



Office National des Forêts

RenDez-Vous techniques

N° 57 - Hiver 2018

DOSSIER

EXPLOITATION MÉCANISÉE
DES HOUPPIERS
DE GROS BOIS FEUILLUS

ZOOM

Promouvoir
les matériaux bois
dans La construction



Directeur de publication

Albert Maillet

Rédactrice en chef

Christine Micheneau

Comité éditorial

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

Conception graphique

Agence LINÉAL

Crédit photographique**Page de couverture :**

E. Ulrich, ONF
(en médaillon : Fibois)

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))

Renseignements

ONF - documentation technique et générale,
boulevard de Constance, 77300 Fontainebleau

Contact : documentalistes @onf.fr

ou par fax : 01 64 22 49 73

Dépôt légal : février 2019

2 ÉDITO

Les RenDez-Vous techniques font peau neuve

3 [CONNAISSANCES]

EFFET DE LA DIVERSITÉ DES ESSENCES SUR LA HAUTEUR DOMINANTE

par Patrick Vallet et Thomas Pérot

11 [MÉTHODES]

BÂTONNAGE MÉCANISÉ DE LA FOUGÈRE AIGLE ET DU CÉRISIER TARDIF :
HISTOIRE DU DÉVELOPPEMENT DE NOUVEAUX OUTILS

par Erwin Ulrich, Xavier Mandret, Jean-Charles Pittard

17 DOSSIER

[PRATIQUES]

EXPLOITATION MÉCANISÉE DES HOUPPIERS DE GROS BOIS FEUILLUS

40 [ZOOM]

PROMOUVOIR LES MATÉRIAUX BOIS DANS LA CONSTRUCTION

1 - UNE DIVERSITÉ DE PRODUITS RECONSTITUÉS

2 - DES DIFFICULTÉS ET DES LIMITES

par Damien Lauvin et Christine Deleuze

Les RenDez-Vous techniques font peau neuve



Albert MAILLET
Directeur Forêts
et Risques Naturels

Voici 15 ans déjà que les RenDez-Vous techniques existent, qu'ils ont succédé au « Bulletin technique » de l'ONF en élargissant les horizons. Voici 15 ans que la revue s'est choisi une physionomie –une maquette– qui se voulait à la fois sérieuse et avenante. Voici 15 ans aussi que, forte de sa singularité et de son exigence scientifique et technique, elle snobe les évolutions graphiques. Mais en 15 ans les choses évoluent, les formes, les outils, les façons de faire. Et le design de départ devient une contrainte : un comble !

Aujourd'hui les RenDez-Vous techniques rejoignent l'identité visuelle de l'ONF sans renoncer à ce qui fait leur style propre. C'est l'habillage qui change : un peu plus sobre et un peu plus souple à la fabrication, mais toujours au service d'un propos bien charpenté, bien résolu à explorer et exposer les divers enjeux de la gestion forestière durable.

Sans surprise, donc, on retrouvera dans ce numéro 57 des thèmes de réflexion familiers. Cette fois-ci, ils sont surtout liés à la fonction production de bois de la gestion durable, et vont de l'amont à l'aval de la filière forêt-bois.

À l'amont, Irstea poursuit ses travaux sur le fonctionnement des peuplements mélangés et s'intéresse ici à l'effet du mélange sur la croissance en hauteur, pour vérifier si les résultats précédents concernant la surface terrière se traduisent bien en volume ou biomasse. Ça ne va pas forcément de soi.

Vient ensuite le thème du renouvellement des peuplements, avec une démarche de collaboration exemplaire entre un constructeur et des forestiers motivés pour la mise au point d'un bâtonneur mécanique contre l'étouffement des régénérations par la fougère aigle.

Puis le thème de la récolte, avec la problématique très particulière de l'exploitation des gros houppiers feuillus dans les dernières éclaircies et les coupes de régénération : c'est l'objet de notre dossier. Ces houppiers sont une ressource appréciable, mais leur exploitation « traditionnelle » soulève de plus en plus de difficultés de tous ordres. Des spécialistes de l'ONF (R&D et terrain) et de FCBA ont donc travaillé ensemble sur le sujet et livrent ici leurs analyses, observations pratiques et recommandations. À l'aval, enfin, Damien Lauvin (apprenti ingénieur d'AgroParisTech) propose un état des lieux sur le développement de l'usage du bois en tant que matériau de construction, avec comme perspective l'utilisation de la ressource bois française au profit d'une économie décarbonée. Ce sujet concerne les forestiers, car les possibilités d'adaptation de la forêt au changement climatique et sa contribution à l'atténuation de l'effet de serre dépendent très largement d'un tissu industriel sain et capable de valoriser tous les produits bois dans des usages pertinents.

Le menu est sans doute roboratif mais reste très digeste : à lire donc sans modération.

EFFET DE LA DIVERSITÉ DES ESSENCES SUR LA HAUTEUR DOMINANTE

Patrick Vallet ^(1, 2)
Thomas Pérot ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Irstea Nogent-sur-Vernisson,
UR EFNO

⁽²⁾ Univ. Grenoble Alpes,
Irstea, LESSEM

L'étude du fonctionnement des peuplements mélangés n'est pas près de s'épuiser. En ce qui concerne l'effet du mélange sur la productivité, les travaux ont surtout porté sur la croissance radiale ou en surface terrière. Mais la productivité dépend aussi de l'influence du mélange sur la croissance en hauteur, plus difficile à appréhender : les deux effets sont-ils de même ampleur ? Vont-ils dans le même sens ? Quels sont les mécanismes ? Méthode d'étude et premières réponses.

Les travaux récents sur l'effet du mélange d'essences sur la productivité ont pour la plupart porté sur la croissance en diamètre ou en surface terrière. Pour la majorité de ces études, les effets constatés sont positifs. Des résultats sont parfois donnés en volume ou en biomasse, ce qui nécessite d'intégrer également l'effet du mélange sur la croissance en hauteur des arbres. Or cette composante est beaucoup moins bien caractérisée que la croissance radiale, en raison de la plus grande difficulté de la prise de mesure ainsi que de son imprécision. Connaître l'effet du mélange sur la croissance en hauteur est pourtant important pour deux raisons principales. D'une part, la croissance en hauteur d'un arbre dépend des conditions de lumière dans son environnement proche et donc de la dynamique de croissance des arbres de son voisinage. On peut alors s'attendre à ce que les dynamiques de croissance en hauteur des espèces en peuplements mélangés soient différentes de celles des peuplements monospécifiques. D'autre part il est important de connaître le sens de l'effet du mélange sur la croissance en hauteur et notamment si, pour une essence donnée, cet effet va dans le même sens ou bien à l'opposé de celui observé sur la croissance radiale. Si les deux effets vont dans le même sens, alors le mélange a un réel effet sur la quantité de bois produit. Dans le second cas, l'effet du mélange est une allocation différente de la production de bois entre la croissance radiale et la croissance en hauteur dans les mélanges par rapport aux peuplements purs, sans nécessairement entraîner de différence de productivité à l'échelle de l'arbre.

Dans l'étude que nous présentons ici, nous avons donc cherché à caractériser l'effet du mélange sur la croissance en hauteur dominante. Le principe de notre méthode est de comparer la croissance en hauteur dominante d'une espèce poussant en peuplement pur avec la croissance de cette même espèce poussant en peuplement mélangé à conditions

stationnelles et caractéristiques dendrométriques du peuplement comparables. Pour ce faire, la première étape consiste à développer des modèles de croissance permettant de décrire la croissance en hauteur dominante des espèces poussant en peuplement pur et valides pour un maximum de situations possibles. En appliquant ce type de modèle à une espèce présente dans une placette mélangée, on obtient la valeur attendue de sa croissance en hauteur dominante si elle avait poussé en peuplement pur. La différence entre la valeur attendue donnée par le modèle et la valeur observée sur la placette donne une estimation de l'effet du mélange sur la croissance en hauteur dominante de l'espèce considérée.

En pratique, la méthode nécessite d'avoir un grand nombre d'observations pour compenser les problèmes de variabilité des résultats liés aux différentes sources d'erreur (erreurs de mesure, erreurs de prédiction des modèles) et obtenir des estimations fiables de l'effet du mélange. Nous avons donc utilisé les données de l'inventaire forestier de l'IGN. Dans un premier temps, nous avons développé des modèles de croissance en hauteur dominante en peuplements purs pour cinq espèces forestières françaises, qui servent de référence pour la croissance. Nous avons ensuite étudié l'influence d'espèces accompagnatrices sur la croissance en hauteur dominante de ces cinq espèces en comparant les données observées en mélange à la référence en peuplement pur. Dans un troisième temps, nous avons étudié les effets réciproques d'une espèce sur l'autre. L'ensemble des méthodes et résultats présentés ici sont détaillés plus amplement dans un article scientifique de Vallet et Pérot (2016).

Démarche méthodologique

Espèces cibles et sélection des placettes de l'inventaire forestier

Nous avons choisi d'étudier des espèces communes en France afin d'avoir suffisamment de données pour obtenir des résultats robustes. Nous avons également choisi des espèces aux caractéristiques contrastées pour obtenir des résultats généraux. Nous nous sommes ainsi focalisés sur le chêne sessile, le hêtre, l'épicéa commun, le sapin pectiné, et le pin sylvestre sur l'ensemble de leur répartition en France. En revanche, nous n'avons pas fait de restriction sur les espèces avec lesquelles les espèces cibles peuvent être associées. Nous nous sommes également restreints aux peuplements réguliers et équiennes.

La méthode mise en place nécessite deux jeux de données d'inventaire ; un jeu de peuplements purs, qui sert à développer les modèles de croissance en

hauteur, et un jeu de peuplements mélangés, sur lequel l'effet du mélange est évalué. Parmi les données brutes des campagnes 2008 à 2012 de l'inventaire forestier de l'IGN, nous avons sélectionné les placettes à partir d'un ensemble de critères correspondant aux exigences de l'étude (voir encadré). La sélection de placettes obtenues est décrite dans le tableau 1. Grâce aux critères mis en place, les gammes de variation des peuplements mélangés sont incluses dans celles des peuplements purs. Il est donc possible d'utiliser les modèles développés en peuplements purs pour prédire la croissance en hauteur dominante des espèces correspondantes dans les placettes mélangés. Le tableau 2 indique les nombres de placettes par associations d'espèces.

	Nombre de placettes		Age (années)		Hauteur (m)		Température annuelle moyenne (°C)		Précipitations annuelles (mm)		Altitude	
	Pur	Mélange	Pur	Mélange	Pur	Mélange	Pur	Mélange	Pur	Mélange	Pur	Mélange
Chêne sessile	494	468	94 (19-190)	102 (26-177)	22.2 (7.9-34.8)	23.6 (10.4-33.0)	10.3 (8.9-11.9)	9.8 (8.8-11.2)	796 (615-1197)	886 (624-1328)	227 (62-604)	274 (63-560)
Hêtre	439	572	108 (23-200)	99 (24-176)	23.6 (8.6-36.6)	24.9 (10.5-36.1)	9.1 (6.1-11.4)	9.0 (6.6-10.5)	1142 (684-1865)	1074 (691-1877)	627 (58-1484)	452 (85-1193)
Pin sylvestre	516	156	65 (19-144)	72 (24-151)	14.5 (5.5-25.3)	18.6 (6.8-31.9)	8.9 (5.8-11.6)	9.5 (6.7-11.9)	925 (645-1347)	911 (630-1400)	765 (88-1559)	513 (85-1316)
Sapin pectiné	263	173	86 (30-177)	88 (29-173)	24.8 (8.8-36.3)	25.5 (12.2-38.1)	8.2 (6.0-10.8)	7.9 (5.7-9.4)	1203 (794-1900)	1368 (852-2003)	828 (292-1492)	818 (370-1349)
Épicéa commun	450	190	51 (18-136)	78 (27-159)	22.2 (7.6-34.4)	26.0 (11.6-38.3)	8.0 (4.9-10.3)	7.8 (4.9-9.7)	1266 (777-1918)	1341 (836-1992)	774 (157-1488)	831 (285-1396)

Tableau 1 : Description de la base de données

Les valeurs moyennes sont données pour les peuplements purs et mélangés (quantiles 2.5% et 97.5% entre parenthèses).

	Bouleau	Charme	Châtaignier	Chêne pédonculé	Chêne pubescent	Chêne sessile	Douglas	Épicéa	Erable sycomore	Frêne	Hêtre	Merisier	Pin laricio	Pin noir d'Autriche	Pin sylvestre	Sapin
Chêne sessile	12	21	12	123	-	-	-	-	-	25	233	-	-	-	42	-
Hêtre	-	29	-	94	-	216	-	35	19	55	-	10	-	-	35	79
Pin sylvestre	-	-	-	26	12	32	-	16	-	-	31	-	12	27	-	-
Sapin pectiné	-	-	-	-	-	10	-	89	-	-	64	-	-	-	10	-
Épicéa commun	-	-	-	-	-	-	15	-	-	-	43	-	-	-	23	109

Tableau 2 : Nombre de points en mélange par espèce cible et par espèce associée

Critères de sélection des placettes de l'inventaire

Tous les points sont issus de peuplements n'ayant qu'une seule strate (classés en futaie régulière par l'inventaire). Nous avons également sélectionné les placettes dont l'écart d'âge entre les deux arbres dominant carottés n'excède pas 25%. Un peuplement est dit pur lorsque 90% de la surface terrière est d'une même essence, identique à celle des deux arbres sélectionnés par les opérateurs de l'inventaire pour l'évaluation de l'âge. Pour les peuplements mélangés, un des deux arbres carottés doit être de l'une des cinq espèces cible, et l'autre arbre d'une essence différente de la première. Ce critère n'exclut pas les peuplements à plus de deux espèces, mais le protocole de l'inventaire garantit que ce sont les

deux espèces les plus importantes de la placette. Les placettes de peuplements mélangés doivent en outre être dans une zone géographique couverte par les peuplements purs correspondants, afin de garantir qu'elles soient dans la zone de validité des modèles de croissance en hauteur. Pour ce faire, nous avons retenu pour la sélection des peuplements mélangés uniquement les Sylvo-Eco-Régions (IFN, 2011) pour lesquelles au minimum cinq placettes pures ont servi à la calibration des modèles de croissance en hauteur de l'espèce considérée. Enfin, nous n'avons retenu que les associations d'espèces comportant au minimum 10 placettes afin d'avoir un résultat suffisamment robuste.

Enfin, pour étudier les effets réciproques d'une espèce sur l'autre, il est nécessaire d'avoir les modèles de croissance en hauteur pour les deux essences, et donc d'avoir une combinaison de deux des espèces cibles. Sept couples ont ainsi pu être étudiés : chêne sessile – hêtre (195 placettes), chêne sessile – pin sylvestre (26 placettes), hêtre – sapin (63 placettes), hêtre – épicéa (35 placettes), hêtre – pin sylvestre (27 placettes), pin sylvestre – épicéa (14 placettes), et sapin – épicéa (87 placettes).

Calcul de la hauteur dominante

La définition classique de la hauteur dominante est la hauteur moyenne des 100 plus gros arbres à l'hectare du peuplement. Pour des placettes plus petites, calculer cette moyenne sur (n-1) arbres pour une placette de n ares permet d'éviter un biais méthodologique (Pardé et Bouchon, 1988). Le rayon maximal des placettes de l'inventaire est de 15 mètres, représentant une surface de 7 ares. Il faudrait donc calculer la hauteur moyenne des 6 plus gros arbres. Or, les deux arbres carottés à cœur pour mesurer l'âge sont choisis par l'inventaire parmi les 6 plus gros arbres du peuplement dominant. Dans le cas des peuplements purs, la moyenne de ces deux arbres est alors une estimation non biaisée de la hauteur dominante. Dans le cas des peuplements mélangés, une estimation de la hauteur dominante pour chacune des deux espèces est la hauteur de l'arbre correspondant. Cette méthode de calcul a l'intérêt d'avoir une estimation de la hauteur et de l'âge portant sur les mêmes individus. Plus de détails sont fournis dans l'article de Vallet et Pérot (2016), en particulier dans le cas de placettes plus petites.

Sélection d'une forme de courbe de croissance en hauteur dominante

L'inventaire forestier est basé sur des placettes temporaires, et ne comporte donc pas de valeurs d'accroissement en hauteur. Il faut alors travailler sur un ensemble de couples de points hauteur – âge, et non sur des accroissements. Or il pourrait y avoir un déséquilibre entre les fertilités dans la ressource forestière entre des peuplements d'âges différents. Pour compenser ces effets, il est nécessaire d'inclure dans le modèle les facteurs environnementaux qui influent sur la croissance (climat : données Aurelhy ; sol et flore : données IFN). Il faut de plus choisir une forme

de courbe classique dans la littérature scientifique. Nous avons utilisé le modèle de Hossfeld II, qui est à la fois parcimonieux (3 paramètres seulement à ajuster) et souple (il peut s'adapter à de nombreuses formes de nuages de points), et dont les paramètres peuvent être facilement liés aux caractéristiques du peuplement. La forme générale du modèle est décrite par l'équation 1 :

$$H_{dom} = a \times \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{b}{age}\right)^c\right)}$$

où H_{dom} est la hauteur dominante, age est l'âge du peuplement à la souche, et a , b , et c sont les trois paramètres à ajuster. Le paramètre a est la valeur asymptotique de la courbe de croissance, et reflète la productivité du site. On peut alors définir ce paramètre comme une combinaison linéaire des variables environnementales influant sur la croissance (équation 2) :

$$H_{dom,i} = \left(a_{0,i} + \sum_{k=1}^n a_{k,i} \times X_k\right) \times \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{b_i}{age}\right)^{c_i}\right)}$$

où les X_k sont les variables environnementales, et les $a_{k,i}$ les paramètres correspondants pour une essence cible i . Les détails statistiques sur l'ajustement des modèles sont fournis dans l'article de Vallet et Pérot (2016).

Calcul de l'effet du mélange

Dans cette étude, nous avons utilisé une méthode classique de calcul de l'effet de la diversité en écologie : pour les placettes mélangées, on calcule la différence entre la hauteur attendue en peuplement pur (fournie par le modèle présenté au-dessus), et la hauteur réelle observée dans le mélange. Pour une valeur en pourcentage, qui représente l'effet observé indépendamment de la taille, on divise cette différence par la hauteur attendue en peuplement pur (équation 3).

$$Effet\ du\ mélange_{i,j} = \frac{H_{dom\ observée,i,j} - H_{dom\ attendue,i}}{H_{dom\ attendue,i}} \times 100$$

où $Effet\ du\ mélange_{i,j}$ est l'effet de l'espèce j sur la hauteur dominante de l'espèce i .

Facteurs	Unité	Paramètre (éq. 2)	Chêne sessile	Hêtre	Pin sylvestre	Sapin	Epicéa
Intercept	-	a_0	36.87*** (3.59)	33.81*** (2.7)	23.57*** (1.67)	23.28*** (2.06)	6.29 (8.38)
Altitude	(km)			-8.69*** (0.73)	-9.06*** (1.59)	-8.17*** (1.01)	7.99*** (2.14)
Altitude ²	(km ²)				3.62*** (0.94)		-7.59*** (1.27)
Température min de Mars	(°C)		1.17*** (0.35)				
Pente	(%)		-0.10*** (0.02)		-0.0317** (0.0099)		
Profondeur du sol	(cm)				0.0496*** (0.0094)		
Réserve utile	(mm)		0.27** (0.1)	0.0490*** (0.0069)		0.0317*** (0.0084)	0.0303*** (0.0071)
Bilan hydrique de juillet	(mm)				0.076*** (0.014)		
Bilan hydrique de juillet ²	(mm ²)			-0.00055*** (0.00016)			
Déficit hydrique de juillet	(mm)						-0.049*** (0.014)
Indice d'azote (Ellenberg)	-	a_k		0.86** (0.28)	1.01*** (0.21)	1.17*** (0.28)	0.89*** (0.23)
pH ²	-				-0.098*** (0.015)		
Roche mère calcaire	(booléenne)		-6.82*** (1.09)				
Roche mère siliceuse	(booléenne)						3.36*** (0.49)
Indice de lumière (Ellenberg)	-		-3.06*** (0.43)	-0.82* (0.33)			9.17** (3.09)
Indice de lumière (Ellenberg) ²	-						-1.02*** (0.29)
Indice de densité	-		14.94*** (2.9)		4.90*** (0.63)	18.26*** (4.05)	2.96** (0.90)
Indice de densité ²	-		-7.06*** (1.86)			-6.97* (2.96)	
GRECO (Océanique Nord-Ouest)	(booléenne)		-2.91** (0.95)				
GRECO (Massif Central)	(booléenne)			-1.85** (0.66)			
GRECO (Alpes)	(booléenne)					-3.74** (1.27)	
Age à ½ de la valeur asymptotique	(année)	b	51.56*** (5.67)	37.91*** (1.37)	24.62*** (1.21)	36.21*** (1.21)	32.86*** (1.29)
Facteur de forme		c	1.14*** (0.08)	1.87*** (0.11)	1.86*** (0.18)	2.04*** (0.18)	1.96*** (0.10)
Statistiques							
Nombre d'observations			494	439	516	263	450
Erreur standard résiduelle			0.42	0.39	0.74	0.64	0.50

Significativité des effets : ***: très fortement significatif ; **: très significatif ; *: significatif ; n.s. : non significatif.

Tableau 3 : Paramètres des modèles de croissance en hauteur (équation 2)

Les écart-types des paramètres sont entre parenthèses.

Résultats

Modèles de croissance en hauteur dominante en peuplements purs

Bien qu'étant une étape intermédiaire dans le cadre de cette étude sur les mélanges, les modèles de croissance en hauteur développés sont des résultats intéressants. En particulier, la détermination des variables environnementales influant sur la croissance en hauteur se fait selon un processus de sélection statistique qui quantifie leur influence sur ces espèces (**tableau 3**).

On retrouve des résultats connus empiriquement. Différentes variables représentant le climat ont un effet significatif, notamment l'altitude, qui s'est avérée un meilleur prédicteur que toutes les combinaisons de variables climatiques testées pour toutes les essences, excepté le chêne sessile que l'on trouve peu en montagne. Pour le chêne sessile, le climat est intégré par la température minimale du mois de mars, ce qui correspond au début de la saison de croissance. Des variables représentatives de la quantité d'eau, notamment estivale, sont également influentes. Les variables d'un deuxième groupe, représentant la richesse du sol, se sont révélées importantes pour la croissance, notamment l'indice d'azote d'Ellenberg. Ensuite, un groupe de variables représentant l'accès à la lumière (un indice d'Ellenberg ou bien un indice de densité) est significatif : plus l'accès à la lumière est aisé, moins la croissance est forte. Comme dans le cas d'éclaircies fortes, la croissance en hauteur ralentit quand les arbres sont moins en concurrence pour l'accès à la lumière. Enfin, il restait quelques disparités géographiques pour certaines essences, de magnitude faible, inexplicables par les variables environnementales disponibles. Ces légères erreurs résiduelles sont prises en compte par des variables binaires donnant le décalage du chêne sessile pour la zone nord-ouest océanique, du hêtre pour le massif-central et du sapin pour les Alpes.

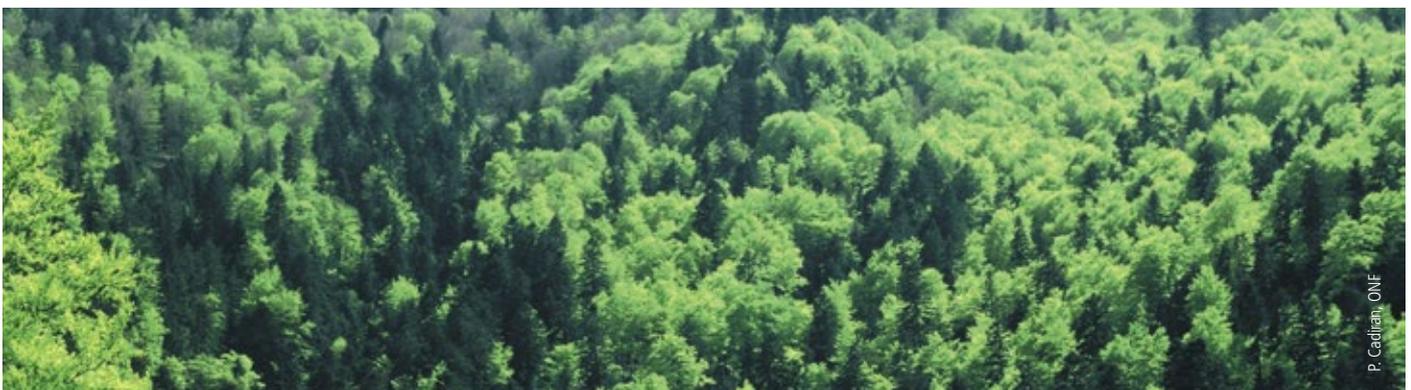
Effet d'une espèce associée sur la croissance d'une espèce cible

L'effet du mélange sur la hauteur dominante peut être positif, nul, ou négatif suivant les associations étudiées (**figure 1**). De manière générale, l'effet est faible. Il est de magnitude inférieure à 10% pour 29 des 31 cas étudiés, et au maximum de +15,7% dans le cas du pin sylvestre en mélange avec le hêtre. Lorsqu'on groupe l'ensemble des espèces associées,

les résultats vont d'une baisse de 4% de la croissance en hauteur pour l'épicéa, tandis qu'au contraire le pin sylvestre est tiré en hauteur de 6,6% par le mélange. Quelques résultats qualitatifs apparaissent également pour certaines essences. L'effet est faible pour le chêne sessile ou le sapin, quelle que soit l'espèce avec laquelle ces essences sont associées. À l'inverse, l'effet est plus fort pour le hêtre, qui peut être soit dynamisé par le mélange avec le sapin ou l'épicéa, soit pénalisé avec le douglas, le chêne pédonculé ou le chêne pubescent. Lorsque significatif, l'effet sur l'épicéa est toujours négatif, quelle que soit l'espèce associée. L'inverse est obtenu pour le pin sylvestre, dont l'effet est toujours positif (lorsque significatif). Enfin, l'épicéa a un effet positif sur les trois espèces cibles auxquelles il est associé (hêtre, pin sylvestre, et sapin).

