calculé par une formule de tronc de cône délimité par les diamètres médians des cylindres successifs, et cumulé en fonction de la découpe. Cela permet de calculer le volume à toute découpe supérieure ou égale à 7 cm, ainsi qu'un profil cumulé de répartition de ce volume en fonction de la découpe.

Une version plus détaillée

L'approche par cylindres semble globalement fournir une bonne approximation du volume. Cependant, pour la base de la tige (les premiers mètres), la géométrie est souvent complexe (forts empattements, sections non circulaires par exemple). Aussi une autre approche a été menée en parallèle pour se donner la référence la plus précise possible du volume des 6 premiers mètres de la tige. Le nuage de points correspondant au tronc a été modélisé par une surface en trois dimensions détaillée, obtenue par maillage. La figure 3 présente un exemple de résultat obtenu.

Cette méthode ne vaut que pour le bas de la tige, car elle nécessite un très faible taux d'occlusions, le maillage devant être totalement « étanche ». Mais elle permettra d'évaluer la précision de l'approche par cylindres qui, elle, est théoriquement plus approximative dans cette partie.

Quelles données de référence pour valider la méthode numérique ?

La maquette géométrique obtenue doit ensuite être validée de façon rigoureuse. Pour cela il faut pouvoir estimer le volume réel des différents éléments de l'arbre. Au cours de la campagne de mesure du projet EMERGE menée en 2010, des arbres ont donc été scannés sur pied selon trois points de vue, puis abattus et débités en une succession de billons, jusqu'à la découpe de 7 cm pour le tronc et les branches. Pour chaque billon la longueur et le diamètre à chaque extrémité ont été mesurés au ruban, permettant un cubage grâce à une formule de tronc de cône. La composition de cet échantillon, fixée en coordination avec d'autres actions du projet EMERGE, est indiquée dans le tableau 1.

Le cubage au Lidar terrestre : une méthode fiable et précise

Un volume total découpé 7 cm bien estimé

La figure 4 présente la comparaison en volume total cumulé à découpe 7 cm entre données de référence de la méthode destructive et données issues de la reconstruction numérique par cylindres. Pour des volumes mesurés allant de 0,18 (Robinier) à 11,8 m³ (Chêne sessile), l'écart moyen entre la mesure numérique et la mesure manuelle destructive de

référence est inférieur à 10 %. Une comparaison plus détaillée de la longueur cumulée des axes, du volume tige donne des précisions similaires. Pour le volume des branches la précision est un peu moins bonne.

Cette approche, efficace jusqu'à une découpe d'environ 7 cm, est peu adaptée à l'estimation des menus bois (découpes inférieures à 7cm), étant donné la finesse des éléments au regard de la résolution de scan. Cependant des méthodes complémentaires reliant la densité de points

dans l'espace à la biomasse ligneuse, pourraient permettre d'estimer ce compartiment. Cette piste prometteuse mérite d'être explorée à l'avenir.

Une meilleure précision sur la grume

Il faut noter que la méthode manuelle procède par billons plus longs que ceux obtenus par la méthode numérique. Une partie de l'écart peut donc potentiellement provenir de l'approximation de la mesure de référence. En effet, la méthode numérique permet d'avoir des billons

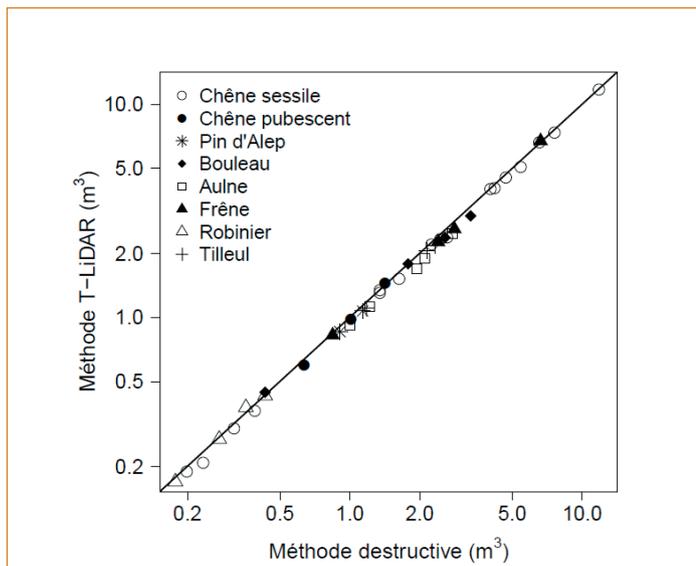


Fig. 4 : comparaison du volume total estimé par méthode T-Lidar et par méthode destructive

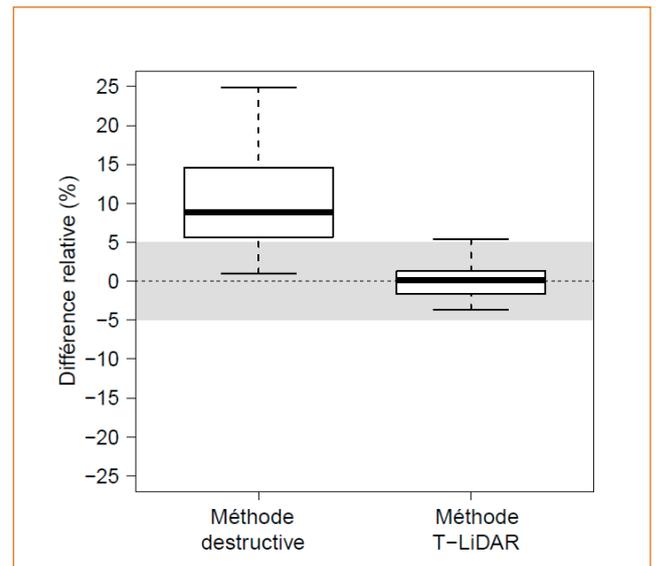


Fig. 5 : pour les 6 premiers mètres des tiges de l'échantillon, comparaison des volumes estimés par la méthode destructive et la méthode T-Lidar (par cylindres), avec celui de la méthode par maillage (représenté par la valeur 0)

Pour les deux méthodes évaluées, le graphique représente, sous la forme d'une « boîte à moustaches » l'étalement des écarts au volume résultant de la méthode par maillage. Le trait épais représente la valeur médiane. La boîte l'entourant contient 50 % des observations. Les « moustaches » représentent les valeurs minimale et maximale. La bande grise permet de visualiser la plage de $\pm 5\%$.

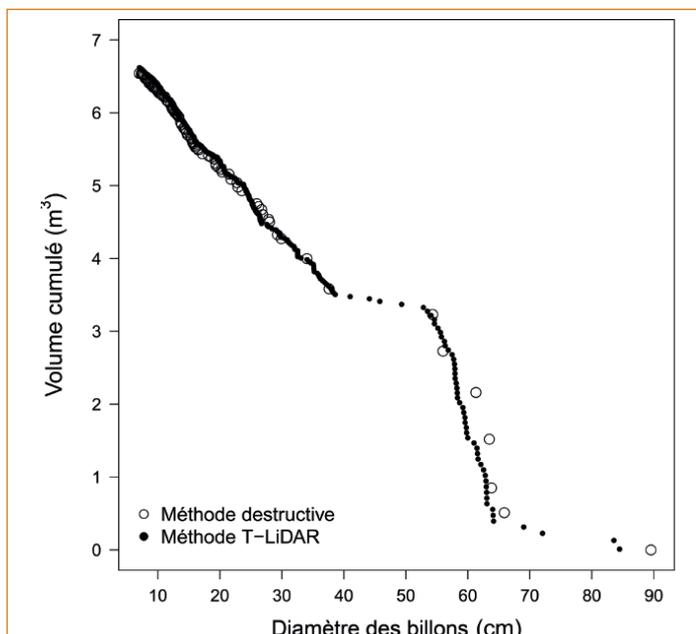


Fig. 6 : profil vertical de volume cumulé d'un arbre en fonction de la découpe, pour la méthode par cylindres et pour la méthode destructive

très courts décrivant très finement la forme des tiges, alors que la mesure de terrain doit trouver un compromis raisonnable entre longueur des billons et temps de mesure. Une façon d'analyser ce point est de comparer, pour les 6 premiers mètres de chaque tige, les volumes estimés par la méthode manuelle, d'une part, et la méthode T-Lidar par cylindres, d'autre part, à la méthode par maillage. La figure 5 présente cette comparaison pour les premiers mètres de la tige. On constate que la méthode par cylindres donne des résultats plus proches de la méthode par maillage que la méthode destructive. Cela s'explique par le fait que sur le terrain, le premier billon fait 2 m de long (les suivants étant plus courts pour s'adapter à la forme de la tige). Or cette partie du tronc est la plus irrégulière, du fait de l'empatement. L'approximation sur 2 m ne capte donc pas très bien les irrégularités de la base du tronc. Cela dit, la partie du volume située dans ces irrégularités n'étant pas valorisable (au sens de la grume), il serait aisé d'adapter l'estimation numérique, pour se rapprocher d'un volume réellement commercialisable.