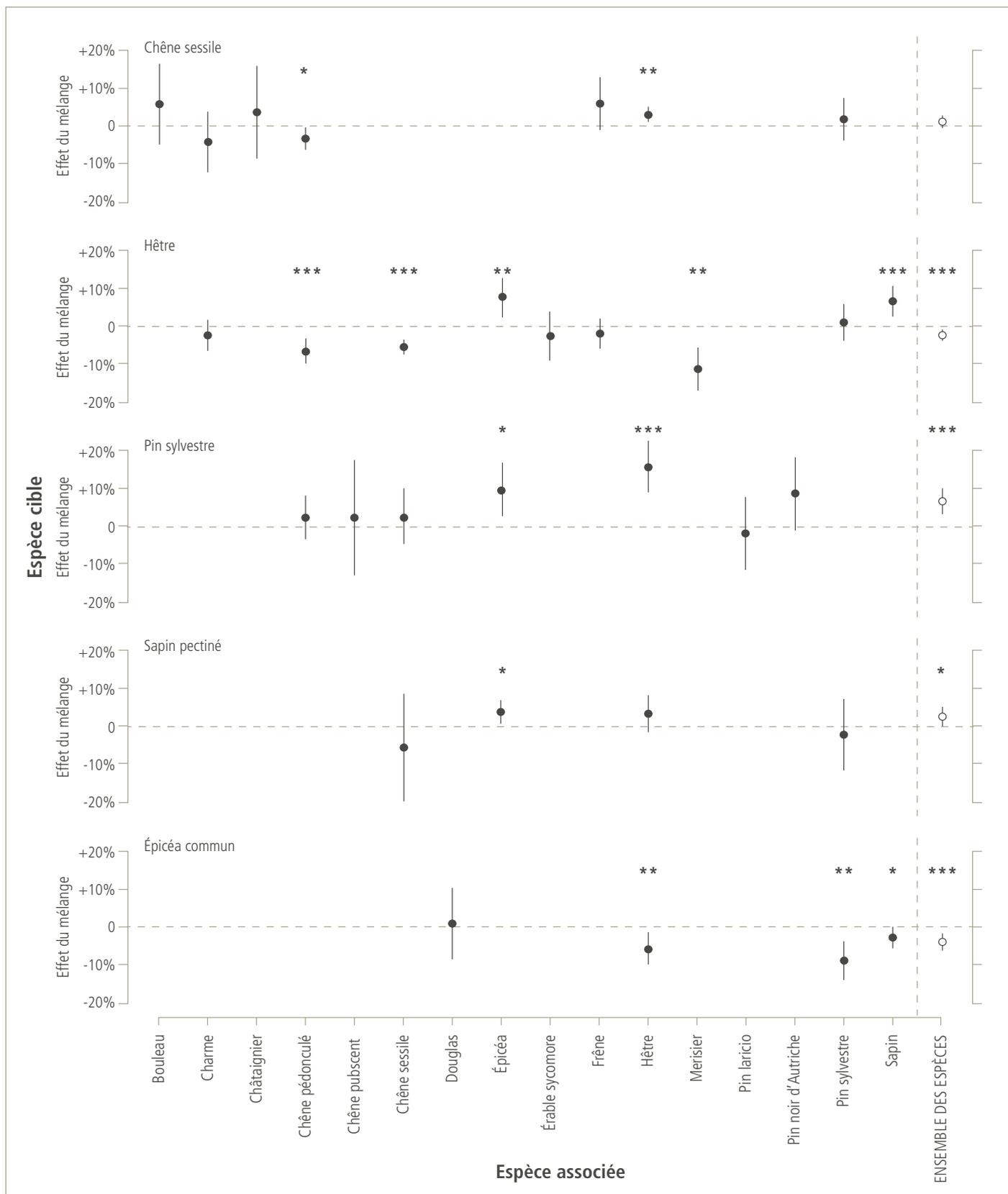
Peu d'études ont porté sur l'effet du mélange sur la hauteur dominante. Pinto *et al.* (2008) ont analysé l'effet de plusieurs feuillus et résineux sur la croissance en hauteur du sapin dans les Vosges. Leurs résultats sont très similaires aux nôtres, avec une absence d'effet du hêtre ou du chêne sessile, mais un effet positif de l'épicéa sur la croissance en hauteur du sapin. Pour le pin sylvestre, un effet positif du hêtre (+6%) a également été identifié sur un transect de placettes pan-européen par Pretzsch *et al.* (2015).

Dans les études antérieures sur la surface terrière ou le volume (Toïgo *et al.*, 2016), les effets sont de magnitude supérieure à ceux que nous avons trouvés sur la hauteur. Nous avons sélectionné dans cette étude les mêmes essences cibles que Toïgo *et al.* (2015), qui ont travaillé sur la surface terrière à partir des données de l'inventaire forestier de l'IGN également. Ils ont trouvé un effet sur le hêtre de +51% avec l'épicéa et de +32% avec le sapin. Cet effet sur la surface terrière était de +15% pour le sapin associé à l'épicéa, et de +14% pour le chêne sessile associé au pin sylvestre. Ces valeurs sont plus élevées que celles obtenues sur la hauteur, mais sont dans la même direction pour toutes les situations communes, sauf pour le couple chêne sessile - hêtre. Dans le cas du mélange chêne sessile - hêtre, les effets sont faibles, mais opposés. Ce cas particulier pourrait être lié à l'histoire sylvicole. En effet, les hêtres les plus vigoureux ont souvent été enlevés en éclaircie au profit du chêne sessile. Les résultats obtenus pour ce couple pourraient donc être une conséquence du traitement sylvicole et pas dus à un effet du mélange. Pour les autres situations, nous pouvons en conclure que le mélange a un réel effet sur la productivité en volume, et ne correspond pas seulement à une allocation différente de la matière produite entre la croissance radiale et la croissance en hauteur.



Hêtraie Sapinière

P. Caudjian, ONF



***: très fortement significatif ; **: très significatif ; *: significatif ; [rien] : non significatif.

Figure 1 : Effet moyen du mélange en fonction de l'espèce cible et de l'espèce associée
 Les résultats sont également donnés pour toutes les espèces associées ensemble.

Effets réciproques d'une espèce sur l'autre

Dans les sept couples d'espèces étudiés, aucune n'a présenté de situation gagnant – gagnant, ni perdant – perdant (tableau 4). Dans deux cas (hêtre – épicéa, et sapin – épicéa), l'une des espèces bénéficie du mélange alors que l'autre en pâtit. Trois couples ont une relation gagnant – neutre¹ (hêtre – sapin, pin – hêtre, et pin – épicéa), un couple (chêne – pin) a une relation neutre – neutre, et un couple (chêne – hêtre) a une relation neutre – perdant. Ces résultats suggèrent que des compensations entre les espèces sont à l'œuvre.

Un schéma commun a été identifié dans toutes les situations : lorsque les espèces ont des dynamiques de croissance en hauteur dominante assez proches en peuplements purs, nous n'observons pas ou peu d'effet du mélange (cas du mélange chêne sessile – pin sylvestre par exemple). En revanche, lorsque dans le mélange une espèce a une dynamique de croissance en hauteur plus rapide que l'autre, on observe un nivellement entre les deux espèces : celle qui pousse le plus vite ralentit sa croissance, alors que celle qui pousse le moins vite est stimulée, probablement pour des aspects liés à l'accès à la lumière.

Afin de mieux quantifier ce résultat, nous avons relié l'effet du mélange sur une espèce du couple à sa différence de hauteur attendue en peuplement pur par rapport à celle de l'espèce associée (figure 2). Le lien est très fort : l'effet du mélange augmente avec la différence de hauteur de l'espèce associée. Par exemple, si l'espèce associée a une hauteur attendue en peuplement pur 20% plus grande que celle de l'espèce cible, l'effet du mélange est en espérance de +8.2%. L'effet est presque symétrique, signifiant que dans les mélanges, chacune des deux espèces fait la moitié du « chemin » vers l'autre espèce.

Ce résultat est en accord avec les interactions basées sur la compétition pour la lumière. L'accès facilité de l'espèce la plus haute l'autorise à réduire sa croissance en hauteur, comme dans le cas des éclaircies fortes en peuplements purs. À l'inverse, l'espèce la plus petite a besoin de stimuler sa croissance en hauteur pour accéder à la lumière.

Association d'espèce			Effet de l'espèce 2 sur l'espèce 1		Effet de l'espèce 1 sur l'espèce 2	
Espèce 1	Espèce 2	Nombre de placettes				
Chêne	Hêtre	195	+2.0%	n.s.	- 5.4%	***
Chêne	Pin	26	+1.3%	n.s.	+6.3%	n.s.
Hêtre	Sapin	63	+ 4.8%	*	+3.2%	n.s.
Hêtre	Epicéa	35	+ 7.7%	**	- 7.8%	**
Hêtre	Pin	27	+2.8%	n.s.	+ 16.7%	***
Pin	Epicéa	14	+ 11.6%	**	-6.5%	n.s.
Sapin	Epicéa	87	+ 3.3%	*	- 3.9%	**

Significativité des effets : ***: très fortement significatif ; **: très significatif ; *: significatif ; n.s. : non significatif

Tableau 4 : Effets du mélange sur la croissance en hauteur par espèce pour 7 couples d'espèces, pour les placettes communes aux deux essences

Les effets significatifs sont en gras. Les ajustements portant sur un sous-échantillon, les valeurs ne sont pas les copies exactes de la figure 1.

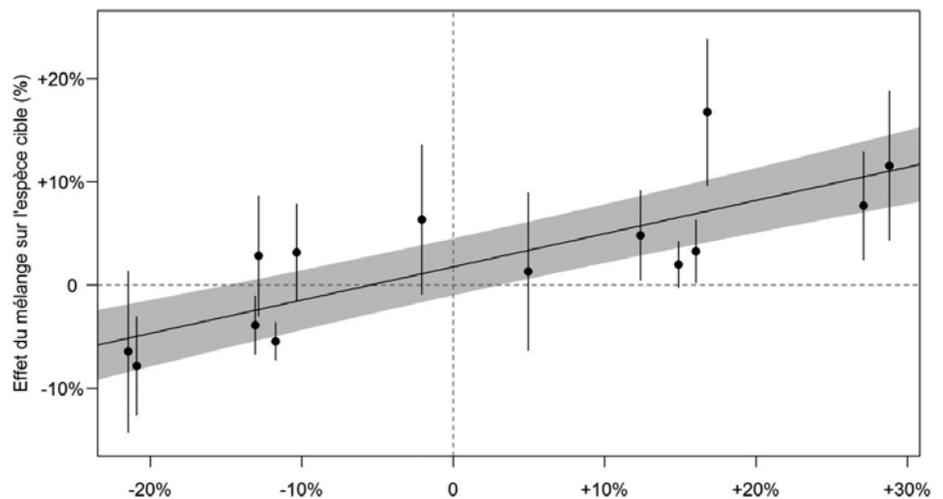


Figure 2 : Effet du mélange par espèce cible en fonction de la différence de hauteur relative attendue en peuplements purs

Par exemple, +10% sur l'axe des abscisses signifie que pour des peuplements purs, la hauteur dominante attendue pour l'espèce associée est 10% supérieure à celle attendue pour l'espèce cible. Comme indiqué dans la partie méthode, il s'agit de peuplements équiennes. La droite correspond à l'ajustement du modèle (voir Vallet et Pérot 2016 pour les détails). La zone grisée correspond à l'intervalle de confiance à 95% de l'effet du mélange.

Conclusion

Cet article présente une méthode pour estimer l'effet du mélange sur la croissance en hauteur dominante à partir des données de l'inventaire forestier de l'IGN. Bien que souvent significatifs, les effets du mélanges sont faibles, comparés à ceux obtenus sur la croissance en surface terrière. Ils sont en revanche dans le même sens dans la plupart des cas. En conséquence, le mélange induit bien une productivité accrue pour ces associations, et pas uniquement une modification de l'allocation de la biomasse dans les différentes parties des arbres. Nous avons par ailleurs pu observer un schéma général : l'effet du mélange correspond à un nivellement de la dynamique des deux espèces en association, l'espèce la plus haute réduisant sa croissance tandis que l'espèce la moins haute augmente la sienne. L'effet du mélange sur la hauteur semble bien une compétition pour la lumière plutôt qu'une complémentarité entre les espèces.

¹En toute rigueur, c'est « neutre ou non significatif », mais en l'occurrence on peut considérer qu'il n'y a pas d'effet.



Peuplement mélangé de chêne et hêtre

Références

IFN, 2011. Une nouvelle partition écologique et forestière du territoire métropolitain : les sylvoécotopes (SER). L'If n° 26, 8 p.

Pinto P.E., Gégout J.-C., Hervé J.-C., Dhote J.-F., 2008. *Respective importance of ecological conditions and stand composition on Abies alba Mill. dominant height growth*. Forest Ecology and Management vol. 255, pp. 619-629

Pretzsch H., del Rio M., Ammer C., Avdagic A., Barbeito I., Bielak K., Brazaitis G., Coll L., Dimberger G., Drossler L., Fabrika M., Forrester D.I., Godvod K., Heym M., Hurt V., Kurylyak V., Lof M., Lombardi F., Matovic B., Mohren F., Motta R., den Ouden J., Pach M., Ponette Q., Schuetze G., Schweig J., Skrzyszewski J., Sramek V., Sterba H., Stojanovic D., Svoboda M., Vanhellefont M., Verheyen K., Wellhausen K., Zlatanov T., Bravo-Oviedo A., 2015. *Growth and yield of mixed versus pure stands of Scots pine (Pinus sylvestris L.) and European beech (Fagus sylvatica L.) analysed along a productivity gradient through Europe*. European Journal of Forest Research vol. 134, pp. 927-947

Toïgo M., Vallet P., Perot T., Bontemps J.-D., Piedallu C., Courbaud B., 2015. *Overyielding in mixed forests decreases with site productivity*. Journal of Ecology, vol. 103, pp. 502-512

Toïgo M., Pérot T., Courbaud B., Vallet P., 2016. *Productivité des peuplements mélangés: quels effets des conditions environnementales dans les peuplements bi-spécifiques?* Rendez-vous Techniques de l'ONF, n° 53, pp. 46-53

Vallet P., Perot T., 2016. *Tree diversity effect on dominant height in temperate forest*. Forest Ecology and Management vol. 381, pp. 106-114

BÂTONNAGE MÉCANISÉ DE LA Fougère AIGLE ET DU CERISIER TARDIF : HISTOIRE DU DÉVELOPPEMENT DE NOUVEAUX OUTILS

Erwin Ulrich

Chargé de R&D,
ONF - Pôle RDI de Fontainebleau-Compiègne

Xavier Mandret

Chargé de sylviculture et d'environnement,
ONF - Agence Centre Val de Loire

Jean-Charles Pittard

Conducteur de travaux,
ONF - UP Picardie

Le bâtonnage est une méthode traditionnelle efficace pour assurer le renouvellement forestier dans les secteurs envahis par la fougère aigle sans recourir aux phytocides. Mais le bâtonnage manuel « à l'ancienne » est prohibitif à bien des égards. Voici l'histoire exemplaire de la coopération entre un constructeur et des forestiers motivés pour la mise au point d'un outil mécanique approprié. Avec, en bonus, une adaptation inattendue au cas du cerisier tardif (*Prunus serotina*).

La fougère aigle est une de ces plantes dites monopolistes dont le développement peut compromettre le renouvellement forestier dans bien des régions. Au printemps, elle submerge rapidement les semis ou plants et les prive de lumière et d'eau ; en hiver, ses frondes fanées s'effondrent sur les plants, ce qui peut les casser, les déformer ou les faire périr par étouffement. Autrefois, on la combattait par bâtonnage manuel pour dégager les semis ou plants forestiers, opération efficace mais pénible et gourmande en main d'œuvre, qui perdura jusque dans les années 60 voire au-delà. Plus tard, le traitement à l'Asulame a pu apporter une solution efficace et peu coûteuse. L'alternative du dégagement « classique » à la débroussailleuse est inefficace : coupée à la base, la fougère, très vivace, produit immédiatement de nouvelles frondes qui reconstituent en quelques semaines un couvert envahissant.

De cette impasse est née l'idée de développer un outil mécanique qui reproduirait l'effet du bâtonnage manuel. Le présent article raconte comment cet outil a été développé en quelques années grâce à la coopération d'un constructeur et de forestiers motivés et astucieux, et comment ce développement en a amené un autre, pour lutter cette fois contre le cerisier tardif.

Le bâtonnage de la fougère : principe et champ d'application

Principe et effets du bâtonnage

Le bâtonnage se fait assez tôt en saison, pendant la phase de croissance de la fougère, avec deux objectifs : (1) arrêter son développement en

hauteur ; (2) épuiser la partie restante de la fougère, car elle tentera de faire survivre les frondes épargnées et ne fera pas de nouvelle pousse.

Le bâtonnage intervient en haut de la plante, sur la crosse, c'est-à-dire partie de la fougère qui produit les nouvelles feuilles et lui permet de grandir jusqu'à son plein développement, de 0,50 à plus de 2,50 mètres de hauteur selon les stations. Une fois que la crosse est pliée ou cassée, la fougère dispose encore des feuilles situées en dessous, qu'elle tente de faire (sur)vivre. Elle cesse alors de se développer en hauteur et les frondes cassées créent alors un ombrage qui sera le bienvenu en cas de forte insolation. Un second bâtonnage peut parfois s'avérer nécessaire si la fougère est très vivace (sur certaines stations) ou en cas de repousses. Mais c'est plutôt rare si le bâtonnage du printemps intervient au bon stade de développement.

Le bâtonnage : dans quelles situations ?

Le bâtonnage concerne les situations où la fougère aigle est abondante mais pas trop dense, c'est-à-dire pas au point que ses rhizomes forment un tapis épais empêchant toute survie des semis naturels ou des sujets plantés. En d'autres termes, il convient aux situations où la fougère, sans être bloquante, est problématique pour la réussite des régénérations dans un temps acceptable. Toutes les parcelles ou parties de parcelles couvertes entièrement de fougère conviennent donc au bâtonnage, dès lors que les semis naturels peuvent s'y installer, ou qu'une plantation peut y être réalisée.

De grandes surfaces sont concernées par ce type de présence de la fougère aigle et le besoin d'un vrai bâtonnage « à l'ancienne » mais mécanisé a été exprimé de façon répétée par les gestionnaires à l'ONF.

Blocage total de la régénération par la fougère aigle : que faire ?

Le bâtonnage n'a pas pour but l'éradication de la fougère, mais uniquement de limiter son développement. Ainsi, quand la fougère aigle entraîne un vrai blocage de la régénération, le bâtonnage n'est d'aucune utilité.

La levée du blocage est une question de travaux préparatoires à la plantation ou la régénération naturelle. Cette situation a fait l'objet, à l'ONF, d'une clé de décision pour choisir la bonne méthode de préparation mécanisée (Ulrich *et al.*, 2015), et on peut aussi recommander le dossier « Fronde contre la fougère aigle » de la revue Forêt-Entreprise (n°221, mars-avril 2015/2). Lorsque la préparation initiale du terrain est réalisée dans les règles de l'art, aucun bâtonnage ne devrait être nécessaire jusqu'à ce que la régénération soit « tirée d'affaire » (3 m de hauteur).

Remarque : actuellement, le recours à l'Asulame, phytocide agissant spécifiquement sur la fougère aigle, est encore possible à la faveur d'une autorisation de mise sur le marché du Fougerox (AMM 120 jours) délivrée chaque année par le ministère de l'Agriculture.

Voici comment le développement a pris forme...

Naissance de l'idée d'un bâtonneur mécanique

En mars 2013, la réunion d'un groupe de travail sur la problématique de la fougère aigle à Compiègne a donné lieu à des échanges entre le directeur de la société Grenier-Franco et des gestionnaires et représentants des agences travaux de l'ONF. Ces échanges ont fait germer l'idée chez Jean-Pierre Franco de développer un bâtonneur mécanique qui imiterait les gestes réalisés autrefois par les ouvriers forestiers. L'objectif de ce développement serait d'obtenir le même résultat qualitatif, mais en augmentant fortement la productivité journalière moyenne de cette opération. Le bâtonnage pourrait ainsi couvrir de plus grandes surfaces, grâce à une plus forte productivité et à un coût à l'hectare considérablement réduit.

Bâtonner la fougère manuellement est non seulement couteux, mais aussi pénible pour les ouvriers (Gamblin, 1986). C'est pourquoi toute possibilité d'automatisation est bienvenue. Ainsi, le bâtonnage mécanisé contribuerait à la diminution de la pénibilité, qui est un engagement fort de l'ONF, inscrit notamment au contrat État-ONF pour la période 2016-2020.

Trois années, trois prototypes...

Sans tarder, et à la surprise générale, Jean-Pierre Franco propose en juin 2013 un premier prototype de bâtonneur, monté sur l'attache 3 points arrière d'un tracteur (figure 1). Les premiers essais ne sont pas convaincants, à cause de la faible portée de l'outil (le tracteur doit rester sur les cloisonnements sylvicoles/d'exploitation) et parce que le bâton tourne trop vite et arrache les fougères plutôt qu'il ne les bâtonne. De plus, quand il y a des ronces, celles-ci s'enroulent autour de l'axe du moteur et gênent son fonctionnement. Dès le mois de mai 2014, Jean-Pierre Franco présente un deuxième prototype (figure 2). Celui-ci dispose d'un bras allongé, afin de mieux pénétrer dans la bande à travailler, et de deux rotors. Le bâton de chaque rotor est d'abord centré sur l'axe du moteur, comme pour le prototype 1 (figure 1). Les premiers essais montrent que les fougères sont trop battues, donc trop souvent cassées. C'est que chaque fougère est bâtonnée deux fois et non pas, comme souhaité, une seule fois. Ces observations ont conduit à fixer le bâton au rotor par une extrémité, et non par son milieu. Cela évite en outre que des plantes de type « liane » s'enroulent autour de l'axe.

Des régulateurs de flux permettent de régler la vitesse des bâtons, afin de l'adapter à l'état de la fougère, dont la dureté varie avec l'âge. Cependant les deux rotors sont alimentés par un seul moteur hydraulique, ce qui pose



Figure 1 : premier prototype de bâtonneur mécanisé (juin 2013) ; solution non retenue

problème : lorsqu'un des deux rotors est freiné par un obstacle (lianes, rémanents, souche), le flux hydraulique vers l'autre rotor augmente et le fait tourner beaucoup plus vite, ce qui ruine l'efficacité du bâtonnage.

Ce prototype présente plusieurs éléments utiles, mais n'est toujours pas optimal. Le problème de la portée demeure, car il faudrait pouvoir traiter la moitié de l'interbande, dont la largeur peut aller de 4 à 8 mètres. De plus, lorsque le tracteur doit franchir des obstacles, la hauteur de bâtonnage change brutalement : le bras s'élève en l'air bien au-dessus des fougères (si par exemple la roue arrière monte sur une souche) ou bien il plonge vers le sol et fauche la fougère (si par exemple la roue arrière passe dans une dépression du sol), ce qui est contre-productif. Le travail avec le tracteur touche donc à ses limites.



Figure 2 : deuxième prototype de bâtonneur mécanisé (mai 2014) ; solution non retenue

On voit (b) la faible profondeur de travail dans l'interbande, laissant une zone de fougère non bâtonnée pour les entre-axes de cloisonnements de plus de 4 m.

En mai 2015, Jean-Pierre Franco propose un troisième prototype, dont la nouveauté essentielle est le bras très fortement allongé et équipé de deux moteurs hydrauliques, alimentant chacun un rotor. Ainsi, lorsque l'un des deux rotors est freiné par un obstacle, la vitesse de l'autre n'en est pas affectée. L'objectif de l'allongement du bras est de pouvoir dépasser les 1,5-2 mètres, séparant l'axe du tracteur, qui roule sur le cloisonnement, du bord de la bande à bâtonner (figure 3b). Cela permet de bâtonner une plus grande largeur de l'interbande. L'outil peut ainsi s'adapter à des entre-axes de cloisonnements sylvicoles allant de 4 à 6 m. Mais un problème persiste depuis le début : celui des changements brutaux de la hauteur de bâtonnage.



Figure 3 : troisième prototype de bâtonneur mécanisé (mai 2015) ; solution non retenue

Travail dans une plantation de pin cloisonnée (a), une régénération naturelle de chêne cloisonnée (b) et dans une régénération naturelle de chêne non cloisonnées (c). On voit (b) que la profondeur de travail dans l'interbande est plus grande qu'avec le deuxième prototype.

...et une idée géniale

Quasi au même moment, Vincent Baudet, conducteur de travaux ONF dans l'orléanais, a eu l'idée de couper la poutre du prototype 2 et de la fixer sur le bras d'une pelle mécanique avec une attache fabriquée sur mesure (figure 4). Cette idée « de bon sens », a totalement changé les perspectives du développement. L'outil en lui-même a ainsi pu être simplifié, en profitant du système hydraulique puissant de la pelle, et rendu beaucoup plus flexible d'utilisation grâce à la possibilité d'adaptation rapide aux changements de hauteur de la fougère. Le changement de porte-outil a en outre permis d'augmenter fortement la capacité de contournement des obstacles et la portée de travail, par rapport au bâtonneur monté sur tracteur. Le transport de l'outil est également simplifié, car il est plus petit que celui conçu pour le tracteur. Enfin, son utilisation n'accapare pas un tracteur de la flotte ONF, qui peut remplir d'autres tâches ; on peut louer une pelle pendant la période propice au bâtonnage (maximum 2 mois). Ainsi, il est seulement nécessaire d'acheter le bâtonneur lui-même et de faire fabriquer l'attache, qui doit être adaptée en fonction des spécificités de la pelle (figure 4).



Figure 4 : le prototype de bâtonneur adapté sur une pelle hydraulique de 8 tonnes, à l'aide d'une attache (élément de couleur grise) à fabriquer sur mesure
(a) présentation par Vincent Baudet ; (b) portée maximale de bâtonnage $\approx 7,5$ m.

Indépendamment des avantages de l'outil sur pelle, il fallait tester les deux derniers prototypes (sur tracteur et sur pelle) en conditions opérationnelles sur la gamme de chantiers dans laquelle ces outils sont appelés à travailler. Pour ce faire, trois types de chantiers ont été sélectionnés : le premier dans une plantation de pins avec cloisonnements sylvicoles tous les 6 mètres, sans aucun obstacle (figure 5) ; le deuxième dans une régénération naturelle de chêne, avec des semenciers encore en place, mais cloisonnée à 6 mètres (figure 3b) ; le troisième dans une régénération naturelle de chêne avant l'installation des cloisonnements sylvicoles (figure 3c). Chaque parcelle a été coupée en deux, pour y suivre, sur une surface équivalente, chaque porte-outil avec son prototype. Dès cette phase de test, il a été évident que seule la version sur pelle pourrait être retenue pour le travail en opérationnel, ses nombreux avantages lui conférant une indéniable supériorité en termes de rapport coût/efficacité. Les suivis réalisés ont permis d'en évaluer la productivité et de déterminer les principales règles d'utilisation. Ils ont été consignés dans un guide technique (Ulrich *et al.*, 2017), diffusé à tout le personnel de l'ONF et repris pour partie dans le journal de la Mécanisation Forestière (JMF, 2017).

Adaptation au cas du cerisier tardif (*Prunus serotina*)

L'existence du bâtonneur à fougère a fait naître dans l'unité de production de Compiègne l'idée du bâtonnage du cerisier tardif. Cette unité est confrontée depuis des années au problème de la maîtrise de l'impact du cerisier tardif sur les régénérations.

Depuis les années 60, ou même avant, le cerisier tardif est en effet connu comme une espèce exotique envahissante qui, dans certains massifs forestiers, peut poser de sérieux problèmes pour le renouvellement des peuplements : doué d'une forte croissance juvénile, il supprime très vite la régénération cible qu'il finit par étouffer dans son feuillage dense. C'est le cas en forêt domaniale de Compiègne. Plusieurs essais d'éradication de cette espèce ont été conduits sans succès depuis les années 90 (Javelle *et al.*, 2006). Le plus souvent, les gestionnaires essaient de limiter sa concurrence envers la régénération du chêne ou du hêtre en réalisant des coupes répétées de ses rejets ou drageons, jusqu'à ce que la régénération prenne le dessus. C'est un travail pénible, long et coûteux.

L'idée du bâtonnage/cassage mécanisé, selon les mêmes principes que pour la fougère, s'est donc imposée pour dégager les régénérations et retarder la croissance du cerisier, de façon qu'il reste ultérieurement confiné en sous-étage. Cependant il fallait d'abord faire évoluer techniquement l'outil : les branches du cerisier tardif, bien plus dures que les tiges de la fougère, seraient source de casses pour les bâtons et les rotors du bâtonneur à fougère.

Il n'a fallu qu'un an de plus à Grenier-Franco pour proposer un prototype adapté, le JCP 295. L'adaptation consiste en une poutre renforcée et deux rotors bien plus puissants, dans lesquels sont logés des bâtons à section carrée, orientés de façon que deux des quatre arêtes puissent exercer une fonction tranchante lorsqu'ils sont projetés sur les rejets/drageons du cerisier tardif (figures 6 et 7). Le premier test, réalisé à Compiègne, s'est avéré immédiatement concluant et a conduit à l'adoption rapide de cet outil par l'unité de production de Compiègne en 2017.



Figure 5 : un des chantiers test en FD d'Orléans, sur lesquels les deux prototypes ont été suivis intensivement (chronométrage, productivité et qualité du bâtonnage)



Figure 6 : le bâtonneur renforcé pour casser les rejets/dragons du cerisier tardif
Présentation de l'outil à l'arrêt (a) et en action (b). Résultat : les branches supérieures du cerisier tardif sont cassées (c), son houppier est « déplumé » (d).



Figure 7 : Vue générale d'un "champ" de cerisier tardif bâtonné pour mettre en lumière la régénération naturelle de hêtres complétée par plantation de chênes

Conclusions

La recherche, le développement et l'innovation en matière de machinisme forestier passent souvent par des stades itératifs qui nécessitent à chaque étape de nombreux tests en forêt pour affiner les premiers prototypes. Les outils qui en résultent sont le fruit d'une bonne idée, et du développement de la méthode de travail qui les rendra propres à être adoptés par « l'opérationnel ».

Le bâtonneur mécanique a pu franchir ces étapes en peu de temps et commence à donner satisfaction, non seulement sur le plan de l'efficacité du bâtonnage, mais également sur le plan de la réduction de la pénibilité pour les ouvriers, ainsi que sur celui de la productivité. La forte augmentation de la productivité permettra de traiter chaque année, pendant la courte période propice au bâtonnage, de bien plus grandes surfaces qu'auparavant en manuel. Ainsi, le renouvellement de la forêt, dans les stations concernées, devrait pouvoir se faire plus rapidement et plus économiquement que dans le passé. C'est pourquoi l'ONF a déjà acquis, entre 2016 et 2018, une quinzaine de ces bâtonneurs.

Bibliographie

Gamblin B., 1986. (Toujours) à propos de la Fougère aigle. ONF : *Arborescences* n° 7 p. 27

Javelle A., Kalaora B., Decocq G., 2006. *Les aspects sociaux d'une invasion biologique en forêt domaniale de Compiègne : la construction sociale de Prunus serotina*. Natures Sciences Sociétés, vol. 14, pp. 278-285

JMF, 2017. Grenier-Franco mécanise le bâtonnage des fougères. *Le Journal de la Mécanisation Forestière*, n° 176, pp. 11-13

Lorne R., 1955. *Propos sur la régénération du chêne dans l'Ouest*. Revue Forestière Française, vol. 6 pp. 476-487

Perrier R., 1957. *Continuité forestière*. Revue Forestière Française, vol. 5 p. 419

Ulrich E., Wehrlen L., Becker C., Sardin T., Richter C., Touffait R., Baland F., François D., Gibaud G., Lefebvre L., Lehmann F., Léveque L., Morice P.-Y., Piat J., Poupard F., Thomassin J.-P., Viry B., 2015. *Travaux mécanisés avant régénération levant le blocage par la fougère aigle - clé de décision pour choisir la bonne méthode de travail - clé valable pour la plantation*. Fiche technique ONF (pdf), 16 p.

Pour le personnel ONF : http://biblio.onf.fr/documentation/getfile.php?file=1/Doc_associe/64394/1/Cle-fougères-VF_2015_22012016.pdf

Ulrich E., Baudet V., Mandret X., Franco J.-P., Pittard J.-C., Legros-Delahaye C., 2017. *Guide technique pour l'utilisation du bâtonneur mécanique de la fougère aigle – outil Grenier-Franco*. ONF. 10 p.

Pour le personnel ONF : http://biblio.onf.fr/documentation/getfile.php?file=1/Doc_associe/67588/1/923502013009.pdf

EXPLOITATION MÉCANISÉE DES HOUPPIERS DE GROS BOIS FEUILLUS

DOSSIER

La récolte des houppiers de gros bois feuillus est un enjeu en soi. C'est une ressource particulièrement intéressante dans le contexte de transition énergétique, mais dont la mobilisation « traditionnelle » soulève des difficultés croissantes. La solution passe aujourd'hui par un traitement intégralement mécanisé de ces houppiers ; mais comment procéder ? Analyses, observations pratiques et recommandations dans ce dossier.

- P. 18 Démembrement mécanisé des houppiers des gros bois feuillus : enjeux et difficultés**
par Erwin Ulrich, Jérôme Burban, Philippe Ruch, Didier Pischedda, Maryse Bigot, Emmanuel Cacot
- p. 23 Caractéristiques des deux systèmes d'exploitation testés et des chantiers étudiés**
par Philippe Ruch, Xavier Montagny, Erwin Ulrich, Dominique Goetsch, Alain Bouvet, Pascal George
- P. 29 Résultats et enseignements des chantiers de récolte des houppiers avec deux systèmes d'exploitation mécanisée**
par Philippe Ruch, Xavier Montagny, Erwin Ulrich, Dominique Goetsch, Alain Bouvet, Pascal George
- P. 37 Recommandations pratiques pour une mécanisation intégrale du traitement des houppiers des gros bois feuillus**
par Erwin Ulrich, Philippe Ruch, Didier Pischedda, Maryse Bigot, Emmanuel Cacot
- P. 39 Références bibliographiques du dossier**

Les auteurs remercient chaleureusement les entreprises **Pascal Helmlinger** (67290 Erckartswiller), **Ets. Jonnette** (MM Jonnette et Jeandel, 57930 Belles-Forêts) et **Mecaforet** (**M. Wirth**, 25720 Beure) pour leur disponibilité et soutien lors des chantiers test, ainsi que nos collègues **Michel Romanski**, **Mélanie Goetsch**, **Sylvain Bruez** et **Alain Terroux** pour leur appui dans la préparation des suivis en forêt domaniale de Chaux.

DÉMEMBRÉMENT MÉCANISÉ DES HOUPPIERS DES GROS BOIS FEUILLUS : ENJEUX ET DIFFICULTÉS

Les chênes et hêtres adultes ont des houppiers assez volumineux (figure 1). Pour des arbres dont le diamètre ($D_{1,30}$) dépasse 40 cm, le volume du houppier représente entre 50% jusqu'à plus de 100% du volume de la bille de pied (Longuetaud *et al.*, 2013). En futaie régulière feuillue, c'est donc une part importante du volume à récolter lors des dernières coupes d'amélioration et des coupes de régénération : de 25 à plus de 100 m³/ha, destinés principalement à la trituration ou à l'énergie (bois-bûche ou plaquettes).



Figure 1 : exemples de configurations de houppiers de gros bois feuillus

Erwin Ulrich

ONF - Pôle RDI de Fontainebleau-Compiègne

Jérôme Burban

ONF – DT Grand-Est, Agence Travaux Lorraine Champagne Ardenne

Philippe Ruch

FCBA – Équipe Approvisionnement Bois

Didier Pischedda

ONF – Département Commercial Bois

Maryse Bigot

ONF – Département Commercial Bois

Emmanuel Cacot

FCBA - Équipe Approvisionnement Bois

Les gestionnaires ont alerté la direction technique et commerciale bois dès 2010, sur l'accumulation des difficultés rencontrées pour la récolte de ces houppiers de gros bois feuillus, dans plusieurs régions (du ressort des actuelles directions territoriales Seine-Nord, Grand-Est, Bourgogne-Franche-Comté, et Centre-Ouest-Aquitaine) : insuffisance de main d'œuvre, risques d'accident et, plus généralement, risques pour la santé avec le développement de la processionnaire du chêne. L'expert national en exploitation forestière et logistique, les instances de R&D et les gestionnaires impliqués dans la mobilisation des bois ont donc été chargés de rechercher des solutions.

Cet article présente l'analyse des difficultés qui a été réalisée et qui a permis de définir les systèmes d'exploitation mécanisés à tester.

Difficultés et enjeux de l'exploitation des gros houppiers feuillus

Rappelons que, selon la destination et le mode de dévolution des bois, le façonnage des houppiers en forêt publique se fait sous la responsabilité d'acteurs différents : l'acheteur de la coupe quand les bois sont vendus sur pied, ou bien l'affouagiste si les houppiers sont réservés aux particuliers (futaies affouagères), ou encore l'ONF quand les bois sont vendus ou délivrés façonnés.

Un problème de main d'œuvre...

Les opérations sont donc réalisées soit par des bûcherons professionnels (pour l'essentiel) soit par des particuliers. Or, depuis les années 1970, on a observé une diminution constante des effectifs de bûcherons, notamment à cause de la pénibilité. Puis on a observé aussi une diminution du nombre de particuliers souhaitant « faire leur bois de chauffage » en tant que cessionnaires* ou affouagistes*, liée aux changements de mode de vie des habitants ruraux.

...et de sécurité

Le travail de démembrément oblige régulièrement l'opérateur à se positionner en plein milieu du houppier, sans avoir toujours la possibilité de se mettre à l'abri si des branches sous tension éclatent. Il est donc

primordial que les opérations soient réalisées par une main d'œuvre qualifiée et équipée en EPI (équipement de protection individuelle) et en pleine conformité par rapport au cadre réglementaire, notamment en termes de lutte contre le travail dissimulé et contre le commerce clandestin de bois de chauffage. Il existe d'ailleurs désormais des conventions avec les DIRECCTE* pour faciliter le contrôle des inspecteurs du travail.

Une question d'organisation

Avec la multiplication des transactions et des intervenants (contrats de vente d'une part, contrats de prestation avec des ETF* d'autre part) il est parfois difficile de libérer les parcelles dans un temps acceptable. Or cet aspect est essentiel pour ne pas ruiner tout ou partie d'une régénération naturelle (figure 2), ou bien pour pouvoir planter en temps opportun, notamment quand il s'agit d'éviter l'envahissement par une végétation bloquante.

Il peut aussi être difficile, dans ces conditions, de maîtriser les méthodes de débardage et de faire respecter pleinement l'interdiction de circuler hors des cloisonnements, alors qu'il existe un risque d'impacts forts sur le peuplement restant et surtout sur le sol (tassement, orniérage).



Figure 2 : exemples de dégâts dans une coupe définitive de régénération

En haut, le peuplement avant coupe définitive, avec régénération naturelle installée et cloisonnements sylvicoles ; en bas une bille de pied et ses branches écrasent une bande de régénération bien venante entre deux cloisonnements sylvicoles.

Un défi économique

Enfin, la faible productivité de ce type de chantier pose aussi problème : vu la faible valeur des produits (BI ou BE*), le ratio prix de vente/coût total d'exploitation est particulièrement ingrat et rebute les entreprises, quelles qu'elles soient.

Constitution d'un groupe de travail pour rechercher des solutions mécanisées

À l'issue de cette analyse, la mécanisation est apparue comme une solution permettant de re-dynamiser ce type d'exploitation, tout en réduisant fortement les contraintes liées au travail manuel. Les experts ONF de l'exploitation et de la mécanisation ont donc constitué en 2012 un groupe de travail réunissant des représentants des différents « métiers » concernés à l'ONF (y compris ONF Energie). L'objectif était triple : (1) étudier la faisabilité technico-économique d'une récolte 100% mécanisée, (2) rechercher une (des) solution(s) permettant de réduire fortement les impacts au sol comme au peuplement restant ou aux semis (coupes de régénération), et (3) rechercher la plus grande sécurité possible pour les opérateurs. L'institut technologique FCBA a été partenaire du projet dans le cadre d'une convention de R&D avec l'ONF, et le sujet a également fait l'objet d'un stage de fin d'études d'un élève ingénieur forestier. La suite de cet article reprend les principaux résultats de son mémoire (Burban, 2012) : un état des lieux bien documenté dans trois régions forestières très concernées, débouchant sur un « cahier des charges » pour les exploitations mécanisées à tester.

Les enjeux régionaux de l'exploitation des houppiers

Nous sommes donc en 2012. Les trois régions d'étude retenues sont la Bourgogne, la Franche-Comté et la Lorraine, avec des préoccupations communes. Il s'agit de réussir à récolter et commercialiser d'importants volumes, de bois énergie notamment, dans les premières éclaircies feuillues (Ulrich et Pischedda, 2015), et dans les houppiers feuillus. Il s'agit aussi,

*Définitions

Affouagistes : habitants de communes forestières ayant droit aux produits ligneux en nature pour un usage uniquement domestique, la revente des produits étant interdite.

Cessionnaires : bénéficiaires d'un *contrat de vente de bois aux particuliers* (= cession).

BI, BE : bois d'industrie, bois énergie

DIRECCTE : Directions régionales des entreprises, de la concurrence, de la consommation, du travail et de l'emploi

ETF : entreprise (ou entrepreneur) de travaux forestiers

RECPREV : outil informatique de pilotage pluriannuel des récoltes de bois (REColtes PRÉVisibles), d'après les états d'assiette annuels des coupes

pour assurer le cadencement des livraisons attendues dans le cadre de contrats d’approvisionnement, de pouvoir maîtriser les flux de BE, c’est à dire la programmation et la réalisation des chantiers de récolte de bois énergie dans les houpriers.

L’ordre de grandeur de la récolte des houpriers évalué pour la période 2012 - 2017 sur ces trois régions représente au total 17 500 ha environ (soit 2917 ha/an ; source RECPREV* et estimation régionale), avec un volume compris entre 246 800 et 411 300 m³/an environ.

En Lorraine, l’enjeu est aussi de surmonter un sérieux problème de santé dû à la présence de la chenille processionnaire du chêne (*Thaumetopoea processionea*). L’accès aux parcelles infestées est contrôlé à l’ONF via un diagnostic du niveau d’infestation. Cela peut aller jusqu’à l’interdiction pour les ouvriers de pénétrer dans les parcelles. D’ailleurs beaucoup d’entre eux ont déjà des niveaux d’allergies élevés, voire très élevés, aux poils urticants de ces chenilles. Cette situation bloque la planification normale des coupes et des flux de bois dès lors que le traitement des houpriers se fait manuellement. La DT Lorraine est donc très motivée pour développer des méthodes de récolte intégralement mécanisée qui permettraient de mettre les opérateurs à l’abri des poils urticants.

Pratiques observées en 2012 dans les trois régions d’étude

Dans tous les cas, la phase d’exploitation du houprier intervient après l’enlèvement de la bille de pied par débusqueur (figure 3). Les modalités pratiques sont indépendantes du type d’opération sylvicole : amélioration ou coupes progressives de régénération. Elles commencent classiquement par un démantèlement manuel sommaire, qui en général ne nécessite que 2-4 traits de scie par houprier. Vient ensuite le façonnage proprement dit, qui peut intervenir soit sur la parcelle (cas le plus fréquent), soit sur place de dépôt après débusquage du houprier démantelé (de façon à réduire le foisonnement et les dégâts sur le peuplement restant ou la régénération). Le façonnage des houpriers (figure 4) permet de fournir plusieurs types produits, selon le contexte local ou régional (dimensions des bois et cahiers des charges des produits des clients) : du bois d’industrie (BI) en billons de 2, 4, 5 m ou en toute longueur ; du bois d’énergie (BE), soit en billons de 5 m, soit en toute longueur ; du bois d’œuvre (BO), rarement. Ce façonnage est réalisé manuellement ou parfois avec un grappin scie monté sur le bras d’une pelle mécanique.

L’enlèvement des produits se fait soit par débusquage, en traînant les produits soulevés par le « gros bout », soit à l’aide d’un porteur. Ces produits sont stockés en bord de route forestière ou sur une place de dépôt dédiée, accessible aux différents matériels de transport (grumiers, camions ou semi-remorques pour les bois ronds, fond-mouvants pour les plaquettes, porte-char pour les broyeurs...).

Les prix des prestations en 2012, connus partiellement, sont livrés ici à titre d’exemple et pour la réflexion : les prix de façonnage variaient selon la région entre 10 et 16,50 €/m³ et le débardage/débusquage entre 5 et 8 €, exceptionnellement 24 €/m³, d’où un prix total variant entre 15 et 23,50 €, exceptionnellement 37 €/m³ (en comptant 1 m³ pour 1 tonne brute).



Figure 3 : exemple de façonnage et débusquage des billes de pied
Après l’abattage d’un gros bois de chêne, la bille de pied est façonnée et débusquée, ici avec un débusqueur à pince, pour la stocker bord de route forestière.



Houprier démantelé manuellement en tronçons de longueur très variable



Billons façonnés manuellement sur coupe



Façonnage de houprier (billons et tout venant) avec une pelle équipée d’un grappin scie

Figure 4 : types de façonnage des houpriers de gros bois feuillus dans les régions Bourgogne, Franche-Comté et Lorraine en 2012

Questions posées en vue d'une mécanisation intégrale

La diversité des pratiques observées a permis de formaliser les questions à se poser, en vue d'une mécanisation intégrale, et que nous allons passer en revue.

Outil de coupe

Une des premières questions pour le groupe de travail était de savoir quels outils de coupe répondraient le mieux à la disparité des diamètres de coupes inhérente au façonnage des gros houppiers. Diamètres qui s'échelonnent de 7 cm à 70 voire 80 cm. Or, parmi les outils de coupe existant sur le marché, seuls les plus simples et les plus robustes d'utilisation retiendraient l'intérêt des opérateurs : vu la faible valeur des produits concernés, il fallait pouvoir assurer une forte productivité à l'heure machine pour pouvoir amortir les investissements tout en ménageant une marge. Cela excluait les outils complexes (ex. têtes d'abattage des machines de bûcheronnage), qui non seulement sont chers mais exigent de surcroît une fréquence d'entretien élevée.

Le choix pouvait donc se porter vers des grappins scie, des cisailles ou des têtes avec disque découpeur (figure 5). Mais c'est le grappin scie qui présente le plus d'avantages : il est très simple et peut soulever et manipuler de grosses charges. Il existe pour des diamètres allant jusqu'à 90 cm, il est facile d'entretien, assez léger (de l'ordre de 400 kg) et permet donc d'utiliser au maximum la force de la grue pour soulever et manipuler les produits. De plus, c'est le moins cher des trois outils. Les têtes à cisaille sont limitées en capacité de coupe : le plus souvent aux alentours de 50 cm de diamètre au maximum. Elles sont lourdes (> 1200 kg) et malcommodes pour la manipulation des produits. Les têtes avec disque découpeur existent pour de très grands diamètres et sont très performantes pour l'abattage (arbre debout...), mais elles pèsent plus de 4 tonnes et nécessiteraient l'utilisation de porte-outils beaucoup trop grands. Elles n'ont pas non plus l'agilité suffisante pour bien manipuler les produits, ni même démanteler rapidement des houppiers couchés au sol.

Porte-outil pour le façonnage

Se posait ensuite la question du porte outil. Il fallait, pour assurer une bonne productivité, pouvoir soulever de fortes charges et disposer d'une puissance hydraulique importante (flux et pression) permettant de couper facilement des gros diamètres de bois dur. Il fallait aussi une grue d'au moins 7 mètres de portée, afin de pouvoir accéder aux houppiers depuis les cloisonnements d'exploitation. Le choix pouvait donc s'orienter vers des pelles hydrauliques de 10-14 tonnes, ou bien des porteurs disposant d'une forte puissance hydraulique et de grues suffisamment puissantes.

Type et nombre de produits sur le chantier

D'une façon générale, les types de produits sont à moduler en fonction des prescriptions sur la coupe (notamment sur la récolte de menus bois, autorisée ou pas). Il peut s'agir de bois énergie en vrac ou de bois énergie/bois d'industrie en billons avec des longueurs bien déterminées, selon les demandes des clients. Quand les bois sont destinés à être broyés bord de route forestière, il n'est pas nécessaire d'extraire de la forêt des produits bien calibrés (en longueur et en rectitude).



Figure 5 : solutions potentielles pour le façonnage des produits issus des houppiers de gros bois feuillus

Pour le nombre de produits, les échanges du groupe de travail ont conduit à la même conclusion que pour le cas des premières éclaircies feuillues (Ulrich et al., 2015) : il faut rationaliser c'est à dire **se limiter à un ou deux produits par chantier**. Cela permet de gagner significativement en productivité, grâce à la diminution des manipulations, mais aussi de réduire l'accumulation des trajets sur les cloisonnements d'exploitation. Par exemple, il n'est pas forcément judicieux de chercher à valoriser la part potentielle de bois d'œuvre, souvent trop dispersée et en trop faible quantité pour absorber le surcoût d'exploitation et de gestion de la vente.

Débardage

Comment, enfin, réaliser au mieux le débardage des produits ? Les débusqueurs sont trop limités de plusieurs points de vue : les volumes des produits en toute longueur qu'ils peuvent trainer en un seul voyage sont limités, ce qui les oblige à de nombreux allers-retours. De plus, le trainage ne permet guère de limiter l'impact au sol, à la régénération et aux arbres présents. Le choix s'est donc orienté vers des porteurs, qui peuvent débarder aussi bien des billons que du tout-venant, à condition d'éviter les produits de trop grande longueur (> 8 m) pour ne pas froter les arbres en place.



Figure 6 : débusqueur à grue (télescopique) et à pince (ici avec grume de résineux)

Le cas des débusqueurs à grue et à pince (figure 6) est particulier, car ils disposent de grues assez puissantes pour rapprocher les houppiers du cloisonnement d'exploitation et pour actionner un grappin découpeur. Ils pourraient façonner les houppiers... mais le problème des dégâts liés au trainage des houppiers demeure.

Synthèse des caractéristiques d'un chantier de récolte de houppiers de gros bois feuillus

Qu'est ce qui caractérise particulièrement un chantier de récolte de gros houppiers feuillus ? En premier lieu, c'est la grande variabilité de la morphologie, non seulement entre houppiers mais aussi entre toutes les branches d'un même arbre. Ensuite, c'est l'éparpillement des houppiers sur l'ensemble de la parcelle, à une distance plus ou moins grande des cloisonnements, et leur positionnement éventuel au milieu d'une régénération ou d'arbres à préserver.

Ces deux éléments conditionnent le choix des systèmes de récolte mécanisés à mettre en œuvre, lesquels doivent relever plusieurs défis :

- leurs outils de coupe doivent être efficaces (et résistants dans la durée) pour façonner toutes les grosses branches de feuillus durs, souvent flexueuses et présentant des angles d'insertion très variés ; cela exclut les têtes de bûcheronnage traditionnelles, conçues pour les résineux (bois moins durs, aux troncs droits et branches fines insérées à angle droit) ;
- ils doivent aussi préserver les arbres restants, la régénération et les sols en ne circulant que sur les cloisonnements, ce qui signifie concrètement que toutes les opérations doivent être réalisées depuis le cloisonnement ;
- ils doivent permettre, dans le cadre de la gestion de la fertilité, de laisser le cas échéant des menus bois au sol pour le maintien de la fertilité chimique des sols (ONF, 2009) ;
- et enfin, ils doivent être économiquement performants au regard du faible prix de vente des produits destinés au bois énergie.

Synthèse sur le choix des systèmes à tester

Les questions et contraintes que nous venons d'exposer ont été discutées avec des professionnels (ETF, responsables exploitation ONF, personnels d'ONF Energie), afin de s'assurer d'un choix raisonnable et facilement transposable vers l'opérationnel. Ce qui a abouti à la décision d'étudier 2 systèmes :

- un système à un seul engin (porteur combi, avec grappin scie) ;
- un système à deux engins (pelle hydraulique avec grappin scie, suivie d'un porteur).

Ces choix ont fait l'objet de sept chantiers test, dont les caractéristiques et les résultats technico-économiques sont présentés dans les articles suivants.



E. Ulrich, ONF

CARACTÉRISTIQUES DES DEUX SYSTÈMES D'EXPLOITATION TESTÉS ET DES CHANTIERS ÉTUDIÉS

Les deux systèmes de récolte identifiés pour répondre aux exigences particulières de la récolte mécanisée des gros houppiers (voir article précédent) utilisent le même outil pour façonner les produits attendus : **le grappin scie** (figure 1). Il s'agit tout simplement d'un grappin traditionnel auquel s'ajoute un bloc scie (guide avec chaîne de tronçonneuse + lubrification et son système de commande). Dans un cas, il est monté sur la grue d'un porteur, lequel est donc capable de façonner et débarder les houppiers : c'est **le système à un engin** (code « S1 »). Dans l'autre cas, il est monté sur le bras d'une pelle mécanique qui ne fait que le façonnage, le débardage étant réalisé par un porteur traditionnel : c'est **le système à deux engins** (code « S2 »).

Ces deux systèmes, entièrement mécanisés, ont pu être observés sur sept chantiers dans l'Est de la France, sur la période 2013-2015 (pays des Etangs en Moselle et massif de Chaux dans le Jura), avec des entreprises pionnières qui avaient déjà mis en œuvre le traitement mécanisé des houppiers. Ces chantiers ont été choisis en fonction de la différence apparente des caractéristiques des houppiers (petit, moyens, gros), de leur nombre à l'hectare, et en fonction de la disponibilité des opérateurs.

Le système à un seul engin pour façonner et débarder : porteur équipé d'un grappin scie

Pour le système à un engin, le porteur est spécifiquement équipé :

- d'une grue à longue portée (10 m) afin de pouvoir rester sur le cloisonnement,
- d'un grappin scie.

Les essais de ce système ont été réalisés avec deux entreprises intervenant en Moselle sur des sols sensibles au tassement et dans des peuplements infestés par la processionnaire du chêne. Les machines étaient donc équipées de 4 tracks à tuiles plates et d'une cabine climatisée avec un système de filtration de l'air pour que l'opérateur soit protégé des poils urticants en suspension dans l'air après abattage des arbres. Sauf précision contraire (voir ci-après), elles ont travaillé avec leur panier à ranchers d'origine (code « S1R »).

La première entreprise avait opté pour un porteur HSM 208F de capacité de charge 12 tonnes, équipé sur certains chantiers d'un caisson compacteur conçu par l'entrepreneur pour réduire le foisonnement (code « S1C » ; figure 2). La seconde entreprise avait choisi le Valmet Combi 801, une machine combinée à l'origine (machine de bûcheronnage-porteur d'une capacité de charge de 13 tonnes) qui a été reconditionnée en porteur avec grappin scie. Elle possède une cabine pivotante.

Philippe Ruch

FCBA - Équipe Approvisionnement Bois

Xavier Montagny

FCBA - Équipe Approvisionnement Bois

Erwin Ulrich

ONF - Pôle RDI de Fontainebleau-Compiègne

Dominique Goetsch

ONF - UT Sarrebourg plaine

Alain Bouvet

FCBA - Équipe Sylviculture

Pascal George

ONF - Pôle RDI de Nancy



Figure 1 : le grappin scie
Modèle Hultdins Super grip II 420 S avec le bloc scie SuperSaw 550S, guide de 60 cm, monté sur le porteur HSM 208F.

Les caractéristiques techniques des deux machines sont présentées dans le tableau 1.

L'organisation mise en place est la même sur tous les chantiers étudiés. L'engin reste sur le cloisonnement et le conducteur, à l'aide du grappin scie, rapproche le houppier et le façonne progressivement (figure 3). Plus précisément, il sépare chaque « brin » du houppier et ne le recoupe que s'il est trop long (plus de 6 - 8 m) ou trop courbé. Le chargement dans le panier se fait au fur et à mesure du façonnage, le conducteur ne posant au sol que les branches de petit diamètre afin de les regrouper en une charge plus importante. Lorsque le panier est plein, le bois est amené et déchargé à la place de dépôt. Le conducteur ne quitte son poste de conduite que pour les opérations d'entretien et de réparation (affûtage de la chaîne, graissage...), ce qui répond ainsi à la problématique de l'infestation par la chenille processionnaire.