Un volume fidèle à différentes coupes

Une autre façon de comparer les résultats entre méthode par cylindres et méthode destructive, consiste à tracer le volume total cumulé en fonction de la découpe pour ces deux approches. La figure 6 présente un exemple de cette comparaison pour un des arbres de l'échantillon. Les profils correspondent très bien entre les deux méthodes. Une analyse plus fine de ces profils cumulés montre que les plus gros écarts apparaissent sur la partie basse du tronc, et de façon d'autant plus marquée que la tige a un diamètre important. Ces éléments semblent concorder avec notre interprétation précédente sur la relative imprécision de la méthode destructive pour le bas de l'arbre.

Rapport coût/qualité et perspectives opérationnelles

En plus de son caractère non destructif, l'intérêt de la méthode numérique réside dans la réduction importante du temps de mesure. La mesure de référence destructive nécessite de 1 à 5 hommes jours par arbre selon sa taille. En correspondance, la méthode par cylindres, encore très manuelle à ce stade, nécessite 1 heure de scan à deux personnes sur le terrain, puis un temps d'opérateur de 30 minutes à 4 heures selon la taille de l'arbre pour le traitement informatique. Le gain de temps est donc déjà très sensible. En outre, la méthode numérique à partir des scans T-Lidar nécessite moins de logistique sur le terrain. Enfin, elle semble fournir une description plus fine pour la base de l'arbre et surtout fournit une maquette en trois dimensions de la géométrie de l'arbre, ce que ne donne pas la méthode destructive.

L'un des objectifs est désormais d'automatiser cette méthode au maximum, pour la rendre encore plus efficace en temps, et de l'intégrer dans la plateforme Computree pour cuber les arbres scannés sur les placettes d'inventaires. Cela nécessitera de vérifier que cette approche peut fonctionner en ne disposant que d'une vue partielle de chaque arbre. Concernant le scanner laser en lui-même, il faut signaler une évolution rapide des matériels et de leur coût. Le scanner utilisé pour ces travaux, le FARO Photon 120, a été acquis en 2008 par le Lerfob à l'aide du financement du projet EMERGE et du fonds FEDER Lorraine 2007-2013 ; il pesait 15 kg et coûtait environ 105 k€. En 2011, la même société proposait un modèle plus compact (5 kg) – le FARO Focus 3D 120 – au prix nettement inférieur de 50 k€.

Vers des applications à la qualité des tiges

Au-delà de l'application à l'estimation de volume, la maquette 3D obtenue contient une grande richesse

d'informations, qui peuvent être utilisées pour donner des indicateurs de la qualité des tiges.

La maquette permet par exemple de mesurer de façon très précise les courbures et l'inclinaison de la bille de pied, et de fournir ainsi des critères de rectitude, paramètre important pour la qualité commerciale des tiges. Mais elle donne aussi une répartition détaillée de l'architecture de l'arbre. À partir de la position en trois dimensions des branches, il est possible, par des approches bio-mécaniques, de reconstituer la répartition des masses au sein de l'arbre, ce qui permet de prédire la répartition du bois de réaction dans la tige et donc de donner des informations sur la qualité interne du bois, de façon non destructive. Ces travaux très prometteurs en vue d'apprécier des critères de qualité commerciale des tiges, sont décrits plus en détail dans la thèse de Mathieu Dassot (Dassot, 2013).

Thierry CONSTANT

Mathieu DASSOT

INRA, laboratoire LERFoB

Alexandre PIBOULE

ONF, département R&D

Bibliographie

Pardé J., Bouchon J., 1988. Dendrométrie. ENGREF, 328 p.

Dassot M., Colin A., Santenoise P., Fournier M., Constant T., 2012. Terrestrial laser scanning for measuring the solid wood volume, including branches, of adult standing trees in the forest environment. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 89, pp. 86-93

Dassot M., 2013. Relations entre morphologie, croissance, bois de réaction et contraintes de maturation : apport de la technologie Lidar terrestre pour répondre à des questions écologiques et sylvicoles. Thèse de doctorat. AgroparisTech/ INRA. 182 p.



Fiche technique - Paysage

Intervenir en site classé ou inscrit

Contexte général

La réglementation relative à la protection des sites et des monuments naturels, fondant la notion de patrimoine naturel, a mis en place deux régimes : le **classement** et l'**inscription**, constituant une reconnaissance nationale de la valeur patrimoniale et paysagère des sites concernés.

Si le classement concernait à l'origine des sites ponctuels et pittoresques, la politique actuelle privilégie de grands ensembles paysagers, avec une gestion cadrée par des plans de gestion.



La forêt domaniale de Val Suzon, avec 2 100 hectares en site classé, occupe un vallon pittoresque aux portes de Dijon (Côte d'Or)

Photo : A.-M. Granet / ONF

La réglementation relative à la protection des **sites et monuments naturels** fait l'objet des articles L341-1 et suivants et R341-1 et suivants du code de l'environnement (loi du 2 mai 1930).