HSM 208F 12T	Valmet COMBI 801
	
<ul style="list-style-type: none"> • Moteur : Iveco 6-cylindres, 238 cv • 8X8 en pneumatiques de 700 mm • Grue de 10 m, d'une capacité de levage de 125 kNm • Grappin : Hultdins SuperGrip II 420S (2,05 m d'ouverture) et bloc scie Hultdins SuperSaw 550S • Masse à vide: 16,5 T (sans tracks, données constructeurs) soit une masse globale avec tous les équipements (lame, treuil, caisson...) et tracks de l'engin d'environ 22 à 23T • Capacité de charge (en billons) : 12 T • Longueur : 10 m • En version panier avec ranchers (longueur: 4,65 m, surface: 11,4 m²) 	<ul style="list-style-type: none"> • Moteur : Sisu 6-cylindres, 190 cv • 8X8 en pneumatiques de 700 mm • Grue de 10,6 m, d'une capacité de levage de 139 kNm • Grappin : Hultdins SuperGrip II 360S (1,90 m d'ouverture) et bloc scie Hultdins SuperSaw 550S • Masse à vide: 19,8 T (sans tracks, données constructeurs) soit environ 22 à 23 T avec les tracks • Capacité de charge (en billons) : 13 T • Longueur : 9,4 m • Panier avec ranchers (longueur: 4,30 m, surface: 10,7 m²)
<ul style="list-style-type: none"> + En version caisson compacteur (longueur 3,90 m, surface 16 m² avant compaction, 9 m² après) 	<ul style="list-style-type: none"> + Cabine pivotante
Références des chantiers suivis (voir aussi tableau 3) : S1R-D (version ranchers), S1C-B et S1C-C (version compacteur)	Références des chantiers suivis (voir aussi tableau 3) : S1R-A et S1R-E

Tableau 1 : caractéristiques techniques des porteurs équipés d'un grappin scie du système à 1 engin



Figure 2 : le porteur HSM 208F équipé du caisson compacteur en position ouverte (en haut) et fermée (en bas)



Figure 3 : illustration du système à 1 engin sur le chantier de la coupe d'amélioration en forêt domaniale de Fénétrange, parcelle 191

Le système à deux engins : pelle équipée d'un grappin scie pour façonner, porteur pour débarder

Dans le second système, les opérations de façonnage et de débardage sont dissociées dans le temps et font donc appel à deux engins :

- une pelle hydraulique équipée d'un grappin scie (ou éventuellement d'un « croque souche », voir encadré 1),
- un porteur sans équipement spécifique.

L'entreprise suivie avait opté pour une pelle TEREX TC125 de 12,5 T. Elle est compacte, exerce une faible pression au sol (moins de 500 g/cm² en pression statique) et la portée de la grue est de 5,88 m. Le porteur Ponsse Gazelle a une capacité de charge de 10 tonnes (tableau 2) et la pression statique en charge est de l'ordre de 1 kg/cm². Ce porteur a travaillé avec sa grue de portée de 10 m et ses ranchers d'origine (code « S2R »).

L'avantage du système mis en avant par l'entreprise, par rapport à un façonnage manuel, est que tous les bois peuvent être extraits par le porteur sans que celui-ci quitte les cloisonnements. Les produits façonnés ont en effet été rassemblés en tas à sa portée par la pelle qui, elle seule,

circule en partie dans la bande boisée. Cela ne répond pas pleinement à l'exigence de ne travailler que depuis le cloisonnement, mais c'est un progrès par rapport au façonnage manuel dans la mesure où le porteur, lui, n'intervient plus dans la bande boisée, et où une pelle exerce une bien plus faible pression au sol qu'un engin sur roues chargé. Si on anticipe que le travail avec la pelle ne sera pas toujours possible (sols insuffisamment portants), il faut prévoir un tirage des houppiers vers le cloisonnement par le débusqueur lors de la vidange des grumes, ou bien faire préparer les houppiers par la pelle quand les conditions le permettent encore, quitte à devoir attendre des périodes plus favorables pour faire intervenir le porteur. Ainsi ce système se différencie du système à un engin car il permet de tirer parti de la dissociation, dans le temps, des opérations de façonnage et de débardage (figure 4).

Sur les chantiers suivis, les longueurs moyennes des produits façonnés par la pelle équipée du grappin scie sont de l'ordre de 4,30 m, ce qui correspond à peu près à la longueur du panier. L'entreprise a opté pour des longueurs relativement courtes afin d'avoir des produits plus droits. L'objectif est, d'une part, de faciliter les opérations de chargement et déchargement du bois et, d'autre part, de réduire le foisonnement. Ceci a aussi un impact positif sur le stockage, lorsque la place de dépôt est limitée en profondeur.

Engin n°1 : pelle TEREX TC125	Engin n°2 : porteur Ponsse Gazelle
	
<ul style="list-style-type: none"> • Moteur : Deutz - 4 cylindres, 116 cv 	<ul style="list-style-type: none"> • Moteur : Mercedes Benz, 175 cv
<ul style="list-style-type: none"> • Chenilles métalliques de 50 cm de large, longueur (contact au sol) : 2,78 m, soit une surface de 2,78 m² 	<ul style="list-style-type: none"> • 8X8 en pneumatiques de 600 mm
<ul style="list-style-type: none"> • Grue de 5,88 m, d'une capacité de levage de 125 kNm 	<ul style="list-style-type: none"> • Grue de 10 m, d'une capacité de levage de 106 kNm
<ul style="list-style-type: none"> • Grappin scie Intermercato (1,37 m d'ouverture) et guide de 60 cm 	<ul style="list-style-type: none"> • Grappin : 1,70 m d'ouverture
<ul style="list-style-type: none"> • Masse à vide (données constructeurs) : 12,5 T + grappin scie 	<ul style="list-style-type: none"> • Masse à vide (donnée constructeur) : 14 T
	<ul style="list-style-type: none"> • Capacité de charge (en billons) : 10 T
	<ul style="list-style-type: none"> • Longueur : 9 m
	<ul style="list-style-type: none"> • Panier avec ranchers (longueur : 4,20 m)
Références des chantiers suivis (voir aussi tableau 3) : S2R-F et S2R-G	

Tableau 2 : caractéristiques techniques de la pelle et du porteur du système à 2 engins

Étape 1 : Façonnage des houppiers à la pelle



X. Montagny, FCBA

Vue générale du chantier



X. Montagny, FCBA

Le houppier est façonné,...



X. Montagny, FCBA

les produits sont empilés...



X. Montagny, FCBA

... et rassemblés au bord du cloisonnement.



X. Montagny, FCBA

Le menu bois est ramené dans le cloisonnement : le porteur circulera dessus pour limiter le tassement.

Étape 2 : Débardage au porteur



A. Moine, FCBA

Le porteur en cours de chargement.



A. Moine, FCBA

Tous les produits sont à portée de grue.



P. Ruch, FCBA

Les produits sont stockés en bord de route.

Présentation des 7 chantiers de récolte de houppiers

Les chantiers étudiés, réalisés sur la période 2013-2015, étaient localisés :

- en Lorraine (secteur de Sarrebourg, région des Etangs) pour le système à un engin. Ce système a fait l'objet d'un suivi sur cinq chantiers : trois coupes d'amélioration de chêne (en forêt domaniale de Fénétrange, parcelles 76, 83 et 191) et deux coupes de régénération de chêne (une coupe secondaire en forêt domaniale de Fénétrange, parcelle 54, et une coupe définitive en forêt domaniale de Sanon, parcelle 194) ;
- en Franche Comté (secteur de Chauv) pour le système à deux engins. Deux chantiers ont été suivis : une coupe d'amélioration de chêne et de hêtre (en forêt communale de Rans, parcelle 5) et une coupe définitive de chêne (en forêt domaniale de Chauv, parcelle 185).

La liste des chantiers, leurs références et la codification utilisées pour l'analyse des résultats (cf. article suivant) sont présentées dans le tableau 3.

1 - Une alternative au grappin scie pour des pelles de 14 à 25 tonnes : le « croque souche »

L'intérêt de cet outil par rapport au grappin scie est que son besoin d'entretien est très limité (essentiellement le graissage) et qu'il n'y a pas d'arrêt machine dû à des sauts de chaînes, ni de remplacement de chaîne et de guide. Cependant, son utilisation est jugée délicate par certains utilisateurs car il faut doser la fermeture du « croque souche » si on veut s'en servir pour tirer/déplacer du bois sans le couper (ce n'est effectivement pas un grappin !).



P. Ruch, FCBA



P. Ruch, FCBA

Exemple de « croque souche » monté sur une pelle de 22 T dont le bras a environ 7 m de portée utile. Pour avoir une coupe plus nette, l'entreprise a soudé une lame verticale sur le bord droit du « croque souche ».

Figure 4 : illustration du système à 2 engins sur le chantier de la coupe définitive du chantier de la forêt domaniale de Chauv

Parcelle	Type de coupe	Système	Codification
FD de Fénétrange P76	Coupe d'amélioration	1 engin : Valmet Combi avec ranchers	S1R-A
FD de Fénétrange P83	Coupe d'amélioration	1 engin : porteur HSM avec caisson compacteur	S1C-B
FD de Fénétrange P191	Coupe d'amélioration	1 engin : porteur HSM avec caisson compacteur	S1C-C
FD de Fénétrange P54	Coupe secondaire	1 engin : porteur HSM avec ranchers	S1R-D
FD de Sanon P194	Coupe définitive	1 engin : Valmet Combi avec ranchers	S1R-E
FC de Rans P5	Coupe d'amélioration	2 engins : Pelle Terex + porteur Ponsse avec ranchers	S2R-F
FD de Chauv P185	Coupe définitive	2 engins : Pelle Terex + porteur Ponsse avec ranchers	S2R-G

Tableau 3 : liste des chantiers et leurs références

Codification : système à 1 engin (S1) ou à 2 engins (S2) – type de panier Ranchers (R) ou Caisson Compacteur (C) – lettre propre à chaque chantier (A, B...)

Sur tous les chantiers, les arbres ont été abattus manuellement et les grumes extraites au débusqueur, sauf pour la parcelle 83 de la FD de Fénétrange où les arbres ont été extraits au câble-mât (de ce fait les houppiers étaient au bord des cloisonnements). Aucune consigne particulière relative aux houppiers n'avait été donnée aux équipes qui ont abattu et façonné les grumes. De même, il n'y a pas eu de consigne particulière pour l'exploitation des houppiers, si ce n'est de laisser les menus bois sur place (diamètre < 7 cm). Il se trouve que les houppiers des chantiers lorrains avaient pu sécher pendant plusieurs mois et que les petites branches avaient tendance à casser spontanément lors de la manipulation. Mais sur les chantiers franc-comtois les houppiers étaient encore frais et feuillés et l'abandon des menus bois sur place a nécessité un travail spécifique.

Déroulement de l'étude

Pour chacun des chantiers, une zone d'étude a été identifiée et tous les houppiers y ont été mesurés (diamètre gros bout à la base du houppier, longueur totale, distance entre le bord du cloisonnement et la base du houppier ou la grosse branche la plus proche du bord du cloisonnement).

Les différentes phases de travail sont notées selon la méthode des Observations Instantanées (une observation toutes les 15 secondes). Le nombre de traits de scie est noté de manière exhaustive par le chronomètre. La durée de chaque cycle de débardage est relevée ainsi que le tonnage débardé : les porteurs ont en effet été équipés d'un modèle de peson qui a permis d'enregistrer en dynamique, lors de la phase de déchargement, la masse grappin par grappin. La masse débardée est ainsi déterminée pour chaque cycle de débardage et pour l'ensemble du chantier. La seule précaution à prendre, pour le type de peson utilisé, est de s'assurer que la charge ne touche rien pendant 3 secondes (voir aussi encadré 2).

Au total, les suivis ont concerné le façonnage de 276 houppiers de chênes et hêtres, et le débardage de 522 tonnes de bois correspondant à 73 cycles de débardage (de 5 à 18 cycles de débardage selon les chantiers).

2 - Intérêt de la pesée semi-automatisée pendant le chantier

La connaissance, au fur et à mesure de l'avancement du chantier, de la masse brute de bois récoltée, notamment quand il s'agit de bois énergie en vrac, est une information très utile pour la gestion de la logistique (connaissance des stocks, planification des opérations de broyage, enlèvement et livraison client...) comme de la relation contractuelle avec les prestataires (factures intermédiaires).

Depuis quelques années les grues des engins (porteurs ou camions) peuvent être équipées d'instruments de mesure (pesons) et de transmission de données adaptés aux produits forestiers. Le peson est installé entre la grue et le grappin du porteur (cf. photos). Lorsque le conducteur décharge les produits sur la place de dépôt, il doit déclencher la pesée (bouton installé à l'intérieur de la cabine) pendant le mouvement de la grue entre les ranchers du porteur et le tas de bois. La seule exigence requise pendant la mesure est que le grappin rempli soit suspendu en l'air sans rien toucher, pour ne pas fausser la mesure. Le résultat de la pesée est transmis, par une technologie sans fil, à un boîtier situé dans la cabine du chauffeur.

Les pesées électroniques et la transmission sont très fiables sous réserve d'étalonnages et contrôles réguliers, et à condition que l'opérateur déclenche bien la pesée à chaque grappin. Le prix d'un peson se situe aujourd'hui en-dessous de 7 000 € HT.



Le peson en vue rapprochée, entre la grue et le grappin

.../...

Intérêt de la pesée semi-automatisée (suite)

Tout instrument de mesure peut devenir défaillant ou présenter une dérive dans le temps. Une surveillance journalière avec des poids dits «étalons de terrain» est donc nécessaire avant le démarrage du travail pour vérifier que le peson fonctionne normalement. Il faut utiliser deux étalons représentant la gamme des masses à charger dans la journée : l'un dans le bas de la gamme, l'autre dans le haut (voir les exemples en photo). Ils permettent de vérifier, en les soulevant simplement pour les peser, si leur masse reste dans une variabilité acceptable (coefficient de variation < 1% (OIML, 2006)).

Ces vérifications par pesée quotidienne des mêmes étalons ne prennent que quelques minutes, mais sont indispensables pour garantir la qualité des mesures. Le suivi de ces pesées permet de calculer l'étendue des variations (coefficient de variation) et de visualiser graphiquement une éventuelle dérive.

Une fois par an il peut aussi se révéler utile de faire vérifier le peson par un organisme indépendant et agréé, disposant de la certification COFRAC (Commission Française d'Accréditation) pour ce type de contrôle.

Protocole de suivi des étalons de terrain pour vérifier le bon fonctionnement du peson et déceler une éventuelle dérive :

- 1 se procurer deux étalons de terrain, l'un dans le bas de la gamme des masses à mesurer et l'autre dans le haut de cette gamme ; s'assurer que ces étalons terrain ne sont pas sujets à des variations de poids (selon le taux d'humidité par exemple) ;
- 2 peser chaque étalon de terrain avant le début du travail sur le chantier ; noter les poids dans un tableur ;
- 3 intégrer dans le même tableur toutes les nouvelles mesures ;
- 4 calculer la moyenne de toutes les mesures réalisées depuis le début et calculer le coefficient de variation (= % de l'écart-type comparé à la moyenne des mesures) ;
- 5 vérifier qu'à chaque nouvelle valeur mesurée, le coefficient de variation est bien < 1% ;
- 6 si le coefficient de variation est ≥ 1%, faire vérifier le peson par le constructeur ou un organisme agréé ;
- 7 après chaque contrôle par un organisme agréé, ouvrir un nouveau tableau et recommencer la procédure (points 1 à 6) pour une nouvelle série de mesures et de calculs ;
- 8 si les dépassements du seuil de 1% du coefficient de variation sont fréquents, contacter le constructeur du peson pour révision complète, en transmettant les données de suivi (terrain et par l'organisme agréé).



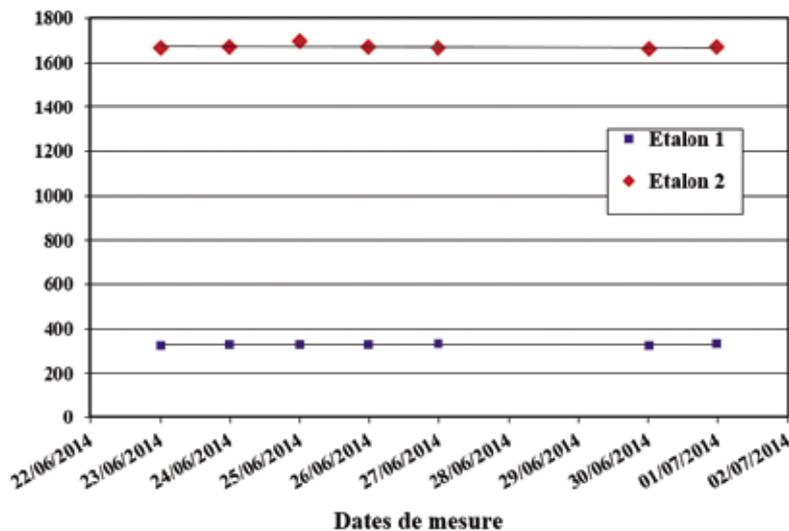
Exemples d'étalons de terrain

À gauche, masse légère (plusieurs contrepoids de tracteurs : 330 kg).
À droite, masse lourde (bloc béton, 1673 kg)

n°	Date	Heure	Etalon 1 (Kg)	Etalon 2 (Kg)
1	23/06/2014	07:35	327	1668
2	24/06/2014	07:05	330	1672
3	25/06/2014	07:10	328	1698
4	26/06/2014	07:00	330	1673
5	27/06/2014	07:15	334	1667
6	30/06/2014	07:05	326	1663
7	01/07/2014	07:00	333	1673

	Etalon 1	Etalon 2
Moyenne des mesures au peson	329,7	1673,4
Ecart-type	2,98	11,44
Coefficient de variation	0,91%	0,68%
Minimum	326	1663
Maximum	334	1698
Différence entre poids maximal et minimal	8	35

Kilogramme



Suivi des pesées de deux étalons de terrain avec le peson INTELWEIGH XW 70 BS de Intermercato

RÉSULTATS ET ENSEIGNEMENTS DES CHANTIERS DE RÉCOLTE DES HOUPPIERS AVEC DEUX SYSTÈMES D'EXPLOITATION MÉCANISÉE

Cet article présente les résultats et enseignements techniques de l'étude des 7 chantiers d'exploitation mécanisée des houppiers décrits dans l'article précédent, y compris les coûts techniques.

Les principales caractéristiques de ces chantiers sont consignées dans le tableau 1. Il est à noter, que sur de tels chantiers, on ne récolte pas seulement le bois des houppiers. On y récolte également des tiges abattues mais laissées sur coupe lors du débardage du bois d'œuvre (souvent des charmes), des purges de grumes, ainsi que des tronçons de branches isolées cassées lors de l'abattage. C'est dans les coupes d'amélioration que ces « co-produits » sont les plus abondants (figure 1). Sur le chantier de la forêt communale de Rans (S2R-F), ils représentent même 75% des produits en nombre de pièces, et 55% du tonnage sorti.

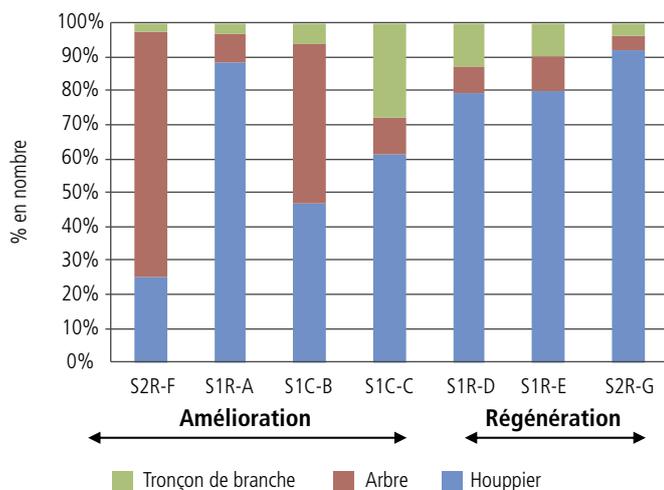


Figure 1 : répartition des produits des chantiers (en nombre de pièces) selon leur compartiment d'origine : houppiers entiers, arbres entiers ou tronçons de branches isolées

Observations générales

Caractéristiques des houppiers

Sur l'ensemble de ces chantiers, 276 houppiers ont pu être mesurés précisément. Les diamètres à la base des houppiers sont très variables et généralement compris entre 30 et 70 cm. La moyenne est, selon les chantiers, de l'ordre de 40-55 cm (40-45 cm pour les coupes d'amélioration et

45-55 cm pour les coupes de régénération). Le plus gros diamètre relevé sur les zones de suivis est de 90 cm. Les longueurs moyennes des houppiers sont de l'ordre de 10 à 15 m (figure 2), avec des maxima dépassant les 20 m.

Prélèvement

Le prélèvement relatif aux houppiers et « coproduits », en tonnes brutes/ha, s'échelonne entre 25 tonnes/ha et 67 tonnes/ha pour les coupes d'amélioration et la seule coupe secondaire de régénération (S1R-D) (figure 3). La masse moyenne est d'environ 1 à 1,5 tonne par houppier.

En coupe définitive de régénération, le prélèvement est de l'ordre de 100 tonnes/ha avec des masses moyennes de 2 à 2,5 tonnes/houppier.

Conditions d'exploitation

Les parcelles ne présentaient aucune difficulté d'exploitation particulière (terrain plat, sans obstacles). Les seules différences susceptibles d'affecter la productivité (tableau 1), concernaient les distances de débardage, généralement assez courtes sauf pour le chantier de la forêt domaniale de Chau (S2R-G), et les entre-axes de cloisonnement d'exploitation, parfois variables au sein d'une même parcelle.

Sur le chantier de la forêt communale de Rans (S2R-F), l'écartement de 37,5 m a obligé la pelle à travailler dans la bande boisée, avec l'accord de l'ONF, afin que le porteur puisse rester sur le cloisonnement. Dans la parcelle 83 de la forêt domaniale de Fénétrange (S1C-B), l'écartement important, de l'ordre de 40 m n'a pas causé de difficulté car les houppiers avaient été rapprochés du cloisonnement lors de l'exploitation des grumes.

Par ailleurs, sur les 2 chantiers de Franche-Comté (S2R-G et S2R-F) réalisés durant l'été, l'entreprise a parfois été obligée de recouper les menus bois pour respecter la prescription de les laisser sur coupe.

Le suivi de ces 7 chantiers a permis de tirer plusieurs enseignements utiles, qui sont présentés ci-après.

Philippe Ruch

FCBA - Équipe Approvisionnement Bois

Xavier Montagny

FCBA - Équipe Approvisionnement Bois

Erwin Ulrich

ONF - Pôle RDI de Fontainebleau-Compiègne

Dominique Goetsch

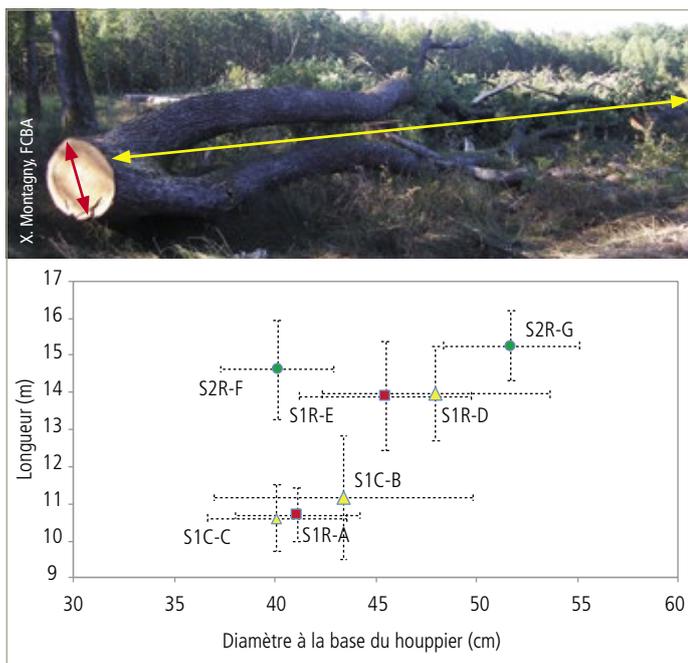
ONF - UT Sarrebourg plaine

Alain Bouvet

FCBA - Équipe Sylviculture

Pascal George

ONF - Pôle RDI de Nancy



- Systèmes d'exploitation :**
- 2 engins :
pelle Terex (+ grappin scie)
porteur Ponsse
 - ▲ 1 engin :
porteur HSM (+ grappin scie)
avec caisson compacteur (S1C)
ou ranchers (S1R)
 - 1 engin :
porteur Valmet Combi
(+ grappin scie)

Figure 2 : caractéristiques moyennes des houppiers des différents chantiers : moyenne et intervalles de confiance à 95% des longueurs et diamètres à la base

Chantier	Système 1 engin					Système 2 engins	
	S1R-E	S1R-A	S1R-D	S1C-B	S1C-C	S2R-F	S2R-G
Prélèvement des houppiers et co-produits (tonnes brutes/ha)	92,2	25,8	41,9	55,4	25,3	30	105
Type de coupe	Définitive	Amélioration	Secondaire	Amélioration	Amélioration	Amélioration	Définitive
Machine 1	Porteur Valmet Combi avec grappin scie		Porteur HSM 208F avec grappin scie			Pelle Terex TC125 avec grappin scie	
Machine 2						Porteur Ponsse Gazelle	
Panier de débardage	Ranchers		Caisson compacteur			Ranchers	
Capacité de charge théorique (tonnes)	13		12			10	
Nombre de cycles de débardage suivi	10	9	9	5	5	17	18
Tonnage débardé (tonnes)	73,53	61,12	64,8	62,12	50,49	88,42	121,67
Charge moyenne des porteurs pleins (houppiers + co-produits) (tonnes)	7,35	7,2	7,2	14,27	10,1	5,79	7,05
Taux de charge (%) (charge moyenne/capacité de charge théorique)	57%	55%	60%	119%	84%	58%	71%
Charge maximale observée (tonnes)	8,29	8,56	8,58	16,05	11,38	8,09	8,37
Taux de charge maximale (%)	64%	66%	72%	134%	95%	81%	84%
Distance de débardage moyenne (m)	255	228	358	140	163	161	591
Entre-axe de cloisonnement (m)	20 m	23 et 45 m	20 m	41 m	28 m	37,5 m	15 et 26 m
Distance moyenne houppier-cloisonnement (m)	2,4	3	5,8	3,5 ^(a)	2,1	8,9	3,5
Productivité en tonnes/heure machine productive^(b)	17,85	15,48	9,71	15,37	11,26	-	-
Façonnage (tonnes/hmp)	17,85	15,48	9,71	15,37	11,26	7,37	10,37
Débardage (tonnes/hmp)						17,5	15,5
Temps productif pour une tonne de bois (min)	3,4	3,9	6,2	3,9	5,3	11,6	9,7
Nombre moyen de coups de scies (nb/tonne)	1,7	2,4	2,1	1,3	1,8	11,3	6,6
% de coups de scies pour le menu bois	0%	0%	0%	0%	0%	24%	16%

Tableau 1 : résultats des 7 chantiers d'exploitation de houppiers

(a) Distance très faible liée au débardage par câble aérien des arbres entiers qui ont été rapprochés des cloisonnements

(b) Heure Machine Productive (HMP) : temps consacré réellement au façonnage et débardage des houppiers sur chantier (y compris les incidents ≤ 5 min)

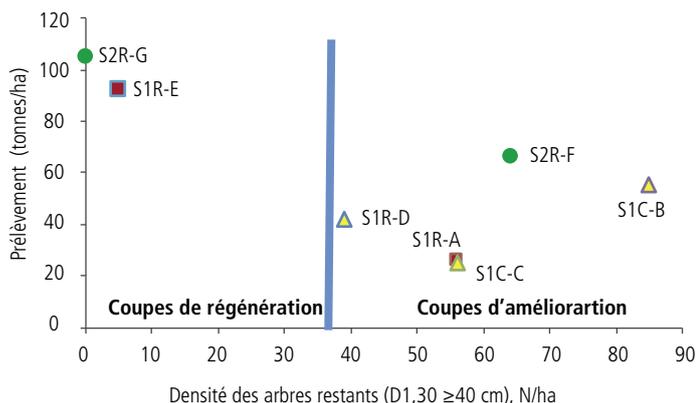


Figure 3 : Caractéristiques des 7 chantiers : prélèvement constaté en fonction de la densité des arbres restants

Codification : idem figure 2.