Elle est distincte de la réglementation des **monuments historiques** (traitée dans une prochaine fiche technique), faisant l'objet des articles L621-1 et suivants du code du patrimoine (loi du 31 décembre 1913).

Ces deux réglementations peuvent se superposer en un même lieu.

Contexte pour l'ONF

Conformité réglementaire

Les interventions en site classé ou inscrit amenées à le modifier dans son état ou son aspect sont soumises à autorisation ou déclaration au titre du code de l'environnement :

- En site classé, routes, pistes, défrichements, certaines coupes... relèvent d'une **autorisation spéciale** du Ministre chargé des sites (actuel Ministre de l'écologie, du développement durable et de l'énergie) ou du Préfet de département ;
- En site inscrit, une **déclaration** de travaux en Préfecture doit être effectuée quatre mois avant le lancement du chantier.

Ces statuts de protection concernent au quotidien la mise en œuvre de l'aménagement forestier.

La procédure fixée par le 2° de l'article L122-7 du code forestier (ancien article L11) concernant l'approbation des aménagements forestiers donne un nouveau cadre légal à la validation du programme pluriannuel de coupes et travaux par le Ministre chargé des sites.

En 2013, la surface de forêts publiques situées dans des sites classés est de l'ordre de 150 000 ha.

Politique environnementale

Dans le cadre de sa politique environnementale, l'ONF, certifié ISO 14001, s'est fixé comme objectif d'amplifier la prise en compte du paysage dans les aménagements et les travaux. En application des cadrages nationaux, les aménage-

ments prennent en compte la présence d'un site classé ou inscrit pour l'évaluation des enjeux liés à la fonction sociale de la forêt. Au niveau des coupes et travaux, des **prescriptions spécifiques** ont été intégrées au Règlement national d'exploitation forestière (**RNEF**) et au Règlement national des travaux et services forestiers (**RNTSF**), afin que tout intervenant en forêt respecte l'intégrité de tout site protégé (classé ou inscrit).

La réglementation sur les sites classés et inscrits a un large champ d'application.

La présente fiche technique propose une mise en œuvre de cette réglementation au regard des enjeux de gestion en forêt publique. Elle n'a pas valeur de guide juridique et n'aborde pas la création de site classé en forêt, mais seulement la prise en compte de ceux qui existent.

Les DT et DR précisent si besoin les modalités d'application de ces dispositions compte tenu des pratiques en cours.

Les termes suivis de * sont définis dans le glossaire en page 6.



Méthodes et savoir-faire

Intervenir en site classé ou inscrit

Intervenir en site classé

Cadre général

« Les monuments naturels ou les sites classés ne peuvent ni être détruits ni être modifiés dans leur état ou leur aspect sauf autorisation spéciale ».

(Art. L341-10 du code de l'environnement)

« A compter du jour où l'administration chargée des sites notifie au propriétaire d'un monument naturel ou d'un site son intention d'en poursuivre le classement, aucune modification ne peut être apportée à l'état des lieux ou à leur aspect pendant un délai de douze mois, sauf autorisation spéciale et sous réserve de l'exploitation courante des fonds ruraux et de l'entretien normal des constructions ».

(Art. L341-7 du code de l'environnement)

Les sites classés sont des lieux dont le caractère exceptionnel justifie une protection nationale. Il s'agit d'éléments remarquables d'un point de vue naturel ou de lieux dont l'État souhaite conserver, pour les générations futures, les vestiges ou la mémoire des événements qui s'y sont déroulés. L'objectif d'un site classé est donc de conserver ses caractéristiques paysagères en le préservant de toute atteinte à l'esprit des lieux.

Le classement apporte une protection renforcée par rapport à l'inscription (voir page 5) en soumettant à autorisation la réalisation des travaux modifiant le site. Il se traduit par une servitude d'utilité publique (SUP*), inscrite en annexe du plan local d'urbanisme (PLU*).

En pratique, à l'ONF

Hors interventions pour lesquelles la dispense d'autorisation est obtenue en application du 2° de l'article L122-7 du code forestier lors de l'approbation de l'aménagement (voir ci-dessous et page 4), il est conseillé de :

- prendre l'attache de l'Inspecteur* des sites et/ou de l'Architecte* des Bâtiments de France compétents, avant de déposer un dossier de demande d'autorisation spéciale. Cette démarche préalable permet de savoir s'ils estiment nécessaire la procédure de l'autorisation spéciale. En effet, la notion de « modification de l'état ou de l'aspect des lieux » est délicate à apprécier, particulièrement en milieu forestier. La réversibilité des évolutions paysagères engendrées par la gestion forestière constitue un argument à mettre en avant dans la concertation.
- recueillir leurs conseils pour faciliter la procédure d'autorisation spéciale (voir page 3), si celle-ci paraît nécessaire.