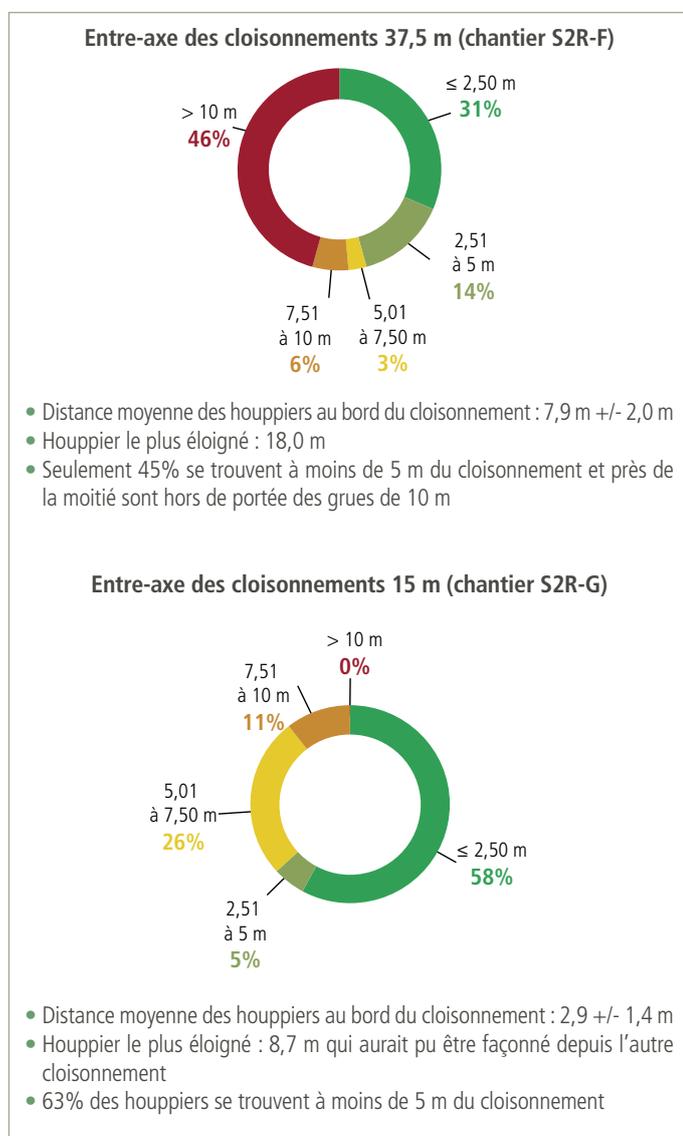


Figure 4 : exemples de répartition des houppiers par classe de distance par rapport au cloisonnement, sur deux chantiers contrastés

Tous les houppiers peuvent être façonnés... dès lors qu'ils sont à portée de grue

ENSEIGNEMENT N°1 : le grappin scie est un outil efficace

Sur l'ensemble des chantiers étudiés, aucun houppier n'a dû être abandonné ou façonné manuellement en raison d'une incapacité liée au grappin scie. C'est l'enseignement majeur de cette étude.

ENSEIGNEMENT N°2 : l'entre-axe des cloisonnements est un facteur déterminant

Les porteurs du système à 1 engin, avec leur grue de 10 m de portée, peuvent travailler dans des parcelles cloisonnées jusqu'à 18 m d'entre-axe. Au-delà, il n'est pas possible, de traiter les houppiers en restant sur le cloisonnement.

Dans le cas du système à 2 engins, le bras d'une pelle de 12,5 T est beaucoup plus court, ce qui oblige l'engin à sortir du cloisonnement pour les houppiers distants de plus de 5 m. Ainsi, plus les cloisonnements sont écartés, plus la pelle devra pénétrer dans la bande boisée (figure 4), sauf à ce que les houppiers distants de plus de 5 m soient rapprochés par le débúsqueur des grumes. Cette dernière solution n'est cependant pas toujours adaptée, en raison des risques de dégâts potentiels sur les arbres ou la régénération. Il est à noter que si une pelle plus grosse (22 T) avait été utilisée, la portée utile aurait plutôt été de 9 m.

ENSEIGNEMENT N°3 : le travail avec la grue préserve les arbres restants et/ou la régénération

Au cours des suivis, il a été constaté que le travail avec des engins à grue permet de limiter les impacts sur le peuplement restant, ou le cas échéant la régénération. En effet, la grue permet de manipuler aisément les brins. La dextérité du conducteur est à ce titre fondamentale et conditionne la qualité de l'exploitation.

Les principaux facteurs impactant la productivité

La productivité présentée dans le tableau 1 est exprimée en tonnes brutes par heure machine productive (t/hmp). Elle permet d'analyser finement les différentes phases de travail afin de comparer les systèmes et configurations de machines. C'est une productivité qui ne prend pas en compte les pauses, ni la maintenance, ni les incidents de plus de 5 minutes. Il s'agit en quelque sorte d'une productivité maximale dans les conditions observées, différente de la productivité moyenne calculée sur toute la durée du chantier, exprimée en tonnes brutes par heure machine ou heure horamètre (t/hh). Cette productivité moyenne est toujours plus faible (écart de -15 à -55% par rapport à la productivité maximale pour les chantiers suivis).

ENSEIGNEMENT N°4 : la distance de débardage reste le premier facteur explicatif de la productivité des porteurs

Comme on pouvait s’y attendre, la productivité baisse avec l’augmentation de la distance de débardage. C’est significatif sur 3 chantiers (figure 5). Ce sont des chantiers avec une gamme de distances assez large et un nombre de cycles suffisamment important pour que la corrélation soit jugée significative. Mais la distance n’est pas le seul critère car on observe, pour des distances équivalentes, des différences de productivité importantes entre chantiers.

ENSEIGNEMENT N°5 : il est possible d’augmenter le taux de charge du porteur en réduisant le foisonnement des produits, le cas échéant par l’utilisation d’un caisson compacteur

En configuration classique, de panier avec des ranchers, les taux de charge des porteurs (tonnage transporté/capacité de l’engin) vont entre 55 et 60 % sur 4 des 5 chantiers (figure 6), indépendamment du type de porteur. Le cinquième chantier (S2R-G) est une coupe définitive, sans arbres gênants pour le porteur, notamment dans les virages, ce qui a permis de charger plus en hauteur et d’accepter des produits plus longs (malgré une majorité de produits courts : 4,30 m en moyenne). Ainsi les volumes transportés ont été plus importants et le taux de charge s’élève alors à 71 %.

Dans le système à 2 engins, le façonnage des houppiers par la pelle en produits courts, qui est un choix de l’opérateur, permet d’optimiser le chargement du porteur, et des taux de charge de plus de 80 % ont pu être observés sur quelques cycles (en régénération). Mais cela nécessite plus de temps de traitement des houppiers en amont (cf. enseignement 7). Dans le cas du système à 1 engin, les conducteurs évitent plutôt de faire des brins courts pour limiter le nombre d’opérations et les longueurs dépassent souvent les 7 m ; les bois foisonnent donc davantage (figures 6 et 7).

Le caisson compacteur améliore nettement la productivité, comme en témoignent les comparaisons qui ont pu être faites. Le porteur HSM 208F a en effet réalisé trois chantiers dont l’un (S1R-D) en version panier de débardage traditionnel avec ranchers, et deux autres (S1C-B et S1C-C) avec le caisson compacteur. Sur le chantier S1C-C le taux de charge s’élève à

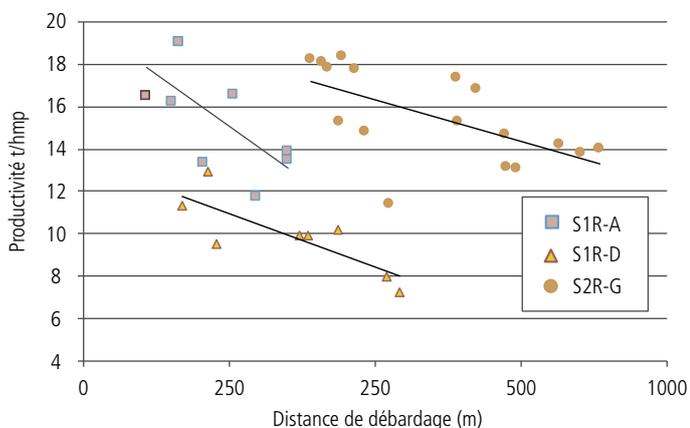


Figure 5 : productivité des porteurs en fonction de la distance de débardage, en tonnes brutes par heure machine productive (t/hmp)

Pour le système à 1 engin cette productivité inclut aussi le temps de façonnage des houppiers. Chaque point représente un cycle de débardage

84 % malgré un faible prélèvement par cloisonnement et un travail contraint par de nombreux arbres de bordure. Quand les conditions de circulation sont plus favorables (coupe rase ou cloisonnement rectiligne très ouvert), il passe à 119 % soit presque le double de la charge transportée en version ranchers (taux de charge 60 % en coupe secondaire). En l’occurrence, cela fait une différence de 7 tonnes par cycle de débardage. Il faudra cependant veiller à ce que l’augmentation du taux de charge ne soit pas préjudiciable au respect des sols ni à la longévité de la machine.

ENSEIGNEMENT N°6 : le temps de traitement des houppiers est nettement plus court avec le système à 1 engin

Pour comparer les 2 systèmes, il faut additionner les temps productifs des engins (temps hors pauses et incidents de plus de 5 minutes pour tous les engins et, pour la pelle hydraulique, hors déplacements pour se rendre sur la coupe). On en déduit ensuite le temps productif nécessaire pour traiter une tonne de bois brut, exprimé en secondes par tonne (figure 8).

Pour le système à 1 engin ce temps comporte toutes les phases de travail, c’est-à-dire le déplacement à vide depuis la place de dépôt jusqu’au premier houppier, le façonnage-chargement (impossible à dissocier) de tous les houppiers, le déplacement en charge jusqu’à la place de dépôt et pour finir le déchargement. Dans le cas du système à 2 engins, tout le temps de travail de la pelle est considéré comme du temps de « façonnage », en distinguant toutefois la part liée spécifiquement au traitement des menus bois en feuilles (phases présentes pour les 2 chantiers de Franche-Comté : S2R-G et S2R-F). Pour le porteur de ce système, il n’y a donc pas de phase de façonnage mais simplement une phase de chargement ainsi que les autres phases habituelles : déplacement à vide, en charge et le déchargement.

Les écarts entre les deux systèmes sur le temps productif nécessaire pour traiter une tonne de houppiers sont très importants (figure 8) :

- 200 à 380 secondes/tonne environ pour le système à 1 engin. Les meilleures performances sont obtenues par le Valmet combi, dont la cinématique de la grue est très performante, et par le HSM 208F avec le caisson compacteur ;
- 600 à 700 secondes/tonne environ pour le système à 2 engins.

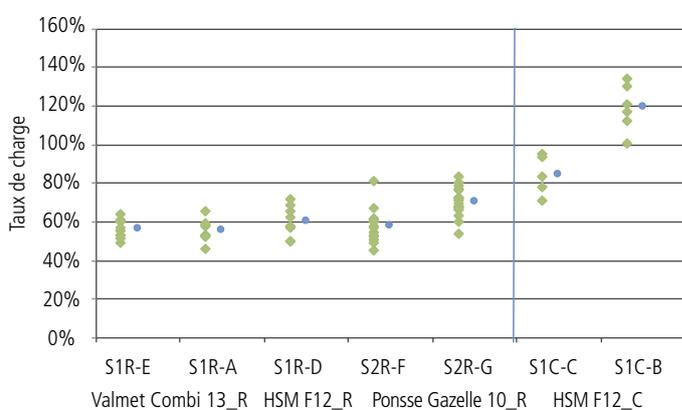


Figure 6 : taux de charge des différents porteurs sur les 7 chantiers

En vert, résultats par cycle pour des porteurs pleins ; en bleu, moyenne du chantier. Sous de code chantier sont indiqués les types de porteurs correspondants : modèle – charge utile (10, 12 ou 13 t) – panier à Ranchers (R) ou caisson compacteur (C)



Figure 7 : chargement en différentes configurations

Les temps de déplacement (à vide et en charge) sont difficiles à comparer car les distances de débardage et les charges utiles des engins sont différentes. Les temps de déchargement dépendent davantage de l'engin et de la configuration de la place de dépôt. L'analyse des écarts est donc focalisée sur les phases qui consomment le plus de temps (phases de « façonnage » et « chargement ») et qui différencient bien les deux systèmes.

Il en ressort que le temps de travail productif de la pelle (« façonnage » sur la figure 8), hors traitement des rémanents, est de 275 secondes/tonne pour S2R-G et 454 secondes/tonne pour S2R-F. Il dépasse, à lui seul, le temps de « façonnage et chargement » des porteurs équipés de grappins scie, quel que soit le chantier (de 113 secondes/tonne pour S1R-E à 216 secondes/tonne pour S1C-C). Cela vient notamment du fait que le conducteur de la pelle cherche à optimiser le travail du porteur : les bois coupés en tronçons assez courts sont rapprochés du cloisonnement en constituant des javelles bien ordonnées. Or tout cela prend du temps, à quoi s'ajoute le temps de « chargement » du porteur (77 secondes/tonne pour S2R-G et 81 secondes/tonne pour S2R-F). On a donc un gain moyen de 85 secondes/tonne sur le temps global du porteur, mais le cumul des opérations reste très pénalisant en termes de temps et, bien évidemment, de coût du chantier.

Ainsi, pour des chantiers aux conditions similaires (prélèvement par hectare, taille des houppiers), le système à 1 engin est environ trois fois plus rapide sur les phases « façonnage et chargement » que le système à 2 engins.

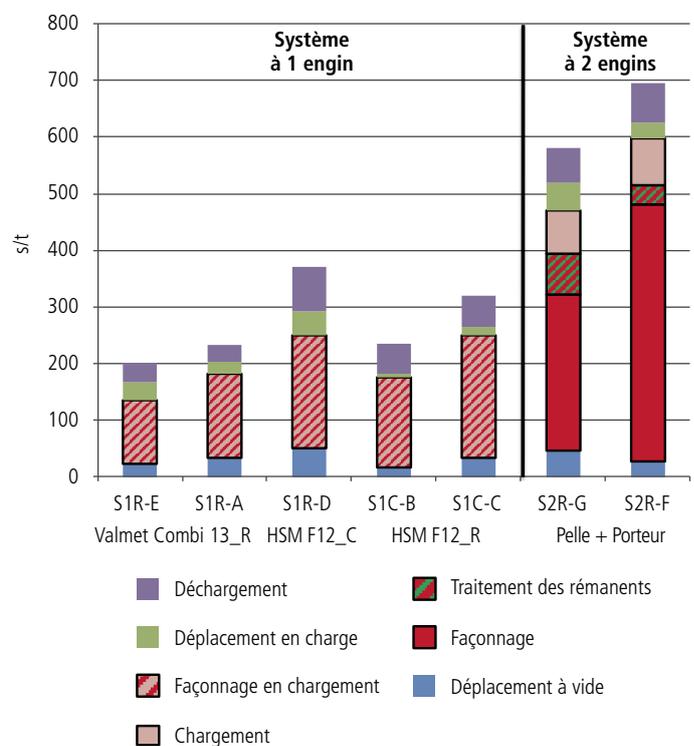


Figure 8 : temps productif nécessaire pour façonner et débarder une tonne de bois, en secondes par tonne de bois brut

ENSEIGNEMENT N°7 : le temps de travail dépend fortement du nombre de traits de scie, donc de la taille du houppier et de la nécessité ou non de couper les menus bois pour les laisser sur coupe

Le temps de « façonnage » (système à 2 engins) et « façonnage-chargement » (système à 1 engin) est directement lié à la taille des houppiers. Et il est plus lié au diamètre à la base du houppier qu'à la longueur (tableau 2 et figure 9).

Par ailleurs, à diamètre égal, les temps de façonnage sont nettement plus longs pour les chantiers avec le système à 2 engins (figure 9). Un autre élément remarquable est la relation étroite entre le temps de façonnage et le nombre de traits de scie (figure 10).

Sur les chantiers du système à 2 engins, l'opérateur de la pelle a façonné les houppiers en tronçons relativement courts et a dû prendre du temps pour séparer, dans les houppiers encore verts, les menus bois à laisser sur coupe. Les écarts en nombre de traits de scie par tonne entre les deux séries de chantiers sont, de ce fait, très importants (tableau 1). On a dénombré 1,3 à 2,4 traits de scie par tonne pour le système à 1 engin, contre 6,6 et 8,9 sur les chantiers à 2 engins, où respectivement 16 % et 24 % des traits de scie étaient liés aux rémanents.

ENSEIGNEMENT N°8 : le traitement des menus bois impacte significativement et négativement la productivité

Les résultats précédents montrent clairement que la recoupe des houppiers pour laisser les menus bois nécessite des manipulations supplémentaires qui font baisser la productivité des engins. Sur le chantier de la forêt communale de Rans (S2R-F), cette phase représente 7 % du temps de travail productif. En forêt de Chaux (S2R-G), cette proportion s'élève à 21 %, le conducteur ayant décidé, pour des raisons de portance, d'étaler les rémanents dans les cloisonnements.

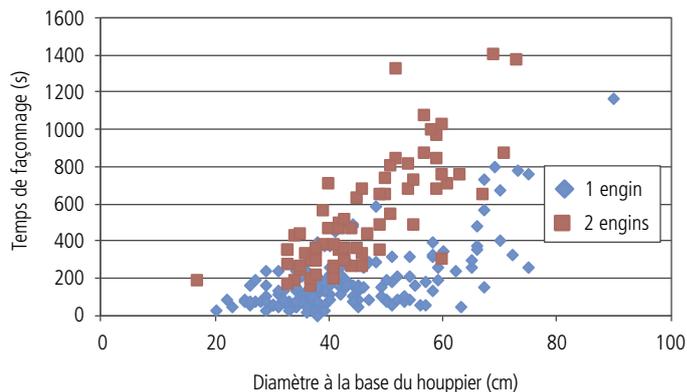


Figure 9 : temps productif lié au façonnage complet du houppier en fonction du diamètre à la base du houppier

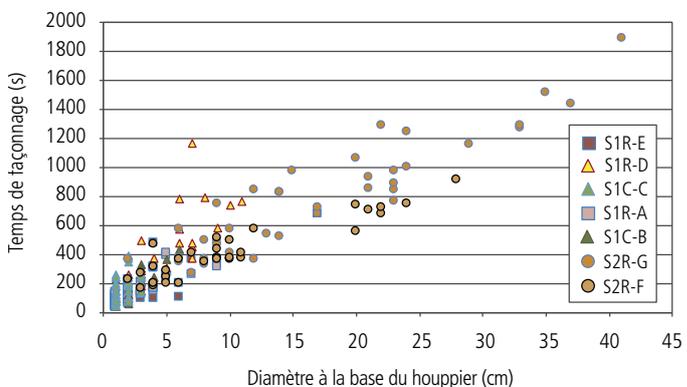


Figure 10 : temps productif lié au façonnage complet du houppier en fonction du nombre de traits de scie
Coefficient de corrélation (r de Pearson) = 0,92. Le lien entre les 2 variables est statistiquement significatif et très élevé.

Système d'exploitation	Chantier	Effectif de houppiers	Corrélation entre temps de façonnage et			
			diamètre		longueur	
			r	Prob	r	Prob
1 engin	S1R-D	26	0.86	<0.0001	0.39	0.0482
	S1R-A	51	0.64	<0.0001	0.46	0.0007
	S1C-B	11-12	0.31	0.33	0.67	0.02
	S1C-C	40	0.48	0.0015	0.14	0.4008
	S1R-E	32	0.68	<0.0001	0.50	0.0038
2 engins	S2R-G	37	0.70	<0.0001	0.58	0.0002
		33	0.77	<0.0001	0.3	0.1918

Tableau 2 : Corrélation entre le temps de façonnage et les dimensions du houppier par chantier
Coefficient de corrélation (r de Pearson) et probabilité que les deux variables soient indépendantes : si Prob < 0,05, le lien entre les 2 variables est statistiquement significatif et très élevé (indiqué en gras).

ENSEIGNEMENT N°9 : le prélèvement par hectare impacte significativement et positivement la productivité

Quatre chantiers présentant des caractéristiques communes au niveau des engins utilisés, des distances de débardage et ayant un nombre de cycles suffisamment important ont pu faire l'objet d'une analyse comparative. En effet, la différence principale entre ces chantiers est le prélèvement par hectare (en partie liée au type de coupe, figure 11).

Ces différences s'observent sur les chantiers S1R-E (coupe définitive, prélèvement de 92 t/ha) et S1R-A (coupe d'amélioration, prélèvement de 26 T/ha) pour le Valmet Combi, et sur les chantiers S1C-B (coupe d'amélioration, prélèvement de 55 T/ha) et S1C-C (coupe d'amélioration, prélèvement 25 t/ha) pour le porteur HSM 208F avec caisson compacteur.

La comparaison des chantiers deux à deux sur ces données (analyse de variance et test de comparaison de moyenne Student-Newman-Keuls) met en évidence que les différences entre chantiers sont significatives quant à l'effet du prélèvement (cf. figure 11). Tous ces effets se traduisent directement sur le coût de revient des prestations.

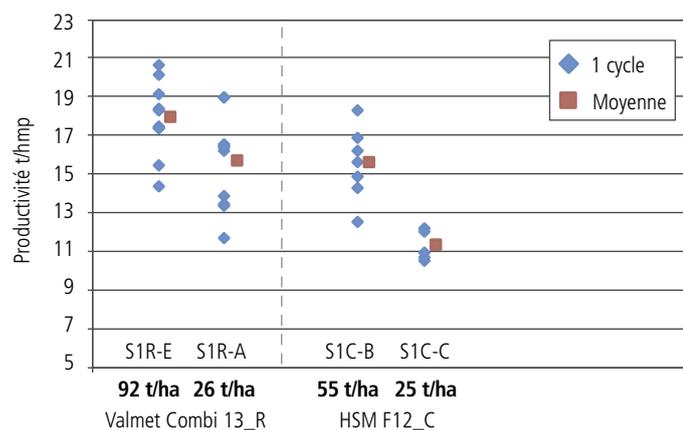


Figure 11 : productivité en fonction du prélèvement par hectare

Matériel	Coût de revient technique par heure horamètre (€/hh)
Pelle 12 t + grappin scie	64
Porteur 10 t	84
Porteur 12t et Combi 13 t + grappin scie	95

Tableau 3 : coûts de revient techniques par heure horamètre (ou heure machine) obtenus avec le progiciel PROCOU pour les engins suivis

Estimation de la productivité moyenne et des coûts techniques d'exploitation des houppiers

L'estimation économique des différents chantiers se base sur le coût de revient technique par heure horamètre (ou « heure machine ») tel que calculé pour chaque machine (tableau 3) à l'aide du progiciel PROCOU, développé par l'institut technologique FCBA et disponible sur le site : www.outils-appro.fcba.fr. Il s'agit du coût direct de la machine et de son opérateur : charges fixes, frais de fonctionnement et charges liées à l'opérateur (voir aussi Pischedda, 2010).

Ces coûts n'intègrent pas les frais de structure de l'entreprise (salaires et charges liées au personnel d'encadrement, loyers des bureaux et ateliers, taxes et impôts...), ni les subventions d'investissement, ni la marge. Ils ne correspondent donc pas à un prix de prestation, qui résulte de la négociation entre le client et le prestataire.

Les coûts techniques par tonne (€/t) se déduisent à la fois du coût technique horaire (€/hh) et de la productivité moyenne, exprimée en tonne par heure horamètre (t/hh). C'est cette dernière qui est habituellement utilisée par les opérateurs de terrain. Rappelons qu'elle est plus faible que la productivité exprimée en tonne/heure machine productive (t/hmp), car elle prend en compte tous les temps de fonctionnement de la machine (déplacements, entretiens...) et elle est calculée pour l'intégralité du chantier.

Coût technique par tonne (€/t)

=

Coût de revient technique par heure horamètre (€/hh)

Productivité moyenne (t/hh)

La productivité moyenne des porteurs des chantiers étudiés a été fixée arbitrairement à 70 % de la productivité à l'heure machine productive. Ceci permet de comparer les systèmes entre eux sur des bases identiques. À titre d'information, cette valeur varie de 60 à 85 % selon le chantier.

Ainsi pour le système à 1 engin, les coûts techniques obtenus varient entre 7,6 et 14 €/t (figure 12), les coûts les plus faibles correspondant au chantier S1R-E, qui présente les conditions d'exploitation les plus favorables : fort prélèvement par hectare, faible distance de débardage et absence d'arbres gênant les manœuvres.

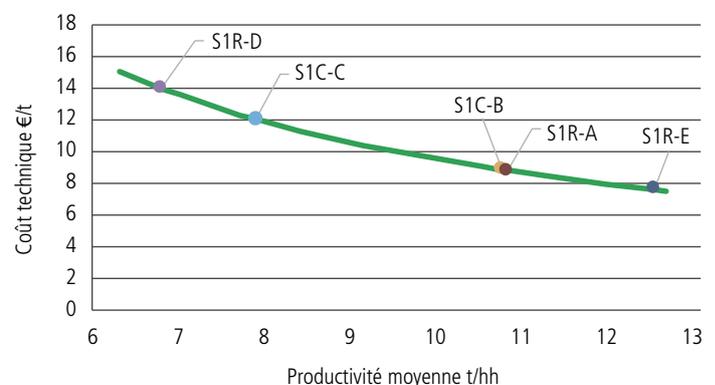


Figure 12 : coûts techniques estimés du système à 1 engin en fonction de la productivité moyenne (avec l'hypothèse : productivité moyenne = 70% de la productivité observée pendant les heures machine productives)

Pour le système à 2 engins, la pelle fait gagner au porteur en moyenne 85 secondes pour chaque tonne chargée, transportée et déchargée, par rapport au système à 1 engin (voir enseignement 6), ce qui correspond, d'après le coût technique horaire du porteur, à une économie d'environ 2 €/t. La productivité de la pelle elle-même est en moyenne de 4 à 5 t/hh (soit 45 à 55 % de la productivité en heure machine productive observée) du fait notamment de la lenteur de ses déplacements, très pénalisante sur de grandes parcelles. Le coût technique correspondant est compris entre 12,8 et 16 €/t. Cependant, d'après l'entreprise concernée, la productivité moyenne annuelle de la pelle serait plutôt de l'ordre de 6t/h.

Si on rajoute le coût technique du porteur, soit 7,3 €/t, on obtient le coût technique d'exploitation total : 20,1 et 23,3 €/t pour les deux chantiers suivis. Ce total correspond au coût observé par l'entreprise en moyenne annuelle.



E. Ulrich, ONF

Conclusions

La faisabilité d'une mécanisation intégrale de l'exploitation des houppiers de gros bois de chênes et de hêtres pour la préparation de produits intermédiaires destinés à être déchiquetés bord de route en plaquettes est démontrée ; c'est aujourd'hui une réalité opérationnelle. Le grappin scie a montré sur les chantiers tests qu'il est un outil efficace, simple d'utilisation et qui représente un investissement limité pour l'entrepreneur (de l'ordre de 15 000 €). Sur l'ensemble des chantiers tous les houppiers ont pu être façonnés avec les engins, à l'exception de ceux qui étaient hors de portée de la grue (trop loin du cloisonnement) ou non visibles depuis la cabine.

Le système à 1 engin, c'est-à-dire un porteur équipé de ce grappin scie **présente les performances les plus intéressantes car les manipulations des bois sont limitées**. De plus, cette configuration permet à l'opérateur de limiter le nombre de traits de scies par houppier et d'ajuster « à vue » selon les besoins de chargement. Ainsi, malgré des pièces de forme et taille hétéroclites, le foisonnement est suffisamment diminué pour augmenter la charge transportée. Avec un caisson compacteur plutôt qu'un panier standard avec ranchers, la productivité est encore plus importante.

Cependant le travail à réaliser avec la grue et le grappin use davantage le porteur sur le plan mécanique, notamment lorsqu'il faut rapprocher des houppiers de plusieurs tonnes en limite de portée de grue. Il conviendrait de suivre dans le temps le vieillissement de ce matériel, en particulier les éléments liés à la grue.

Le système à 2 engins (pelle mécanique avec grappin scie et porteur) permet de dissocier les opérations dans le temps, ce qui peut s'avérer intéressant quand les conditions de portance se dégradent. Mais il est nettement moins efficace en termes de temps de traitement total par tonne, et d'un point de vue économique. Les coûts techniques de ce système peuvent s'approcher du prix de marché du bois énergie bord de route, aussi **il semble difficile de dégager une marge pour les différents acteurs concernés, sauf si le client est prêt à prendre en charge le surcoût** (prix de prestation majoré).

L'allongement des longueurs à 7 – 8 m, et par conséquent la diminution du nombre de traits de scie, est une piste à étudier pour l'amélioration de la productivité, en tenant compte des conséquences sur l'activité du porteur, notamment l'impact sur le taux de charge.

RECOMMANDATIONS PRATIQUES POUR UNE MÉCANISATION INTÉGRALE DU TRAITEMENT DES HOUPPIERS DES GROS BOIS FEUILLUS

Erwin Ulrich

ONF - Pôle RDI de Fontainebleau-Compiègne

Philippe Ruch

FCBA – Équipe Approvisionnement Bois

Didier Pischedda

ONF – Département Commercial Bois

Maryse Bigot

ONF – Département Commercial Bois

Emmanuel Cacot

FCBA - Équipe Approvisionnement Bois

L'objectif de cet article est de récapituler de manière synthétique les « bonnes idées » et les enseignements les plus utiles détaillés dans les articles précédents de ce dossier.

Entre-axe des cloisonnements d'exploitation

Pour le traitement mécanisé des houppiers comme pour les autres opérations d'exploitation, **l'entre-axe optimum est de 18 m**, conformément à ce qu'indiquent la note de service ONF sur les cloisonnements (ONF, 2009) et le guide PRATIC 'SOLS (Pischedda et Hélou, coord., 2017).

Il faut choisir un type d'engin qui puisse permettre de travailler les houppiers sans sortir du cloisonnement. Les engins disposant d'une grue puissante d'une longueur de 10 m sont à privilégier.

Choix du système d'exploitation et de l'outil de coupe

Pour une meilleure productivité, **privilégiez le système à un engin** : un porteur équipé d'un grappin scie.

Utilisez un grand grappin scie puissant capable de couper sans problème des bois de 75 cm de diamètre. Cet outil permet à la fois de couper et de charger/décharger les produits. Actuellement il n'existe pas d'autre outil « léger » présentant cette polyvalence tout en ayant une bonne puissance pour des diamètres > 50 cm. Cependant le grappin-scie ne permet pas de faire des longueurs strictement définies et ne permet pas non plus d'ébrancher soigneusement, ce qui limite les débouchés potentiels en BI, qui a davantage besoin de longueurs fixes. Il s'agit d'un engin à privilégier pour le bois énergie destiné à être déchiqueté en plaquettes forestières.

Sur les chantiers tests d'exploitation des houppiers, la productivité d'un porteur équipé d'un grappin scie puissant va de 9,7 à 17,8 tonnes par heure machine productive en fonction du type de coupe (coupe d'amélioration ou coupe de régénération, secondaire ou définitive), de la capacité de chargement et du taux de charge, de la distance de débardage, du prélèvement par hectare, etc.

Le système à deux engins est à réserver à des situations problématiques (voir plus bas). Il permet d'utiliser éventuellement le « croque souche » en lieu et place du grappin scie, car cet outil nécessite peu d'entretien ; mais la manipulation des produits est malaisée.

Comment traiter les menus bois ?

Le temps passé à les découper trop minutieusement impacte fortement et négativement la productivité totale du chantier : ne faites donc pas d'arrangement excessif des rémanents qui doivent rester sur la coupe. En cas de prescription particulière pour préserver la fertilité des sols pauvres, il faudrait prévoir un supplément de rémunération (à intégrer dans les marchés de prestations...) pour compenser cette pénalisation de la productivité des engins.

Sur les chantiers tests, le traitement des rémanents représente de 7 à 21 % du temps de travail.

Décisions à prendre sur les produits

Limitez-vous autant que possible au façonnage d'**un seul produit, de longueur bien choisie**.

En principe, le meilleur produit pour ce type de système totalement mécanisé est le bois énergie (BE) destiné à la fabrication de plaquettes forestières, mais d'autres types de produits sont parfois possibles, notamment si les branches sont assez droites et suffisamment étoffées : rondins, de 2 à 4 m généralement, pour la fabrication de bûches ou les industries de trituration. Il faut choisir une longueur de produit qui permette de réduire le foisonnement, afin d'améliorer le taux de charge du porteur, tout en évitant de générer une démultiplication du nombre de traits de scie qui pénaliserait fortement la productivité.

Dans le cas où il y aurait deux produits, il est préférable de les débarder ensemble dans le même panier et les trier sur place de dépôt (ou bord de route), pour ne pas multiplier les allers-retours et pour minimiser à la fois le coût et les impacts au sol.

Places de dépôt

Comme pour tous les autres chantiers, les longues distances de débardage réduisent la productivité et augmentent la fréquence des trajets sur certains cloisonnements d'exploitation ou cloisonnement principaux.

Installez, si possible, au moins deux places de dépôt diamétralement opposées.

Avantages de ces systèmes mécanisés pour la santé des intervenants

Les systèmes testés permettent de travailler dans les régions infestées par la **processionnaire du chêne**, en mettant les opérateurs à l'abri des poils urticants dans les cabines climatisées et dont l'air est filtré à l'entrée. Les poils urticants ne rentrent donc pas. Par contre, un nettoyage journalier des filtres ou, mieux, le remplacement journalier par des filtres neufs (pour éviter le contact avec les poils lors du nettoyage) est nécessaire pour s'assurer de leur efficacité.

Il est aussi possible d'ajouter dans la cabine une turbine spéciale qui aspire et filtre l'air extérieur (filtres très fins) et qui entretient une légère surpression. Ce système exige cependant que la cabine soit quasi parfaitement étanche.

Le **risque d'accident** et la pénibilité sont par ailleurs fortement diminués, car tout le travail se fait à partir d'une cabine.

Technologies adaptées à ce type de récolte

Un **caisson compacteur** permet de réduire beaucoup le foisonnement et par conséquent d'utiliser au mieux la capacité du porteur (charge utile). Avec le caisson compacteur les taux de charge observés sur les chantiers test sont de 84 à 119 %, contre 55 % pour des ranchers classiques. Cela permet d'améliorer fortement la productivité tout en ménageant le sol des cloisonnements par diminution du nombre de trajets.

L'utilisation du **peson** (voir encadré du 2^{ème} article) permet de connaître précisément, au fur et à mesure des déchargements, les masses brutes débardées : informations utiles pour gérer les stocks, la logistique et la facturation intermédiaire ou les acomptes (ce qui est prévu aux Clause Générales d'Achat de prestations de services forestiers).

Et si le sol est humide, que faire ?

Le système à deux engins, une pelle équipée d'un grappin scie (ou autre outil de coupe) et un porteur, du fait d'une efficacité plus faible et de coûts techniques trop importants, est à réserver aux situations très problématiques en terme de portance du sol durant une grande partie de l'année : elle permet en effet de dissocier la préparation des houppiers et le débardage. Les houppiers peuvent être traités pendant les périodes à sol humides (sauf sols très humides ou saturés d'eau), puis débardés dès que les conditions de sols le permettent. Cela permet d'employer la pelle quasiment à temps plein pendant toute l'année. Mais il faut avoir organisé l'exploitation de façon qu'elle puisse rester sur le cloisonnement et éviter tout tassement dans les bandes boisées.

Pour les porteurs : ne circuler que sur sol portant, sinon mettre des tracks marais (travail en plaine et collines) dès le départ du chantier. Pour la procédure de décision sur le démarrage, le maintien ou l'arrêt d'un chantier en lien avec la portance du sol, consultez les recommandations du guide PRATIC'SOLS (Pischedda et Hérou, coord., 2017). Ce guide traite de cette question bien en amont du début imminent d'un chantier.



E. Ulrich, ONF



Références bibliographiques du dossier

Burban J., 2012. *La mécanisation de la récolte des houppiers de gros feuillus*. Mémoire de fin d'études, 20^e promotion 2009-2012. Formation des Ingénieurs forestiers d'AgroParisTech-ENGREF, 69 p. + annexes

Longuetaud F., Mothe F., Santenoise P., Desplanches P., Colin A., Deleuze C., 2013. *Le coefficient d'expansion pour réduire différents volumes de branches à partir de volumes de tige*. Rendez-Vous Techniques de l'ONF n° 39-40, pp. 48-59

OIML (Organisation internationale de métrologie légale), 2006. *Automatic catchwatching instruments – Part 1 : metrological and technical requirements – tests, erratum* (2010.08.09), OIML R 51-1, 81 p.

ONF, 2009. Note de service 09-T-297 - *Travaux sylvicoles ou d'exploitation et protection des sols*. 8 p. + annexe

Pischedda D., 2010. *L'étude des chantiers en exploitation forestière - Méthodes et protocoles*. Rendez-Vous techniques de l'ONF n°29-30, pp. 60-70

Pischedda D., Hérou T. E. (coord.), 2017 : *PRATIC'SOLS – Guide sur la praticabilité des parcelles forestières*. Co-édition ONF-FNEDT, ISBN 978-2-84207-500-10, 44 p.
<en ligne : http://www.onf.fr/lire_voir_ecouter/++oid++5f39/@display_media.html>

Ulrich E., Pischedda D., 2015. Le projet « *mécanisation des premières éclaircies feuillus en forêt publique* » - Introduction. Rendez-vous techniques de l'ONF n° 47, pp. 12-13

Ulrich E., Pischedda D., Ruch P., Bigot M., Cacot E., 2015. *Conseils pratiques pour la réalisation des premières éclaircies mécanisées et voies d'améliorations des pratiques sylvicoles actuelles*. Rendez-vous techniques de l'ONF n° 47, pp. 49-53

PROMOUVOIR LES MATÉRIAUX BOIS DANS LA CONSTRUCTION

Damien Lauvin

apprenti ingénieur AgroParisTech,
ONF, pôle RDI de Dole

Christine Deleuze

ONF, chef du pôle RDI de Dole

Stratégie bas carbone et transition énergétique ouvrent des perspectives pour la ressource bois française... comme matériau de construction. Car au-delà de ses qualités propres, le bois peut avantageusement se substituer aux matériaux habituels, bien plus énergivores ou émetteurs de CO₂. Mais comment valoriser une ressource diversifiée dans un secteur qui exige des normes strictes et des produits homogènes ? Cet article copieux, en deux volets, présente d'abord les divers produits bois utilisés en construction, puis il analyse les difficultés à lever.

La construction bois possède beaucoup d'atouts pour répondre aux enjeux de la Stratégie nationale Bas Carbone (décret 2015-1491 de novembre 2015¹) et à l'ambition, proclamée dans le Plan Climat de la France, de la neutralité carbone à l'horizon 2050. Le matériau bois est un matériau biosourcé renouvelable ; il provient d'une ressource locale, France ou Régions, qui augmente en contenance et en disponibilité (Colin et Thivolle-Cazat, 2016) ; ce matériau permet un stockage relativement long du carbone dans les bâtiments ; mais surtout il a un effet de substitution qui permet d'éviter des rejets, en remplaçant des matériaux plus énergivores et émetteurs de gaz à effet de serre (GES) ; il est léger et souple d'utilisation, se prêtant à une mise en œuvre facile et rapide, ce qui explique d'ailleurs sa large progression en rénovation d'habitat ; il permet des usages en cascade (recyclage en trituration et énergie) ; et pour toutes ces raisons contribue efficacement à une économie plus circulaire ; enfin la construction bois ne représente aujourd'hui en France que 10 % des matériaux utilisés en construction contre 20 % en moyenne chez nos voisins scandinaves et germaniques, indiquant un potentiel important de progression (voir sur ce sujet la séance publique de l'Académie d'Agriculture animée par FCBA en mai 2017).

Si la construction et surtout ses perspectives d'évolution sont des signes positifs pour la filière, Chopard *et al.* (2013) montrent bien

que le secteur utilise actuellement une partie réduite de la ressource forestière : la ressource résineuse et plus précisément des bois de structure (principalement épicéa, sapin, douglas), de bonne qualité et plutôt de section modérée. Un déficit chronique de cette ressource particulière, compensé actuellement par des importations, pourrait donc se creuser avec l'augmentation des attentes de la filière. En 2016, Chopard *et al.* analysaient quelques pistes pour accroître l'offre, en se plaçant par ailleurs sous la contrainte des changements climatiques. La marge de manœuvre reste limitée et le temps de réponse de ces pistes est souvent de l'ordre du temps de croissance des arbres : plusieurs dizaines d'années.

Nous proposons donc d'explorer ici une autre piste prometteuse, à la fois pour la filière construction et pour le secteur forêt, dans son potentiel à valoriser plus de bois : les matériaux reconstitués à base de bois. Nous présentons en première partie différentes méthodes de reconstitution, certaines plutôt anciennes, et nous intéressons ensuite aux pistes de reconstitutions qui permettraient de valoriser plus largement notre ressource, en particulier pour les feuillus et les bois de qualité secondaire. Dans une deuxième partie nous essayons d'analyser les limites et contraintes actuelles, avec un éclairage sur des pistes d'innovation face aux fortes attentes annoncées dans ce domaine au travers de deux témoignages de nos partenaires de la recherche.

1 - UNE DIVERSITÉ DE PRODUITS RECONSTITUÉS

« Produire, mais produire mieux » : tel est le mot d'ordre de l'industrie de demain. Dans le domaine de la construction, le bois est la ressource parfaite pour répondre à cette ambition. Aujourd'hui, la société française est sensible aux matériaux estampillés « matériau bois innovant », « nouveau produit composite ». Cette première partie est un recensement des matériaux bois reconstitués en essayant de mieux saisir l'ingénierie et donc les avantages attendus. Ils sont ordonnés en fonction de l'écart

apporté au matériau bois originel : tout d'abord les matériaux où la structure interne du bois est conservée, avec le bois massif reconstitué, puis les panneaux à base de placages, enfin les matériaux où la structure du bois est modifiée (déchiquetage et fibres). À chaque fois seront présentés l'origine, le principe de fabrication et les mises en œuvre les plus communes.

¹ <https://www.ecologique-solaire.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone>

Matériaux dont la structure du bois est conservée

Reconstitution de bois massif – Le BMR, bois massif reconstitué

L'invention du bois massif reconstitué (BMR) est attribuée à un architecte allemand, Otto Hetzer. En 1890, il a eu l'idée d'obtenir une pièce de bois massif de dimension importante à partir d'éléments de section plus réduite, qu'on appelle des lames. Dans le cadre de la norme EN 14 080, le BMR doit être composé de 2 à 5 lames de bois massif de forte épaisseur, comprise entre 45 et 80 mm.

Ce produit existe sous différentes appellations. On peut le trouver sous le nom de Duo-Trio, ce qui fait directement référence au nombre de lames composant le produit (figure 1). Moyennant quelques subtilités normatives, il peut aussi s'appeler BMA, bois massif abouté, ce qui fait référence à un assemblage en long à l'aide d'entures (figure 2) et non d'un collage à plat. Aboutage et collage à plat sur la face peuvent bien sûr être combinés, en décalant les aboutages entre eux pour ne pas occasionner de zone de fragilité.

Le produit ainsi obtenu se déforme moins que du bois massif car le bois de cœur est purgé et la disposition des pièces de bois dans le BMR permet de contrebalancer les variations dimensionnelles.

Pour élaborer du BMR, il est possible d'utiliser des feuillus et des résineux. Un bois de bonne qualité (fût droit, sans singularités rédhibitoires) sera généralement privilégié, pour trois raisons : la présence d'un gros nœud dans une lame induit une zone plus fragile et dont la rupture est à craindre ; la productivité est meilleure si les lames sont grandes ; les utilisateurs sont sensibles à l'élégance du produit... selon les goûts du moment.

Mais il est difficile de trouver des chiffres fiables sur le volume de production de BMR en France. Car à côté des entreprises spécialisées dans la fabrication de ce type de produit, il y a des scieries ou autres acteurs (menuiserie, charpente) qui en fabriquent également, l'opération n'est pas technologiquement compliquée, et cette production est mal identifiée.

Reconstitution de bois massif - Le BLC, bois lamellé collé

Le bois lamellé collé a la même origine que le bois massif reconstitué car il repose exactement sur le même principe. La différence est qu'on ne parle plus de lames mais de lamelles, dont l'épaisseur est limitée (cf. norme EN 14080) à 45 mm pour les classes d'emploi 1 et 2 (milieu sec) et à 33 mm pour les classes d'emploi 3 et 4 (milieu humide) (voir l'encadré « Durabilité »). Contrairement au BMR, il n'y a pas de restriction pour le nombre de lamelles dans le produit assemblé. La section et la longueur d'une poutre en lamellé collé ne sont donc pas limitées par un cadre normatif. Théoriquement, le bois peut être collé à plat sur la face et à chant (figures 3 et 4) pour augmenter la section et l'aboutage des lamelles ce qui permet d'augmenter la longueur de la poutre à l'infini. Cependant, plus les dimensions sont importantes et plus il sera délicat de gérer les contraintes physiques telles que l'encombrement lors du transport, le poids au levage et les variations dimensionnelles.



Figure 1 : exemple de BMR de type duo



Figure 2 : aboutage à entures multiples



Figure 3 : bois lamellé collé

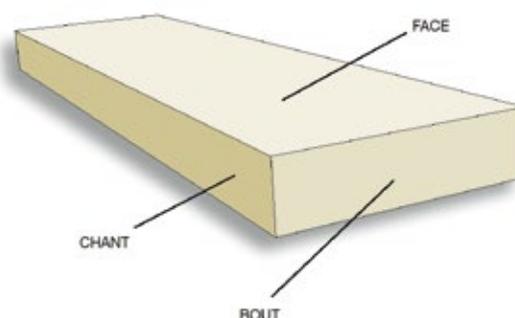


Figure 4 : face, chant et bout d'une pièce de bois

Durabilité et préservation des bois

Tous les bois n'ont pas la même durabilité naturelle ; ils n'ont pas la même résistance à l'humidité et aux dégradations biologiques dues aux insectes, bactéries et champignons. C'est pourquoi la norme NF EN 335 définit 5 classes d'emploi représentant les différentes situations en service auxquelles le bois peut être exposé (tableau). Chacune correspond à des potentialités d'attaque par différents agents biologiques d'altération des propriétés du bois (duramen seulement). En complément, l'AFNOR a édité en 2011 un guide de documentation **FD P 20-651, intitulé : « durabilité des éléments et ouvrage en bois »**.

Les bois à aubier non différencié dépassent difficilement la classe d'emploi 2. La résistance d'une pièce de bois aux attaques biologiques peut néanmoins être améliorée par un traitement de préservation. Les produits employés ont une activité insecticide, fongicide et bactéricide et peuvent donc présenter une certaine toxicité. Il existe aujourd'hui des traitements moins toxiques

mais les contraintes sont nombreuses. Pour réduire l'impact environnemental et sanitaire, on cherche par exemple à limiter au maximum les solvants organiques. Les sels hydrosolubles à base de cuivre ou de bore sont une alternative, cependant ils ont tendance à être lessivés dans la durée. Les émulsions eau-huile semblent être un bon compromis. Le traitement thermique ou l'acétylation du bois améliorent également les performances de durabilité. De nombreux travaux de recherche sont encore en cours, car la préservation du bois est un enjeu très important de promotion du matériau bois dans la construction.

Reste que la meilleure des préservations réside dans la qualité de conception et de mise en œuvre, en évitant les points faibles où l'eau peut s'accumuler ou stagner. Tous les bois de nos régions peuvent trouver leur place, si on les met en œuvre en tenant compte des propriétés de leur duramen. À ce jour, les propriétés de durabilité d'un bois comme le douglas sont largement sous utilisées.

Classe d'emploi	Conditions	Exemple	Essence (classe d'emploi maximale)
1	Milieu sec (Humidité < 20%), non exposé aux intempéries et à l'humidification	Meuble dans le salon	
2	Sous abri (Humidité < 20%), non exposé aux intempéries, humidification occasionnelle (>20%) mais non persistante	Charpente sous toiture correcte	Bouleau, Erable sycomore, Hêtre
3a	Bois extérieur et exposé aux intempéries (H>20%), pas d'accumulation d'eau	Pièces verticales disposées à l'extérieure, bardages, menuiseries	Chêne rouge, Frêne, Peuplier, Epicéa, Pin noir, Sapin, Pin radiata
3b	Bois extérieur et exposé aux intempéries (H>20%), forte humidité pendant de longues périodes, possibilité d'accumulation d'eau	Portail, bois à l'horizontal partiellement abrité	Cèdre, Douglas, Mélèze, Pin maritime, Pin sylvestre, Western Red Cedar
4	Contact direct avec le sol ou eau douce, stagnation	Bois à l'horizontal, terrasse	Châtaignier*, Chêne* pédonculé et/ou ouvre, Robinier
5	Immersion du bois en eau salée, de manière régulière ou permanente	ponton, poteaux moitié immergé	Bois tropicaux uniquement

* À condition que le bois ne soit pas placé directement au contact du sol

Classes d'emploi des bois (duramen) d'après la norme EN 335

Le bois lamellé collé présente des performances mécaniques plus intéressantes que celles du bois massif. Comme il est possible de purger les grosses singularités, la variabilité de la résistance du matériau est plus faible et les normes de calculs de structure imposent des coefficients de sécurité moins contraignants. En résumé, à résistance égale, une poutre en lamellé collé aura une section plus réduite qu'une poutre en bois massif. Il faut savoir en outre que les colles sont sélectionnées pour ne pas être un facteur limitant de la résistance. Leur capacité à être utilisées en tant qu'adhésif à usage structurel est encadrée par les normes NF EN 301, EN 15425 et EN 16 254. La qualité du collage, quant à elle, est contrôlée par la norme EN 14 080, avec des tests comme celui de la délamination (décollement des lamelles entre elles) ; lors d'un test à la rupture, celle-ci doit avoir lieu au niveau du bois et non des joints de colle. Les adhésifs les plus communément employés sont les colles mélamine urée formol (MUF), puis les colles polyuréthane (PU) et les colles phénol résorcinol formol (PRF). Elles peuvent toutes être utilisées en tant qu'adhésif structurel ; leurs différences résident dans le coût, la facilité d'application et l'esthétique éventuellement (les PRF donnent des joints de colle noirs).

La production de bois lamellé collé en France représente près de 200 000 m³ par an selon le syndicat national du bois lamellé. À ce jour elle emploie principalement du bois résineux (épicéa, sapin, douglas, mélèze, pin sylvestre, pin maritime) ainsi que le peuplier, assimilé aux résineux par les normes européennes de construction. Les producteurs de bois lamellé collé utilisent plutôt des bois de qualité que du tout-venant. Ils sont plus onéreux à l'achat mais permettent d'optimiser la ligne de production. En effet, pour les classes de résistance requises en construction, ils évitent des étapes de purge des singularités et d'aboutage qui ralentissent fortement la cadence. Ce constat illustre la pression existante sur les bois de qualité et le désintérêt pour les gros bois de qualité secondaire.

La production de lamellé collé en bois de feuillu est actuellement anecdotique, limitée à une niche haut de gamme. Cependant, avec la dynamique du « plan feuillu »² quelques initiatives industrielles se mettent en place afin de valoriser du bois de hêtre ou de chêne de qualité secondaire. Il est donc probable que, dans les années à venir, les produits de type lamellé collé feuillu fassent leur apparition sur le marché.

L'emploi de BLC en structure n'est pas une lubie écologique mais une réponse efficace à une contrainte technique. Grâce à une bonne rigidité et une faible densité, le bois est idéal pour l'élaboration de poutres à longues portées. C'est donc une solution technique particulièrement appropriée pour la conception de bâtiments, tels que les gymnases ou les piscines, dont les piliers ne peuvent pas être rapprochés. De très nombreux bâtiments logistiques ont une charpente en lamellé collé ; cela démontre pleinement la viabilité économique et la compétitivité de l'emploi de ce matériau. Enfin, plusieurs bâtiments prestigieux ont une structure en BLC comme la fondation Louis Vuitton à Paris ou encore le centre George Pompidou de Metz livrés respectivement en 2014 et 2010.

Fabrication de panneaux de bois massif – Le CLT, lamellé croisé

Le lamellé croisé ou *cross laminated timber* (CLT) est un panneau de bois massif constitué de plusieurs couches croisées à 90° les unes par rapport aux autres (figure 5). Chaque couche est elle-même composée de lamelles de 6 à 60 mm d'épaisseur et de 40 à 300 mm de largeur. Le panneau final présente une épaisseur de 60 à 500 mm, une largeur de 1,2 à 4,8 m et une longueur qui peut aller jusqu'à 18 m.



Figure 5 : panneau lamellé croisé

Ce produit a été inventé en 1947 par l'ingénieur français Pierre Gauthier. Oublié pendant quelques années, il est réapparu en Autriche dans les années 90. C'est pourquoi, par abus de langage, on l'emploie souvent sous le nom de KLH qui correspond au nom du principal producteur autrichien et européen.

La norme NF EN 16 351 définit les exigences de performances et de fabrication du bois lamellé croisé utilisable en structure. Globalement, on utilise les mêmes colles, les mêmes essences et qualité de bois que pour la fabrication de BLC. On retrouve donc majoritairement du sapin ou de l'épicéa de bonne qualité mais pas encore de feuillus pour l'instant. Cependant, certaines entreprises comme LineaZen³ se sont lancées dans le développement de produits CLT en hêtre, grâce à une appréciation technique (ATEX) délivrée début 2016 par le Centre scientifique et technique du bâtiment ; une sorte d'autorisation ponctuelle de mise en marché (voir la 2^e partie). Des produits à base de chêne sont aussi en cours de développement ; l'école des arts et métiers de Cluny, par exemple, travaille actuellement sur la fabrication de panneaux à base de chêne de qualité secondaire.