Application du 2° de l'article L122-7 du code forestier

« Le propriétaire peut, lorsqu'il dispose d'un des documents de gestion mentionnés au 1° et aux a et b du 2° de l'article L122-3, effectuer les opérations d'exploitation et les travaux qu'il comporte sans être soumis aux formalités prévues par les législations mentionnées à l'article L122-8 dans l'un ou l'autre des cas suivants :

1° Le document de gestion est conforme aux dispositions spécifiques arrêtées conjointement par l'autorité administrative chargée des forêts et l'autorité administrative compétente au titre de l'une de ces législations, et portées en annexe des directives ou schémas régionaux mentionnés à l'article L122-2 ;

2° Le document de gestion a recueilli, avant son approbation ou son agrément, l'accord explicite de l'autorité administrative compétente au titre de ces législations ».

(Art. L122-7 du code forestier)

Le 2° de l'article L122-7 du code forestier offre la possibilité de faire approuver en amont les aménagements au titre de la réglementation des sites classés, afin d'être dispensé des procédures individuelles pour les interventions prévues dans les aménagements.

En pratique, à l'ONF

La demande d'application du 2° de l'article L122-7 du code forestier est recommandée pour tout aménagement forestier proposant une programmation régulière (tous les 1 à 2 ans) d'interventions (coupes et travaux sylvicoles). Mais les travaux ne pouvant être validés que sur cahier des charges détaillé (création d'une desserte forestière, aménagement d'une aire d'accueil du public...) doivent dans tous les cas faire l'objet d'une autorisation spéciale.

D'une façon générale, il est déconseillé d'appliquer cette procédure pour :

- les interventions concernant un site classé de faible surface ;
- les travaux et coupes occasionnels.

Il est recommandé là aussi de prendre l'attache de l'Inspecteur* des sites et/ou de l'Architecte* des Bâtiments de France compétents, avant d'envisager une demande de dispense au titre du 2° de l'article L122-7 du code forestier (voir page 4), pour mieux apprécier son opportunité par rapport à des demandes d'autorisation spéciales de travaux au coup par coup (voir page 3).

> 2

Méthodes et savoir-faire

Intervenir en site classé ou inscrit

Comment obtenir l'autorisation spéciale de travaux et de coupes ?

(A réaliser au titre du processus SAM : Mettre en œuvre les aménagements)

Si elles n'ont pas bénéficié d'une dispense au titre du 2° de l'article L122-7 du code forestier (voir page 4), les modifications de l'état ou de l'aspect du site sont soumises à une **autorisation spéciale**.

Un document ultérieur fournira une méthode pour apprécier quels sont les travaux soumis ou non à autorisation spéciale.

Lorsqu'elle est requise, l'autorisation spéciale dépend :

- pour la plupart des opérations, du Ministre chargé des sites, après consultation et avis de la Commission départementale de la nature, des paysages et des sites (CDNPS*) et éventuellement de la Commission supérieure des sites, perspectives et paysages (CSSPP*);

- dans les autres cas, du Préfet de département qui doit obligatoirement recueillir l'avis de l'Architecte* des Bâtiments de France et peut éventuellement saisir la CDNPS* préalablement à la délivrance de l'autorisation ; si le chantier est situé dans le cœur d'un Parc national, cette compétence du Préfet est transférée au Directeur du Parc. Il s'agit surtout d'ouvrages concernés par le code de l'urbanisme, mais dispensés de formalités ou soumis à déclaration au titre de ce code (ex. : affouillement ou exhaussement < 2 mètres ou d'une superficie < 100 m²).

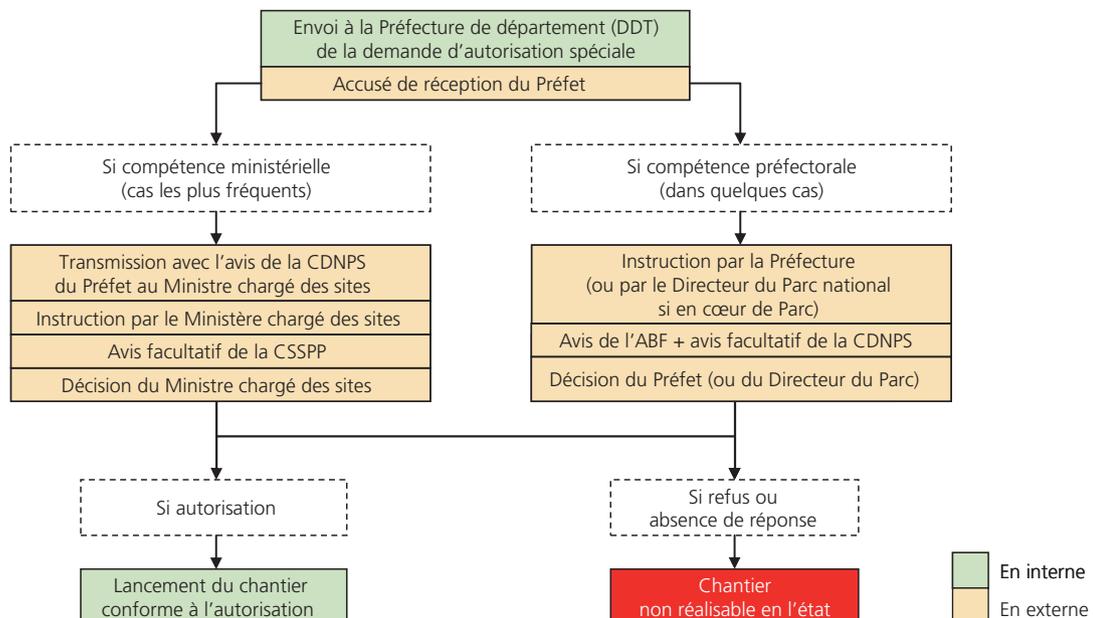
La demande d'autorisation de travaux doit comporter un dossier technique détaillé et souligner les précautions paysagères visant à pré-

server les qualités du site et l'esprit des lieux.

Tant que cette autorisation n'est pas obtenue, le chantier ne peut pas être réalisé. Aucun délai de réponse n'est imposé à l'administration.

En pratique, à l'ONF

En cas d'absence de réponse de l'administration au bout de plusieurs mois, reprendre contact avec elle pour identifier les motifs du blocage.



> 3

Méthodes et savoir-faire

Intervenir en site classé ou inscrit

Comment obtenir une dispense au titre du 2° de l'article L122-7 du code forestier ? (A réaliser au titre du processus EAM : Élaborer les aménagements)

Il est uniquement évoqué ici le recours au 2° de cet article, qui prévoit un accord de l'autorité compétente pour chaque aménagement forestier concerné par un site classé.

L'annexe 1 (relative à la **grille de classement des niveaux d'enjeu** des fonctions principales de la forêt) des Directives nationales d'aménagement et de gestion (DNAG) et des Orientations nationales d'aménagement et de gestion (ONAG) fixe un **niveau d'enjeu fort ou moyen** pour les forêts concernées par un site classé.

Dans le cas d'un site classé en forêt domaniale, les Directives nationales d'aménagement et de gestion (DNAG) demandent de présenter l'aménagement forestier en CDNPS*. Cette présentation constitue un acte de communication et de concertation utile, mais elle est dépourvue de valeur juridique si elle n'est pas suivie d'une autorisation ministérielle.

Hors forêt domaniale, conformément aux Orientations nationales d'aménagement et de gestion (ONAG), la décision de recourir à cette procédure appartient au propriétaire.

En site classé, l'aménagement forestier doit donc contenir, conformément au plan-type de l'aménagement standard :

- 1°) Dans sa partie « Analyses » :
- la carte des statuts réglementaires à caractère touristique ou paysager ;
 - la carte des sensibilités paysagères.

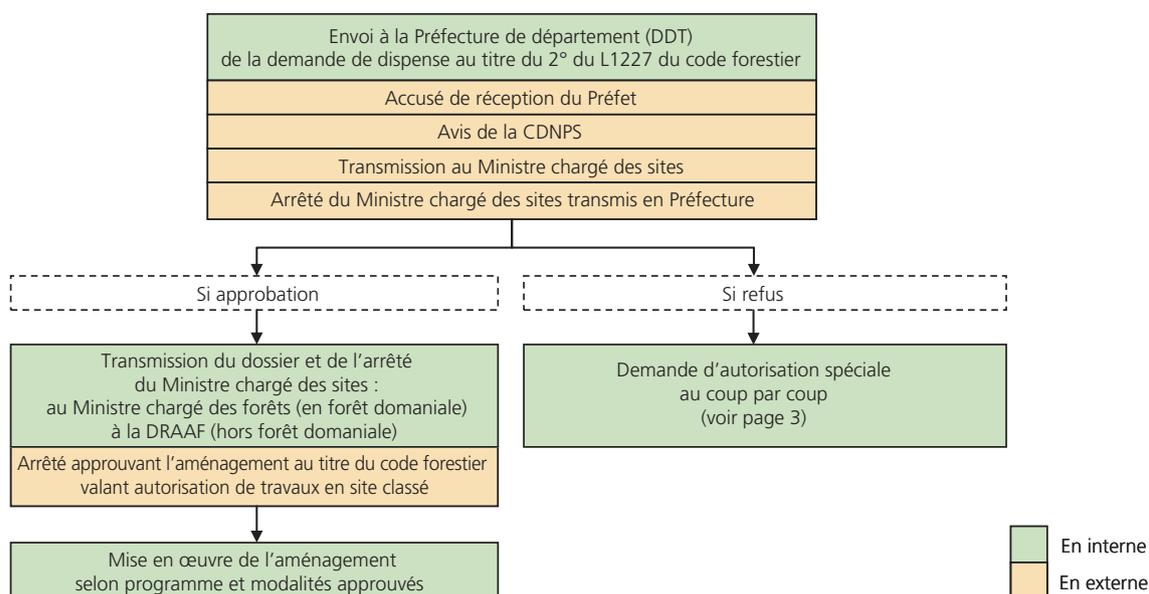
2°) Dans sa partie « Programme d'actions » :