Le CLT présente de nombreux avantages qui sont mis en valeur lors de la pose sur chantier. Ce matériau peut être aussi bien utilisé en tant que mur, plancher ou support de toiture. Il est très facile d'y faire des ouvertures pour les futures portes et fenêtres, lesquelles peuvent être usinées à l'atelier. Ainsi sur le chantier, il suffit d'assembler les différents panneaux entre eux pour obtenir l'enveloppe extérieure du bâtiment en un temps record. Le CLT s'est donc déjà imposé dans la conception de nouveaux bâtis. Il s'en est, par exemple, vendu près de 40 000 m³ en France en 2013 (CLT France).

² Il s'agit du Programme d'actions collectives pour la valorisation des feuillus dans la construction (2014-2017), porté par l'interprofession à la suite du rapport FCBA publié en 2011 sur les perspectives de valorisation de la ressource de bois feuillus en France. Il repose à la fois sur de la R&D et du transfert en normalisation.

³ La société a fermé ses portes en juillet 2017, trois ans après son implantation. Le délai d'attente pour son agrément technique aurait été particulièrement pénalisant.

À Saint-Dié les Vosges, un immeuble de type R+7 (RdC + 7 étages) tout en CLT a été livré en 2014. C'est actuellement le plus haut bâtiment bois de France. Il atteint également un excellent niveau de performance énergétique. De plus, l'immeuble a été construit pour un bailleur social. Son faible coût de fabrication permet au constructeur de conserver une rentabilité économique suffisante.

D'autres projets de très grande ampleur ont déjà été réalisés en CLT. L'éco-quartier Quai de la Borde à Ris-Orangis accueille ainsi un immeuble R+4, avec une surface de plancher de 8 800 m², qui a été livré par le promoteur Woodeum après seulement 13 mois de construction. Ainsi, les limites du bois n'ont pas fini d'être repoussées. Dans le cadre de l'opération Euratlantique à Bordeaux, Woodeum et Eiffage ont engagé la construction d'une tour de 18 étages pour une hauteur de 57 m qui devrait être achevée fin 2019.

Fabrication de panneaux de bois massif – Le LVL ou lamibois

Le lamibois, plus couramment appelé LVL (*Laminated Veneer Lumber*) est un millefeuille de fines lamelles appelées placage, collées de façon parallèle. Pour comprendre le principe du matériau, il faut s'intéresser à son procédé de fabrication. Dans un premier temps, on déroule une grume en la faisant tourner le long d'un couteau : on obtient une feuille de bois plutôt épaisse, entre 3 et 6 mm. Cette feuille est ensuite coupée en tronçons, que l'on colle les uns sur les autres en conservant l'orientation des fibres. Quelques feuilles peuvent être orientées à 90° afin d'améliorer la rigidité et la stabilité dimensionnelle du matériau. La proportion de feuilles croisées dépasse rarement 20 %. Avec cet empilement, les nœuds sont dilués dans la masse et répartis aléatoirement. Le matériau obtenu est plus homogène et admet un coefficient de sécurité partiel plus avantageux que le bois massif ou le lamellé collé.

Le LVL a été inventé en Amérique du nord en 1933 par la *Douglas Fir Plywood Association*, pour valoriser les gros douglas indépendamment de leur qualité. Le concept a donc été importé par les pays d'Europe du Nord. Dans un premier temps, le procédé a été appliqué pour de l'épicéa. Toutefois, depuis 2014, le scieur allemand Pollmeier commercialise un LVL à base de hêtre : « le Baubuche ». Le bois déroulé donne un aspect très élégant mais le choix des colles peut l'altérer. En effet, les colles à base de résorcinol ont tendance à noircir au niveau du joint. L'utilisation de hêtre est extrêmement intéressante tant on connaît sa difficulté de commercialisation depuis 1999. Il se produit en Europe plus de 200 000 m³ de LVL par an.



Figure 6 : Lamibois

Le LVL est directement mis en œuvre pour des murs, des planchers ou des supports de toiture, sachant qu'il est possible de scier les panneaux dans le sens de la longueur afin d'obtenir des poutres (figure 6). Avec un seul procédé de fabrication permettant une grande diversité de produits, le lamibois justifie son titre de produit d'ingénierie bois.

Fabrication de panneaux de bois massif – Le contreplaqué

Le contreplaqué est un ensemble de feuilles de placage qui sont collées à la perpendiculaire les unes par rapport aux autres (figure 7). Comme pour le LVL, ces feuilles sont issues du déroulage d'une grume, mais elles sont généralement bien plus fines (entre 1 et 3 mm). Comme le LVL, le contreplaqué est un matériau de construction mais on le retrouve surtout dans l'ameublement et l'agencement intérieur.



Figure 7 : panneau de contreplaqué

L'origine du contreplaqué remonte à l'Égypte antique. La légèreté et la grande stabilité dimensionnelle sont les principaux atouts de ce matériau. Il peut être fabriqué avec tout type d'essence mais nécessite des grumes de bonne qualité, sans singularités : les feuilles sans nœuds déroulées dans le bois périphérique sont placées à l'extérieur du panneau, pour un aspect soigné ; celles plus proches du cœur sont placées au centre du panneau. En France, il a été produit environ 250 000 m³ de contreplaqué en 2015. Ce marché est globalement en stagnation. D'autres matériaux viennent s'y substituer avec un coût de fabrication moins onéreux.

Il existe une grande diversité de produits contreplaqués. Selon l'essence et le type de colle, il est possible de fabriquer des produits ayant une grande résistance à l'humidité, comme le très réputé contreplaqué qualité marine (figure 8). De même il est possible de créer des contreplaqués souples (figure 9) : il suffit de ne pas croiser les feuilles et d'orienter toutes les fibres dans la même direction comme dans du LVL... Ce qui contredit la définition initiale du contreplaqué et montre à quel point il est délicat de placer une frontière précise entre le contreplaqué et le LVL.



Figure 8 : contreplaqué qualité marine

Figure 9 : contreplaqué souple

Matériaux dont la structure du bois est modifiée

Matériaux à base de copeaux – Le panneau de particules

Comme son nom l'indique, un panneau de particules est formé de particules de bois de l'ordre de 3 mm (et de sciures) encollées entre elles (figure 10). Pour cela le bois est broyé et réduit en particules qui sont enduites de colle. Une couche de granulométrie grossière est placée entre deux couches de granulométrie plus fine puis l'ensemble est pressé.



Figure 10 : panneau de particules

Les colles généralement employées sont de type mélamine urée formol (MUF) et urée formol (UF). Les panneaux peuvent être fabriqués avec tout type de bois. On utilise donc des bois de médiocre qualité de même que du bois de récupération (dans une certaine proportion), et on obtient ainsi un matériau avec des coûts de production extrêmement faibles. C'est d'ailleurs comme ça que les Allemands ont inventé le panneau de particules lors la seconde guerre mondiale afin de le substituer en partie au contreplaqué. Moins cher et plus léger, il est employé dès que les contraintes mécaniques ne sont pas trop exigeantes.

Une fois fabriqué, il est possible de le garder brut ou de venir presser une feuille de mélamine imprimée des coloris et motifs souhaités. Les produits sont variés mais la différenciation ne s'opère qu'à la fin de la ligne de production. Les panneaux de particules sont très utilisés en ameublement, il s'en produit chaque année en France un peu moins de 4 000 000 m³.

Matériaux à base de copeaux - L'OSB

L'OSB (*Oriented Strand Board*) est un panneau de particules dont les propriétés et usages très particuliers justifient une présentation séparée. Comme précédemment, le bois est déchiqueté avant que les copeaux soient encollés, mais les copeaux sont plus gros, moins réguliers et sont orientés selon la direction longitudinale du panneau (figure 11).



Figure 11 : panneau OSB

L'OSB est apparu aux États-Unis dans les années 70. En France, une seule usine produit de l'OSB, elle appartient à Swiss Krono et produit à elle seule près de 400 000 m³ par an. L'usine s'approvisionne en bois rond de bouleau, de pin et de douglas et utilise exclusivement de la colle mélamine urée formol (MUF).

L'OSB est abondamment utilisé en construction bois. Il sert notamment de contreventement dans le principe constructif du mur à ossature bois (figure 12). L'orientation de ses copeaux offre une résistance mécanique très intéressante pour un matériau économique. Les murs à ossature bois peuvent être préfabriqués à l'atelier avant d'être assemblés sur le chantier. Le gain de temps considérable sur la phase de chantier, par rapport à une construction béton traditionnelle, fait du mur à ossature bois une solution économiquement compétitive.

Signalons aussi l'existence du *Waferboard*, panneau dont les particules ne sont pas orientées dans la direction longitudinale. Ses propriétés mécaniques sont plus homogènes dans le plan mais moins importantes dans la direction de travail. Son utilisation est donc anecdotique aux États-Unis et nulle en France.



Figure 12 : mur ossature-bois avec panneaux d'OSB

Matériaux à base de fibres : panneaux MDF, LDF, HDF

Le MDF (*medium density fibreboard*) est un panneau formé de fibres de bois agglomérées avec de la colle (figure 13). Dans un premier temps, le bois est broyé et défibré avec de la vapeur d'eau sous pression et à très haute température. Une fois séparées, les fibres sont encollées avec une colle de type mélamine urée formol (MUF) et pressées pour former le panneau final. À cette étape, il est possible de jouer sur la masse volumique du matériau, qui peut varier entre 400 et 900 kg/m³. Si la densité est plutôt faible, on parlera de LDF (*low density fibreboard*) ; si elle est élevée, on parlera plutôt de HDF (*high density fibreboard*). Dans tous les cas, le principe de fabrication reste le même.



Figure 13 : panneau MDF

Le panneau de fibres a été inventé aux États-Unis en 1966. Techniquement, il peut être fabriqué aussi bien avec du bois résineux que du feuillu. Il permet de valoriser les bois de première éclaircie ou de faible qualité car c'est la fibre qui est intéressante.

Le MDF est un matériau très homogène et isotrope. Il a les mêmes propriétés mécaniques dans toutes les directions car les fibres sont disposées en désordre dans le panneau. C'est un produit plus économique que le bois massif. Généralement plus dense, il se travaille mieux que le panneau de particules et admet un chargement plus important. Il peut être laissé brut, agréable au toucher grâce à sa texture très fine, ou agrémenté d'une feuille de mélamine selon les goûts. Enfin, le MDF se travaille particulièrement bien car il ne se fend pas, ne se déforme pas, se scie nettement et peut être verni facilement. Toutes ces qualités justifient ses utilisations en ameublement et agencement. C'est une solution technique très prisée et plus d'un million de mètres cubes ont été produits en France en 2015.

Première conclusion

Le bois brut est un matériau anisotrope, il n'a pas les mêmes propriétés mécaniques dans toutes les directions. Il est notamment plus résistant lorsqu'on le sollicite longitudinalement que transversalement. L'ingénierie bois s'est emparée de ces propriétés physiques et modernise les usages traditionnels du bois. Le bois massif reconstitué et le bois lamellé collé optimisent le système de construction poteaux-poutres et surpassent même les limites du bois massif. Le mur à ossature bois est la version actuelle du principe constructif à colombage avec par exemple de l'OSB en remplissage. Le CLT et le LVL sont mis en œuvre afin d'obtenir des parois pleines. Ils concurrencent directement les parpaings. Enfin les panneaux de particules, contreplaqués ou de fibres présentent de grandes surfaces planes que des sciages de bois ne peuvent pas offrir. Ils se distinguent par des densités, des propriétés physiques et des coûts qui les rendent optimaux pour des usages spécifiques.

Tous ces matériaux reconstitués ont la même ressource initiale et ont évolué progressivement dans des directions différentes afin de mieux répondre à des besoins techniques diversifiés. L'histoire des matériaux bois a amené une explosion de produits qui forment une continuité en constante évolution. C'est pourquoi il peut être difficile de trouver des définitions précises pour pouvoir les décrire. On peut néanmoins retenir que leurs inventeurs ont joué sur la nature du bois et l'orientation des fibres (cf. tableau 1).

Nature des éléments de bois	Fibres disposées parallèlement	Fibres croisées ou mélangées
Lames ou Lamelles	BLC - BMR	CLT
Placages	LVL	Contreplaqué
Copeaux et particules	OSB	Panneau de particules
Fibres		LDF/MDF/HDF

Tableau 1 : Proposition de classification des matériaux composites bois

Finalement ces méthodes de reconstitution de bois permettent, surtout lorsque l'on est proche du bois massif (lames et lamelles), de purger les défauts les plus rédhibitoires et de les distribuer de manière plus homogène, pour éviter des zones de fragilité du matériau, ce qui permet théoriquement de valoriser des bois de qualité secondaire. Cependant les industriels privilégient des bois de bonne de qualité, qui répondent aux normes de fabrication des produits de structure les plus prisés en construction et qui, plus généralement, améliorent les rendements.

2 - DES DIFFICULTÉS ET DES LIMITES

La première partie de ce diptyque a présenté les nombreux matériaux bois et produits innovants actuels. Il en ressort que le bois peut être une véritable solution technique sous réserve de compétitivité économique. Aujourd'hui, la construction à structure bois représente près de 10 % de la construction en France, et on espère que cette proportion va augmenter dans les prochaines années. Cependant, il existe de nombreux freins au développement de matériaux bois innovants (par leur conception ou leur composition). C'est ce qui est mis en évidence dans cette seconde partie. Par ailleurs, en conquérant de nouvelles parts de marché, les matériaux bois peuvent être exposés à de multiples critiques notamment sur les aspects sanitaires et environnementaux. Nous proposons donc une réflexion approfondie autour de ces différents impacts.

Mise sur le marché de nouveaux produits bois

Importance de la caractérisation du bois brut

La caractérisation technique du bois et des matériaux dérivés est indispensable à la réalisation d'une construction en bois. Lors de la phase de conception, le maître d'œuvre choisit les matériaux et détermine leurs dimensions, en cherchant à optimiser les sections des éléments de structure pour minimiser les coûts de construction. À cette fin, il doit maîtriser parfaitement les règles de calcul des Eurocodes (normes européennes de conception, dimensionnement et justification des structures en génie civil) et DTU (documents techniques unifiés).

Cependant pour pouvoir appliquer ces règles, il faut connaître précisément les valeurs de résistance des produits que l'on met en œuvre. À cette fin, le règlement européen des produits de construction (RPC) impose depuis 2012 que les produits bois destinés à la construction fassent l'objet d'un marquage CE. Ce marquage est en quelque sorte une attestation de performance en conformité avec les normes européennes en vigueur. Si le produit n'atteint pas le niveau de performance marquée, il ne sera pas conforme et la responsabilité incombera au fabricant en cas de sinistre.

Or, le bois est un matériau qui présente une grande variabilité. La résistance d'une pièce de bois peut varier dans une échelle de 1 à 10. Pour caractériser les sciages, les scieurs disposent de méthodes de classement visuel ou par machine respectivement cadrées par les normes NF B 52-001-1 et EN 14 081 1-4. Faute de pouvoir mesurer directement la résistance du matériau, ces méthodes reposent sur des critères statistiquement éprouvés, pour une évaluation indirecte exprimée en classes de résistance normalisées. Par exemple, si un avivé sapin est classé C24, il résistera à 24 MPa en flexion, 14,5 MPa en traction axiale et 21 MPa en compression axiale. Le maître d'œuvre utilise ces valeurs pour effectuer ses calculs de structure.

Au 20^e siècle, les bois feuillus de qualité étaient absorbés par les secteurs de la menuiserie, de l'ameublement et, pour le chêne, par le merrain. Les efforts de caractérisation pour placer du bois en construction ont donc porté sur les bois de résineux. Ainsi, les critères des classes de bois résineux sont issus de longues années d'expérience et de nombreuses campagnes d'essais en rupture. Les résultats sont donc particulièrement précis. En revanche, pour les feuillus, les travaux de caractérisation n'ont été entrepris que tardivement car les marchés traditionnels des feuillus (ameublement, menuiserie...) ne nécessitaient pas ce type de démarche. En conséquence, les efforts actuels en matière de R&D, encouragés par les industriels, visent à compléter un cadre normatif actuel encore assez lacunaire. De plus, il s'avère que la variabilité des caractéristiques mécaniques des bois feuillus est plus grande que celle des résineux, de sorte que les valeurs de résistance correspondant aux critères de classement sont « prudentes ».

Depuis l'effondrement des débouchés traditionnels des feuillus, concurrencés par d'autres matériaux (panneaux de particules ou MDF pour l'ameublement, PVC ou aluminium pour les menuiseries, béton pour les traverses), l'enjeu de valorisation des feuillus incite les industriels à solliciter les instituts techniques pour mieux caractériser les avivés feuillus (sur la base de campagnes d'essais très lourdes) de façon à les rendre plus attractifs dans le secteur du bâtiment. C'est un des enjeux du « plan feuillus » qui s'est attaché à caractériser finement le hêtre, le châtaignier et certains cultivars de peupliers, à la suite des travaux réalisés sur le chêne.

Importance de la caractérisation des produits bois reconstitués

Le décalage entre résineux et feuillus, déjà important sur bois massif, est encore accentué pour les produits reconstitués. Par exemple, quand ils sont à base de résineux, le BLC, le LVL et le CLT sont des produits facilement utilisables en construction grâce à l'expérience accumulée et surtout à un cadrage normatif spécifique. On distingue ainsi deux types de produits, les produits traditionnels et les produits non traditionnels.

Pour les produits traditionnels ou maîtrisés, on a du recul. On en connaît les propriétés mécaniques : elles sont normées et attestées par le marquage CE. On dispose également d'outils d'aide à la mise en œuvre, avec les Eurocodes et les DTU⁴. L'ensemble du réceptacle normatif (voir l'encadré « Normes ») est disponible pour que leur utilisation se fasse dans les meilleures conditions. C'est typiquement le cas de notre avivé en C24. Il est très rapide de calculer une structure avec ce type de produit. Si l'on respecte les Eurocodes, il est peu probable qu'un sinistre survienne. Pour les matériaux reconstitués, toutefois, les fabricants doivent faire preuve de ténacité pour caractériser au mieux leurs produits. Les fabricants de lamellé collé ont réussi à faire valoir dans la norme qu'un bois lamellé collé GL24h, fabriqué uniquement avec du bois C24, a de meilleures performances que le matériau brut. L'explication technique réside dans la dispersion des défauts dans la masse.

⁴ Historiquement, les DTU (documents techniques unifiés) résultent de l'unification des cahiers des charges, clauses et spécifications techniques imposés dans les marchés de travaux. Dans les années 90, ils ont été intégrés au système normatif officiel français, dans le cadre de l'harmonisation technique européenne (Eurocodes). Les DTU deviennent donc progressivement des normes, selon les procédures réglementaires ad hoc.

Normes et emploi de matériaux en construction

La conception et la connaissance des matériaux sont les prérequis indispensables à la construction d'un bâtiment. Lors de la conception, on imagine l'édifice en fonction des besoins des commanditaires et des conditions géoclimatiques. À la fin de cette étape, on choisit les solutions techniques qui répondent au mieux aux contraintes et besoins. Les choix du concepteur sont encadrés par des normes européennes et françaises de calculs de structure. Ces dernières s'appuient directement sur d'autres normes faisant référence à la connaissance (caractérisation) des produits.

• Caractérisation normative des produits de construction :

La réglementation européenne impose que tout produit de construction soit couvert par une norme. Contrairement à ce que son nom suggère, le marquage CE n'indique pas l'origine du produit mais atteste la conformité à un niveau de performance déclaré par le fabricant. Ces derniers s'appuient sur les normes européennes, ainsi que sur les annexes nationales qui sont généralement plus exigeantes. Par exemple, lorsqu'un scieur vend du bois de qualité C24 (résineux) ou D24 (feuillus), il garantit le niveau de résistance indiqué dans la norme EN 338 (bois de structure) : le nombre 24 correspond à une résistance caractéristique en flexion de 24 MPa. De même, chaque produit traditionnel dispose de sa norme : norme EN 14 080 pour le BMR et lamellé collé de résineux, EN 14 279 pour le LVL résineux, EN 16 351 pour le CLT résineux, EN 12 369-1 pour l'OSB. Les normes relatives au BMR, lamellé collé et CLT s'appuient sur la classification EN 338 du bois qui entre dans la fabrication. Ainsi un lamellé collé doit être fabriqué avec du bois dûment classé C24 pour porter la codification GL24 corrélée à sa classe de résistance ; pour le CLT, le fabricant indique la classe de bois de chacune des couches constituant le panneau.

Toutes ces normes sont parfois révisées comme ce fut le cas de l'EN 338 en juillet 2016 où certains niveaux de performances ont été rehaussés.

• Calcul de structure avec des produits normalisés :

Les normes européennes de construction sont rassemblées en familles que l'on appelle Eurocodes. Ces normes européennes sont ensuite adaptées dans chaque pays par le biais d'une annexe nationale.

L'Eurocode 5 s'applique aux structures en bois. On y trouve toutes les formules de détermination de la résistance d'une pièce de bois pour un usage commun. L'équation suivante présente la méthode générale pour passer d'une résistance caractéristique à une résistance équivalente à la contrainte maximale admissible dans les conditions de mise en œuvre. On utilise une formule de ce type lorsque l'on fait travailler un élément droit, en compression, traction ou flexion.

$$f_d = \frac{k_{mod} \times f_k}{\gamma_M}$$

f_d : résistance en conditions de mise en œuvre
 k_{mod} : coefficient relatif à la durée de l'action
 γ_M : coefficient de sécurité relative au matériau

Dans cette équation, la résistance caractéristique est multipliée par un coefficient k_{mod} relatif à la durée de l'action. Il matérialise la fatigue du matériau en minorant sa résistance lorsqu'il est sujet à un effort qui dure longtemps. De même, un coefficient γ_M vient diminuer la contrainte maximale que l'on s'autorise à appliquer sur l'élément de structure. Ce coefficient est de 1,3 pour le bois massif, 1,25 pour le BLC, 1,2 pour le LVL et 1,1 pour l'acier. C'est une sécurité contre la variabilité du matériau.

Les normes caractérisant les produits et les règles de calculs forment un **réceptacle réglementaire** favorable à la commercialisation et à la mise en œuvre. Cependant pour les nouveaux produits, le réceptacle est incomplet, inadéquat : la difficulté peut être levée, mais les démarches sont longues, complexes et à la charge du fabricant.

De même, si les fabricants justifient d'une maîtrise des procédés de fabrication, ils peuvent faire diminuer la valeur du coefficient de sécurité du matériau, utilisé dans les calculs de structure. Ce coefficient, noté γ_{M_r} , est utilisé afin de se prémunir contre la variabilité intrinsèque du matériau. Il est fixé par la réglementation européenne et de façon arbitraire. L'enjeu de cette démarche est d'améliorer directement les performances reconnues du matériau. Cela se répercute sur les sections employées et induit des économies de matière ; le produit en question devient alors plus compétitif.

Les produits non traditionnels, quant à eux, ne sont pas pris en compte par les Eurocodes ou DTU. Faute de caractérisation (normalisée), les produits nouveaux que l'on destine à la construction ne disposent pas non plus de marquage CE. C'est par exemple le cas des BLC et CLT à base de feuillus. À section égale, ils sont plus lourds mais également plus résistants que les produits résineux. S'il est envisageable de leur trouver de nouveaux emplois, ils ne peuvent pas forcément être utilisés comme leurs alter ego résineux. Le concepteur du bâtiment est alors dans l'embarras s'il souhaite les mettre en œuvre, car il ne dispose pas de règles de calcul pour en déterminer la fonction et les sections optimales. De plus, il lui est difficile de prédire le comportement, face à des contraintes instantanées ou à long terme, de tous les composés entrant dans la fabrication du produit, comme les colles. Lorsque l'on ne dispose pas de modèle et qu'aucune campagne d'essais en rupture ou de durée de vie n'a eu lieu, on ne sait pas si la rupture peut se produire dans le bois ou au niveau d'un joint de colle. Le réceptacle normatif n'étant pas encore disponible, fabricant et maître d'œuvre doivent trouver d'autres moyens pour parvenir à l'utilisation d'un matériau innovant.

Démarches exigeantes...

Cependant, le déficit de bois de résineux, la morosité du marché du hêtre et plus généralement la nécessité d'utiliser des bois locaux, incitent les industriels à se pencher sur la confection de ce type de produits. Il existe différents moyens pour concevoir et commercialiser ces nouveaux produits en dépit des lacunes de la réglementation européenne, avec l'aide du CSTB (centre scientifique et technique du bâtiment) : le Pass'Innovation, l'Appréciation Technique d'Expérimentation et l'Avis Technique, par ordre croissant de « maturité ». Ces trois dispositifs favorisent une expérimentation grandeur nature et des campagnes d'essais. L'objectif est de caractériser le produit pour permettre sa mise en œuvre. On passe donc progressivement d'un produit innovant, non maîtrisé à un produit sur lequel on a davantage de recul et qui peut, *in fine*, intégrer le réceptacle normatif.

Le Pass'Innovation est une première possibilité. Cela permet au fabricant d'obtenir une évaluation rapide du produit en cours de développement. Le CSTB fait une étude analytique de la solution technique proposée sans réaliser de campagne d'essai. Il y a trois niveaux de résultat : feu vert (risque maîtrisé), feu orange (risque « réservé », à vérifier), feu rouge (risque non maîtrisé). Les produits et procédés bénéficiant d'un Pass'Innovation « vert » sont reconnus comme des techniques courantes par les assureurs. Un feu orange n'empêche pas la mise en œuvre du procédé mais l'assurance sera plus chère. Le Pass'Innovation est délivré pour une durée de deux ans non renouvelable. Cette période doit permettre de mettre en place un retour d'expérience, qui peut donner lieu à une

analyse plus poussée, afin d'établir ensuite un Avis Technique. Enfin, un Pass'Innovation « vert » est public et n'est pas la propriété du demandeur.

L'Appréciation Technique d'Expérimentation (ATEX) est une alternative au Pass'Innovation. Un dossier technique est établi par l'industriel et il est examiné par le CSTB. L'appréciation rendue peut être favorable, réservée ou défavorable. Tout comme le Pass'Innovation, l'ATEX ne donne pas lieu à des essais, mais elle apporte à l'assureur davantage de garanties. Elle n'est pas limitée dans le temps, mais ne vaut que pour un nombre de chantiers défini, sachant qu'il est possible de la dupliquer en cas de chantiers similaires. Cela reste donc une disposition transitoire, mais qui permet d'acquérir un retour d'expérience plus important sur la solution technique. Le rapport d'ATEX est la propriété de l'industriel.

L'Avis Technique, enfin, permet d'employer un produit non traditionnel comme s'il en était un. Son objectif est de justifier que le produit est apte à l'emploi dans la construction et qu'il répond à la réglementation en vigueur. Un dossier technique est réalisé sous l'égide du CSTB, qui instruit la demande et la présente au groupe d'experts ad hoc de la Commission chargée de formuler des avis techniques (CCFAT ; commission placée auprès du ministre chargé de la construction et de l'habitation). Bien souvent, il est nécessaire d'avoir recours à une campagne d'essais, démarche onéreuse à la charge des entreprises. Le résultat de l'instruction peut être défavorable, réservé ou favorable, auquel cas l'Avis Technique est délivré pour une durée de 2 à 7 ans, selon le retour d'expérience acquis. Son statut est public, il peut donc être utilisé par d'autres entreprises que celle qui l'a financé. L'industriel doit donc accompagner son avis technique de brevets, s'il souhaite jouir de la propriété intellectuelle.