- le programme d'actions en faveur de l'accueil et du paysage ;
- les principes paysagers et clauses techniques applicables aux actions forestières (coupes et travaux) ;
- les documents techniques de référence.

En pratique, à l'ONF

Pour éclairer les services instructeurs et faciliter l'obtention de la dispense, il est conseillé d'ajouter :

- dans la partie « Analyses » : une description des éléments paysagers caractéristiques fondant l'esprit des lieux ;
- dans la partie « Programme d'actions » : une description technique suffisamment étayée des interventions projetées et des mesures paysagères retenues pour en minorer l'impact.



> 4

Intervenir en site inscrit

Cadre général

"Il est établi dans chaque département une liste des monuments naturels et sites dont la conservation ou la préservation présente, au point de vue artistique, historique, scientifique, légendaire ou pittoresque, un intérêt général. L'inscription entraîne, sur les terrains compris dans les limites fixées par l'arrêté, l'obliga-

tion pour les intéressés de ne pas procéder à des travaux autres que ceux d'exploitation courante en ce qui concerne les fonds ruraux et d'entretien normal en ce qui concerne les constructions sans avoir avisé, quatre mois d'avance, l'administration de leur intention."
(Art. L341-1 du code de l'environnement)

L'inscription vise des sites méritant d'être protégés, sans toutefois présenter un intérêt remarquable justifiant leur classement.

Il peut aussi s'agir d'une mesure conservatoire avant un classement.

Application du 2° de l'article L122-7 du code forestier

Le 2° de l'article L122-7 du code forestier (voir page 4) peut également s'appliquer pour les sites inscrits.

Mais, en pratique, cette procédure n'est pas conseillée, sauf pour les forêts comportant également un site

classé sur une surface significative de la forêt.

Quand et comment effectuer la déclaration préalable ?

(A réaliser au titre des processus SAM et parfois EAM)

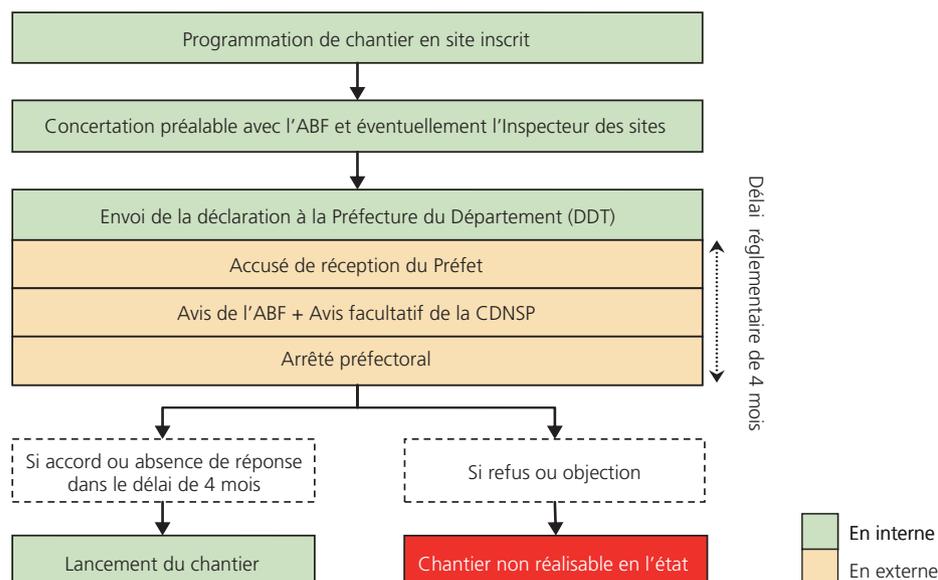
Un document ultérieur fournira une méthode pour apprécier quels sont les travaux soumis ou non à déclaration.

Cette déclaration est à adresser au Préfet du département au moins 4 mois avant le début des travaux.

Elle doit être accompagnée des documents suivants :

- Carte de localisation des travaux ;
- Analyse paysagère sommaire ;
- Liste des mesures paysagères proposées pour garantir le respect des paysages et de l'esprit des lieux sur le site.

Les travaux peuvent commencer dans les conditions prévues dans la déclaration, si l'administration n'a fait aucune objection dans le délai de 4 mois.



Plus d'informations

Sources externes

- > **Code de l'environnement** : articles L341-1 et suivants, R341-1 et suivants
- > **Code forestier** : articles L122-7 et suivants, D122-22 et suivants
- > **Circulaire 98-2 du 17 juillet 1998** relative à la composition des dossiers de classements de sites au titre de la loi du 2 mai 1930 et des dossiers de demandes d'autorisations de travaux dans un site classé
- > **Ministère chargé de l'écologie** : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Sites-.html>

Sources internes

- > **Le droit de l'urbanisme et du patrimoine culturel** - Guide juridique (Département juridique) : 9200-11-GUI-JUR-005
- > **Instruction 09-T-70** : Directives nationales d'aménagement et de gestion (DNAG)
- > **Instruction 10-T-73** : Orientations nationales d'aménagement et de gestion (ONAG)
- > **Instruction 10-P-03** : Politique environnementale de l'ONF
- > **Règlement national d'exploitation forestière** (RNEF) : 9200-08-RN-BOI-004 téléchargeable sur le site Internet de l'ONF en tapant +ec3 dans le moteur de recherche
- > **Règlement national des travaux et services forestiers** (RNTSF) : 9200-10-RN-SAM-001 téléchargeable sur le site Internet de l'ONF en tapant +1147 dans le moteur de recherche
- > **Intraforêt** :
 - page 12932 : Paysage et gestion forestière
 - page ada0 : Politique environnementale

Contact

Au Siège

- > Aspects techniques : christele.gernigon@onf.fr (DERN) regis.bibiano@onf.fr (DTCB)
- > Aspects juridiques : florent.romagoux@onf.fr (DJ)

Dans les territoires

- > Aspects techniques : Spécialistes du Réseau Paysage
- > Aspects réglementaires : Référents juridiques

Cette fiche est éditée grâce au FEDD, conformément au plan d'action de la politique environnementale (SPE : action H10).

Direction de la publication

ONF – DERN/DTCB/DCOM

Rédaction

Jean-Michel MOUREY
Christèle GERNIGON
Eric MEIGNIEN
Régis BIBIANO
Mathieu MOROSINI

Hiver 2013

Glossaire

ABF : Architecte des Bâtiments de France.

Son champ de compétence est très large : gestion du patrimoine monumental et du patrimoine rural, protection et mise en valeur du patrimoine architectural, urbain et paysager, promotion de la qualité de l'architecture et de l'urbanisme.

CDNPS : Commission Départementale de la Nature, des Paysages et des Sites.

Elle est présidée par le Préfet et composée de membres répartis en quatre collèges : services de l'Etat, élus des collectivités territoriales, personnalités qualifiées et personnes compétentes.

CSSPP : Commission Supérieure des Sites, Perspectives et Paysages
Elle conseille le Ministre chargé des sites pour l'élaboration et l'application sur l'ensemble du territoire d'une politique de protection, de conservation et de mise en valeur des monuments naturels, des sites et des paysages urbains et ruraux.

DDT : Direction départementale des Territoires.

Inspecteur des sites : Il est chargé de l'élaboration des dossiers de protection qui nécessitent un important travail de terrain, de nombreux échanges avec les acteurs locaux ainsi que la réalisation d'études préalables. Il assure également la conduite et le suivi de la procédure devant les instances compétentes (CDNPS, CSSPP).

PLU : Plan Local d'Urbanisme

Document fixant la destination générale des sols (formes des constructions, zones devant rester naturelles, zones réservées aux constructions futures...).

SUP : Servitude d'Utilité Publique

Limitation administrative du droit de propriété et d'usage du sol (article L126-1 du code de l'urbanisme). Obligation pour le PLU de respecter les SUP.



Direction Générale
2, avenue de Saint-Mandé
75570 Paris Cedex 12
Tél. 01 40 19 58 00
www.onf.fr

Certifié ISO 9001 et ISO 14001

à suivre

n° 41 - été 2013

Prochain numéro :

Le prochain numéro sera dédié à la restitution du colloque ONF « Restaurer l'équilibre forêt-gibier » des 27-28 mai 2013. Suite et fin du dossier EMERGE au numéro suivant (42 - automne 2013).

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