...et investissements conséquents

Outre les barrières réglementaires, le poids des investissements est un frein au développement des nouveaux matériaux à base de bois. En effet, pour être compétitif sur le marché, il faut pouvoir produire des volumes non négligeables à une cadence élevée. Il est donc nécessaire de disposer d'une ligne de production avec des technologies performantes. Cela passe par des investissements considérables. Le groupe STEICO, par exemple, a investi en 2015 près de 60 millions d'euros pour monter deux lignes de production de LVL en Pologne, avec un objectif de production de 80 000 m³. Ce chiffre est énorme lorsqu'on sait que la consommation annuelle de LVL en Europe est inférieure à 300 000 m³. Même si le marché est en pleine expansion, le risque pris par STEICO est très important.

Un investissement de cette ampleur n'est réalisable que par des groupes de grande envergure. Or la filière bois en France est très fragmentée et seuls les plus gros industriels peuvent investir plusieurs millions d'euros dans une nouvelle ligne de production. La difficulté de financement des projets risque ainsi de limiter la création de lignes de production de LVL (la France a perdu l'essentiel de son outil de déroulage depuis la crise du hêtre) ; c'est d'autant plus regrettable que le LVL offre un débouché pour les bois de qualité secondaire. En revanche, les projets tels que la fabrication de bois lamellé collé à base de chêne devraient être réalisables. Les campagnes de fabrication de BLC de chêne menées chez Simonin dans le cadre du projet EU HARDWOODS montrent qu'une ligne de production de BLC résineux ne nécessiterait que quelques réglages et modifications mineurs pour faire du lamellé collé de chêne.

Impact environnemental et sanitaire des produits bois

Bilan carbone des produits composites bois

Les produits à base de bois jouissent d'une image de produits naturels et respectueux de l'environnement auprès des consommateurs. Ce sont généralement les individus les plus soucieux d'écologie qui optent pour ce matériau. Un des principaux arguments en faveur du bois dans la construction est de prolonger la séquestration du CO₂ puisé dans l'atmosphère. De plus, si le bois est issu d'une forêt gérée durablement, elle sera capable de capter de nouveau du CO₂ pour se régénérer. Mais ceci repose sur une approche très qualitative et il est nécessaire de comparer des chiffres et des facteurs environnementaux pour faire ressortir le côté « vertueux » des matériaux bois par rapport à d'autres matériaux de construction, comme le béton armé par exemple. Jusqu'à quel point les processus de fabrication pénalisent-ils les bilans énergétiques et environnementaux des matériaux composites bois ?

Pour pouvoir comparer le bilan des différents matériaux, il faut une méthode juste et équitable. L'analyse du cycle de vie (ACV) est généralement considérée comme une méthode satisfaisant à ces critères. Elle suppose d'abord de définir une unité fonctionnelle correctement délimitée, en déterminant les indicateurs environnementaux pertinents à calculer, tels que les émissions de CO₂ ou la consommation d'énergie grise. Ces indicateurs devront être calculés pour chaque étape du cycle de vie du matériau. Si on prend l'exemple d'une poutre de bois lamellé collé, les grandes étapes sont : la production de la poutre, la construction du bâtiment avec la poutre, l'utilisation du bâtiment et le recyclage en fin de vie. Il faut partir de l'arbre pour aller jusqu'à l'étape de recyclage.

La base de données INIES, base nationale de référence sur les caractéristiques environnementales et sanitaires pour le bâtiment, regroupe depuis 2004 un ensemble de données environnementales sur les matériaux de construction. Les données de la base sont consultables gratuitement et sont implémentées par le ministère de l'environnement, des instituts technologiques ou

directement par des entreprises. C'est à ce niveau que se révèlent les limites de la méthode : selon les intérêts de l'acteur à l'initiative de l'ACV, les résultats peuvent être extrêmement différents tout en satisfaisant à la norme ISO 14 040 (qui régit les règles de l'ACV). Prenons l'exemple de la fabrication du béton. Schématiquement, l'unité fonctionnelle du mètre cube de béton fabriqué peut se définir de deux façons. On peut considérer qu'il suffit de mélanger le sable, le ciment, les fibres et l'eau, avec une dépense d'énergie et des rejets de CO₂ vraiment faibles. Ou bien on estime que l'unité fonctionnelle inclut les matières premières, c'est-à-dire notamment l'extraction du calcaire et sa cuisson à plus de 1400°C (qui rejette beaucoup de CO₂), et les résultats de l'ACV en sont radicalement changés.

Difficile, dans ces conditions, de comparer les indicateurs environnementaux d'INIES pour différents types de matériaux (tableau 2). En ce qui concerne les matériaux bois, il faut tout de même observer (données FCBA) que plus le bois qu'ils contiennent est « décomposé » (décheté, défibré...) plus ils sont gourmands en énergie primaire. De même, la fabrication de contreplaqué consomme beaucoup d'énergie car un effort très important s'exerce sur le couteau lors du déroulage. Mais la comparaison directe avec des matériaux concurrents est hasardeuse et déroutante. D'après les données renseignées par le ministère de l'Environnement (pour s'en tenir à une instance publique), la fabrication d'une dalle de béton, par exemple, ne rejeterait pas plus de CO₂ et consommerait beaucoup moins d'énergie primaire que celle des matériaux bois à volume équivalent... Au-delà des réserves méthodologiques déjà signalées, il faudrait pouvoir rapporter ces bilans non pas au m³ de matériau produit mais à fonction équivalente (fondation, structure, sol, mur...). En Pologne, Pajchrowski *et al.* (2014) ont fait un exercice de cet ordre en comparant deux constructions complètes, l'une en matériaux traditionnels et l'autre en bois et composites bois. La seconde présente en l'occurrence des bilans énergie et carbone bien plus favorables, l'avantage du bois résidant pour une part non négligeable dans le transport (matériau local), la mise en œuvre (matériau léger), et le recyclage final (récupération des résidus de construction en bois énergie)... même en tenant compte de fréquents traitements de protection indispensables pour le bois.

Matériaux	BLC	CLT	OSB 16mm	MDF 7.5mm	PP 18.5mm	Contreplaqué 18mm	Béton 30 cm
Organisme déclarant	FCBA	Ministère de l'environnement	FCBA	FCBA	FCBA	FCBA	Ministère de l'environnement
Unité fonctionnelle	1m ³	1m ³	1m ³	1m ³	1m ³	1m ³	1m ³
Durée de vie	100 ans	50 ans	100 ans	50 ans	50 ans	50 ans	100 ans
Émissions équivalent CO ₂ (kg CO ₂ eq)	84.5	720	354	381	175	295	376
Énergie primaire totale* (MJ)	9280	7 660	19 875	29 865	17 216	22 174	4284

* L'énergie primaire est la première forme d'énergie directement disponible dans la nature avant toute transformation : énergie éolienne ou hydraulique, rayonnement solaire, combustibles fossiles, biomasse, uranium, etc. Ne pas confondre avec l'énergie finale transformée dans les centrales et délivrée aux utilisateurs (électricité, carburant). On parle ici d'énergie primaire totale car on cumule l'énergie mobilisée par toute la chaîne de production, l'usage et le recyclage du matériau.

Tableau 2 : Essai de comparaison de données environnementales extraites de la BD INIES pour différents types de matériaux – Illustration des difficultés

Ce tableau ne peut pas être lu comme un bilan comparatif des divers matériaux : les organismes déclarants respectent les mêmes normes ISO pour les analyses de cycle de vie, mais des différences de méthodologie (conception du cycle...) sont possibles ; or dans la BD INIES, les informations à la base des calculs ne sont pas systématiquement accessibles ou actualisées. De plus, le choix du m³ comme unité fonctionnelle, comparaison oblige, est discutable car le volume requis pour une même fonction diffère selon les matériaux.

Gardons en tout cas à l'esprit que la réputation « vertueuse » de la construction bois est confrontée à des études comparatives d'impacts environnementaux dont le caractère équitable ne va pas forcément de soi.

Émissions des composés chimiques des produits reconstitués

Après récolte, les bois sont sciés en première transformation. Cependant, ces produits de première transformation ne correspondent pas aux diverses exigences du marché. Les produits d'ingénierie présentés précédemment répondent mieux aux besoins. Mais la fabrication de ces produits plus complexes suppose de lier des planches, des particules ou des fibres. Cet assemblage se fait quasi systématiquement par l'ajout d'additifs chimiques tels que les colles, solution moins coûteuse, plus rapide à appliquer et plus polyvalente que la quincaillerie mécanique.

Les colles les plus couramment utilisées sur le marché sont les colles de type UF (urée formol) ou MUF (mélamine urée formol) pour les panneaux de particules et le MDF. Le contreplaqué utilise aussi bien le type de colle MUF ainsi que des colles PF (Phénol formol), tandis que la fabrication de l'OSB se fait plutôt avec des colles PMDI (isocyanates). Pour les assemblages structurels, les colles MUF et PU (polyuréthane) supplantent aujourd'hui les colles PRF (phénol résorcinol formol) ou RF (résorcinol formol). En menuiserie, on utilisera les colles UF, MUF et PVAc (vinyliques). Le dénominateur commun de tous ces adhésifs est la présence de composés organiques volatils (COV) et plus particulièrement de formaldéhyde. Les produits d'ingénierie bois présentent une forte concentration de COV car l'encollage dans un panneau de particules ou MDF est abondant.

De même, il est possible de traiter le bois pour améliorer sa durabilité une fois mis en place. On peut ainsi améliorer sa résistance aux attaques fongiques ou d'insectes, mais également sa résistance au feu. Divers composés chimiques peuvent être ajoutés dans l'épaisseur ou en surface. Le bois n'est pas systématiquement traité mais, lorsqu'il l'est, il peut émettre des COV une fois mis en œuvre. Les peintures, les laques et les vernis sont également susceptibles d'émettre des COV.

Les COV sont des molécules qui se retrouvent très facilement sous forme gazeuse à température ambiante. Ils sont composés d'atomes de carbone, d'hydrogène, d'halogènes, d'oxygène, de soufre, de phosphore, de silice

et d'azote et ont une incidence plus ou moins directe sur l'environnement ou la santé des individus. À l'intérieur d'un bâtiment, la concentration en COV peut augmenter rapidement si les émissions sont importantes et l'aération insuffisante. Les COV peuvent entraîner des irritations oculaires ou respiratoires, des nausées, des troubles neurologiques, des vertiges, de l'asthme, de l'eczéma et même des cancers. Les COV sont donc toxiques, tout dépend de leur concentration.

Le bois brut émet naturellement des COV. Lorsqu'il est fraîchement coupé, l'oxydation des terpènes (contenus dans la résine) et du carbone hydrogéné forme spontanément du formaldéhyde. Le taux et la nature des COV varient selon les essences mais, dans tous les cas, les émissions diminuent rapidement une fois que le bois est à l'air libre : deux semaines après l'abattage, elles sont déjà réduites de 50 %. Pour les matériaux d'ingénierie bois, leurs normes respectives de caractérisation renvoient à deux classes d'émissions en formaldéhyde, E1 et E2. La valeur d'émission au bout d'un temps défini (cf. norme EN 717 sur la mesure des dégagements de formaldéhyde) est inférieure à 0,124 mg/m³ d'air pour les produits classés E1 et supérieure pour les produits E2. Cela permet de mettre en évidence les matériaux qui génèrent le plus d'émissions. Toutefois, les « bons élèves » ne sont pas suffisamment mis en valeur.



Le gouvernement français a rendu obligatoire l'étiquetage des produits de construction ou de revêtement de mur ou de sol, les peintures et les vernis (figure 14).

Figure 14: étiquette émission dans l'air intérieur

Cette étiquette renvoie à des niveaux d'émission de composés organiques volatils définis par l'arrêté du 19 avril 2011 et récapitulés dans le tableau 3. Cela permet aux consommateurs de comparer les différents produits, et incite donc indirectement les industriels à diminuer les composés organiques volatils dans leurs produits.

Cependant, ces valeurs ne s'appliquent qu'à chaque produit considéré isolément. Par conséquent, on peut très bien observer une qualité de l'air moyenne dans un environnement ne comportant que des produits classés A+. À ce jour, il n'existe aucune norme encadrant la qualité de l'air

Classes	C	B	A	A+
Formaldéhyde	>120 µg/m ³	<120 µg/m ³	<60 µg/m ³	<10 µg/m ³
Acétaldéhyde	>400 µg/m ³	<400 µg/m ³	<300 µg/m ³	<200 µg/m ³
Toluène	>600 µg/m ³	<600 µg/m ³	<450 µg/m ³	<300 µg/m ³
Tétrachloroéthylène	>500 µg/m ³	<500 µg/m ³	<350 µg/m ³	<250 µg/m ³
Xylène	>400 µg/m ³	<400 µg/m ³	<300 µg/m ³	<200 µg/m ³
1,2,4-Triméthylbenzène	>2000 µg/m ³	<2000 µg/m ³	<1500 µg/m ³	<1000 µg/m ³
1,4-Dichlorobenzène	>120 µg/m ³	<120 µg/m ³	<90 µg/m ³	<60 µg/m ³
Ethylbenzène	>1500 µg/m ³	<1500 µg/m ³	<1000 µg/m ³	<750 µg/m ³
2-Butoxyéthanol	>2000 µg/m ³	<2000 µg/m ³	<1500 µg/m ³	<1000 µg/m ³
Styrène	>500 µg/m ³	<500 µg/m ³	<350 µg/m ³	<250 µg/m ³
COVT	>2000 µg/m ³	<2000 µg/m ³	<1500 µg/m ³	<1000 µg/m ³

Tableau 3 : classes d'émission de composés organiques volatils (ref = arrêté du 19 avril 2011)

Substance mesurée	Valeur Repère VR ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Valeur d'action immédiate VAI ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Benzène	2 si supérieur à mesure de l'air extérieur	10
Ozone	110 si supérieur à mesure de l'air extérieur	240 (maximum horaire sur 3 heures consécutives)
Tétrachloroéthylène	250	1250
Formaldéhyde	30	100
Toluène	-	300
Xylène	-	200
Triméthylbenzène	-	1000
1,4-Dichlorobenzène	-	100
Ethylbenzène	-	1000
n-Butylacétate	-	5000
2-Butoxyéthanol	-	1000
Styrène	-	250

Tableau 4 : valeurs repères et d'action immédiate, guide de la gestion de la QAI

intérieur, que ce soit pour les bâtiments publics ou privés. Le ministère de la santé et des sports a rédigé en 2010 un guide de la gestion de la qualité de l'air intérieur pour les établissements recevant du public (ERP). Ce guide indique comment mettre en place une démarche d'amélioration continue de la qualité de l'air intérieur du bâtiment et que faire en cas de mauvaise qualité de l'air. Il fixe pour cela des valeurs seuils pour 12 composés chimiques : une valeur repère (VR) et une valeur d'action immédiate (VAI) (voir tableau 4).

Pour une substance donnée, la valeur repère VR indique une bonne qualité de l'air si elle n'est pas dépassée ; mais cela ne dispense pas d'une démarche d'amélioration continue. Si la concentration en polluant se trouve entre la VR et la VAI, le guide préconise des mesures rapides et évidentes telles que l'aération systématique par ouverture des fenêtres, la maintenance du système de chauffage ventilation climatisation, etc. Si la concentration dépasse la VAI, la situation est critique et la mise en place d'un diagnostic plus approfondi est nécessaire afin d'identifier les sources de polluants.

Le décret n° 2011-1728 du 2 décembre 2011 relatif à la surveillance de la qualité de l'air intérieur dans certains établissements recevant du public exige la mise en place d'une surveillance périodique, au maximum tous les 7 ans, de la qualité de l'air intérieur. Le texte est entré en vigueur le 1er janvier 2015 pour les établissements accueillant des enfants de moins de 6 ans et s'étendra progressivement à tous les établissements recevant du public à compter du 1er janvier 2023. Si le décret rend obligatoire les audits de la qualité de l'air intérieur, aucune valeur réglementaire n'existe pour le moment. Le guide pratique de la gestion de la qualité de l'air intérieur peut être pris comme référence car il est très probable, au vu des risques sanitaires, que des normes soient rédigées dans les années à venir. Elles pourraient s'appuyer sur ce type de document dans un premier temps avant de devenir plus contraignantes.

Tous les matériaux bois s'insèrent donc dans une démarche globale de l'amélioration de la qualité de l'air intérieur. Les fabricants de matériaux d'ingénierie bois font déjà des efforts dans ce sens. Afin de diminuer les émanations de formaldéhyde, ils privilégient couramment les colles MUF par rapport aux colles UF : la mélamine a pour effet de mieux fixer le formaldéhyde à l'urée. Selon le même principe, des travaux sur l'ajout

de tanins dans les colles de type PF sont en cours afin de diminuer la proportion de phénol synthétique (Pizzi, 2016). Quant à trouver une alternative aux colles... le soudage du bois par friction n'est encore qu'une technique expérimentale. En tout cas, les contraintes normatives poussent régulièrement les industriels à réduire l'impact sanitaire et environnemental de leurs produits.

Conclusion

Développer un produit bois innovant est un travail de longue haleine. Nombreux sont les obstacles à surmonter. On a vu que les questions de normes et caractérisation de la qualité des produits sont très importantes dans l'ensemble de la chaîne et pour le potentiel d'utilisation des bois de qualité « ordinaire » (lire aussi à ce sujet les interviews de Morgan Vuillermoz et Robert Collet pages 54 et 55). Mais l'intégration d'un nouveau produit au réceptacle normatif est une étape longue et difficile qui nécessite le soutien d'instituts techniques tels que FCBA et le CSTB. Dans le même temps, une étude de la faisabilité du projet est indispensable car les investissements seront considérables. La création d'une ligne de production suppose des volumes de fabrication importants ; il faut donc avoir bien appréhendé les parts de marché potentielles et la ressource disponible pour y répondre.

Lorsqu'un produit devient compétitif, la conquête de parts de marché se fait au détriment d'autres matériaux. Ses faiblesses ne manqueront pas d'être soulignées par les concurrents du secteur. Or les matériaux reconstitués bois utilisent des quantités importantes de colles et parfois même des produits de préservation, susceptibles d'émanations propres à susciter des inquiétudes pour la santé des consommateurs, même si elles sont maîtrisées et contrôlées. Cependant la législation sur la qualité de l'air intérieur est en cours d'élaboration et permettra de dissiper les incertitudes pour les produits performants. Les acteurs de la filière doivent tout de même chercher à améliorer continuellement leurs produits pour qu'ils restent attractifs d'un point de vue économique et écologique. Enfin, les producteurs de matériaux bois doivent faire preuve de transparence quant à leur impact sur l'environnement. Les indicateurs environnementaux étant assez subjectifs et difficiles à vérifier, le maintien d'une image écologique auprès du grand public exige une communication irréprochable autour de ces matériaux.

Ce tour d'horizon des matériaux reconstitués montre des pistes possibles de progression dans la valorisation de nos bois feuillus et bois de qualité secondaire (feuillus ou gros résineux). Les difficultés restent cependant nombreuses dans la mise au point de matériaux innovants, leur qualification et normalisation, et enfin leur adéquation aux normes environnementales. Avec les process plus complexes, le matériau gagne en résistance pour répondre aux exigences de la construction mais perd en bilan carbone, énergie et environnemental.

Remerciements

Les auteurs remercient tous les acteurs ayant aidé à écrire cet article :

- **Morgan VUILLERMOZ** (Ingénieure Étude et Recherche à FCBA) et **Robert COLLET** (Enseignant-chercheur à l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers – Campus de Cluny) pour avoir partagé leurs connaissances par l'intermédiaire d'interviews.
- **André RICHTER** (FCBA), **Didier REULING** (FCBA), **Guillaume LEGRAND** (FCBA), **Jean-Denis LANVIN** (FCBA) et **Morgan VUILLERMOZ** (FCBA) pour avoir réalisé une relecture active et apporté des informations techniques.
- Le corps enseignant de l'École Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois pour les informations dispensées au sein de la formation ingénierie dont l'auteur est issu.

Références

Académie d'Agriculture, séance du 31 mai 2017, « *Le bois dans la construction, moteur du secteur forêt-bois* » animée par Georges-Henri Florentin, directeur général du FCBA. <http://www.academie-agriculture.fr/actualites/academie/seance/academie/le-bois-dans-la-construction-moteur-du-secteur-foret-bois>

Briand E. (coord.), 2010. *Guide de gestion de la qualité de l'air intérieur dans les établissements recevant du public*. Paris: Ministère chargé de la Santé / INVS, 78 p. <en ligne : <http://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/guid0910.pdf>>

Chopard B., François D., Deleuze C., 2013. *Comprendre l'évolution de la demande de bois résineux en France pour mieux l'intégrer dans la gestion forestière*. *Rendez-Vous Techniques*, ONF, n° 39-40, p 7-30.

Chopard B., Riou-Nivert P., François D., Deleuze C., 2016. *Gestion des résineux et demande industrielle : le regard de la R&D*. Ateliers REGEFOR 2015. *Les innovations dans les usages du bois interpellent la gestion forestière*, Revue Forestière Française, vol. 68, pp. 173-184

Colin A., Thivolle-Cazat A., 2016. *Disponibilités forestières pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035*. Rapport de l'étude financée avec les soutiens de l'ADEME (convention 13-60-C0007), de l'IGN et de COPACEL. 91 p+ annexes. <en ligne : <http://www.ademe.fr/disponibilites-forestieres-lenergie-materiaux-a-lhorizon-2035>>

CSTB (consultation novembre 2017). *Comparaison point par point : Avis Technique, Appréciation Technique d'Expérimentation, Pass' Innovation*. <en ligne : <http://evaluation.cstb.fr/fr/evaluations/>>

FCBA, 2016. *Mémento*. <en ligne : <http://www.fcba.fr/sites/default/files/files/Memento.pdf>>

Lanvin J.D., Reuling D., 2017. *Caractérisation du hêtre pour une utilisation structurelle répondant aux exigences du marquage CE*. FCBA INFO (novembre 2017). <en ligne : <http://www.fcba.fr/fcbainfo?tid=All> >

Legrand G., Vuillermoz M., *Productions prototypes de bois lamellé collé en chêne français* : enseignements technico-économiques des campagnes EU-Hardwoods, 2017

Pajchrowski G., Noskowiak A., Lewandowska A., Strykowski W., 2014. *Wood as a building material in the light of environmental assessment of full life cycle of four buildings*. *Construction and Building Materials* 52 (février 2014): 428-36. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.11.066.

Pizzi A., 2016. *Wood products and green chemistry*. *Annals of Forest Science*, vol. 73(1), pp.185-203

Questions à...

Morgan Vuillermoz

Ingénieure d'Études et Recherche à FCBA

Vous avez contribué au projet Européen EU HardWoods sur la valorisation des feuillus (European Hardwoods for the building sector) : Quelles sont les perspectives actuelles de valorisation des feuillus dans la construction, dans les nouveaux matériaux ? Quels sont les principaux points de blocage à lever ? Quelle rentabilité économique ?

“ À l’occasion du projet européen EU Hardwoods, FCBA et ses partenaires ont posé un regard technico-économique et organisationnel sur les potentiels de création de BLC homogène et panaché (mix de qualités) en chêne issu de la ressource française. Deux scénarios alternatifs aux chaînes de valeur actuelles et impliquant des degrés de changement croissants ont été éprouvés :

1. production de BLC à partir d'avivés traditionnellement proposés par les scieries de chêne, impliquant un degré de changement faible,
2. production de BLC à partir d'avivés issus de grumes sélectionnées, impliquant un degré de changement fort tant en forêt, qu'en scierie et chez le fabricant de lamellé collé.

D'un point de vue organisationnel, l'étude du premier scénario fait apparaître des pistes d'amélioration pour la mise en place progressive d'une chaîne d'approvisionnement en lamelles de chêne à destination de la production de BLC entre la scierie et le lamelliste.

Le second scénario a été encore plus riche en enseignements car son objectif était double :

- mettre en place une chaîne de valorisation de grumes spécifiquement sélectionnées depuis la forêt jusqu'à la seconde transformation, pour tirer parti des propriétés mécaniques élevées des arbres jeunes, le plus souvent issus d'éclaircies, de la chênaie française*,
- produire des BLC homogènes et panachés afin de valoriser toutes les qualités mécaniques issues de telles grumes, spécifiées principalement par leur classe de diamètre (D3), leur âge (<100 ans) et leur bonne conformation.

Les résultats démontrent que du BLC très performant peut être produit à partir de chêne français, un approvisionnement ciblé et des compositions panachées permettant une valorisation de l'ensemble du potentiel mécanique de cette essence sans faire de sur-qualité.

La faisabilité technique est donc acquise et les résultats, combinés aux autres enseignements du programme « Valorisation des feuillus dans la construction » (hêtre, châtaignier, peuplier) soutenu par France Bois Forêt, vont permettre d'établir la norme BLC feuillue avec un solide argumentaire. Néanmoins ce travail a aussi illustré les freins économiques qui restent encore à lever pour que les BLC feuillus trouvent une place adéquate sur le marché de la construction. En effet, les coûts de fabrication à l'occasion de ces productions prototypes sont de l'ordre de 3 fois ceux de la production des BLC français en épicea. Sont en jeu des notions de rendement matière et d'économie d'échelle sur lesquelles les organisations intra et inter-entreprise ont de l'influence. Le projet collaboratif EU Hardwoods a notamment permis d'évoquer des pistes au niveau des relations client – fournisseur entre lamelliste et scieur qui pourraient être améliorées sous certaines conditions :

- délai de livraison plus long et visibilité sur l'année pour le scieur,
- classement selon la résistance (méthode visuelle) par le scieur,
- acceptation de différentes qualités et longueurs par le lamelliste.

Avec le contexte normatif qui va devenir plus favorable, les changements vont pouvoir se mettre en place et seront accompagnés dans les années à venir pour que cette transition soit valorisante pour la ressource et les acteurs de la filière.

”

* JD Lanvin et D Reuling - FCBA, *Caractérisation du chêne sessile et pédonculé de France en vue de son utilisation en structure*, La Revue Forestière Française Rev. For. Fr. LXIV – 2, 2012.

Questions à...

Robert Collet

Enseignant-chercheur à l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers – Campus de Cluny

Vous participez à des travaux de recherche sur la valorisation des bois de qualité secondaire par reconstitution LVL ou CLT : Quelles sont les innovations attendues dans la caractérisation des propriétés mécaniques et la reconstitution du bois qui vont permettre de mieux valoriser des bois de qualité secondaire et par exemple des gros résineux (sapins ou douglas) ?

“ Le développement de la construction bois et son industrialisation nécessitent des matériaux avec des caractéristiques bien maîtrisées (propriétés mécaniques, taux d'humidité, stabilité dimensionnelle), ce qui limite l'emploi de bois massifs issus d'arbres de qualité secondaire. Les produits dits d'ingénierie ou techniques, fabriqués à partir de bois massifs reconstitués comme les panneaux de type CLT (bois lamellés croisés), ou de placages issus du déroulage comme les panneaux de type LVL (lamibois), offrent l'avantage de pouvoir purger les plus gros défauts et/ou de les disperser dans la masse. Cependant pour prédire et garantir les performances mécaniques de ces matériaux en bois reconstitués, celles de leurs constituants (sciages ou placages) doivent être parfaitement contrôlées.

La ressource forestière en chêne de qualité secondaire offre un potentiel très important de bois qui pourraient être valorisés en produits techniques pour les marchés de la construction et en particulier pour la fabrication de panneaux CLT. Aussi notre laboratoire mène des travaux pour trouver des solutions de classement par machine pour la résistance, adaptées en particulier au cas des sciages de chêne. La méthode de classement visuelle, seule disponible actuellement, est en effet trop « déclassante » car elle sous-estime souvent les performances mécaniques réelles des bois à plus forte nodosité. Le développement de modèles de prédiction des propriétés mécaniques à partir de données issues d'un scanner, permettant la prise en compte des singularités locales (orientations de fibres), montre que des solutions de classement par machine sont possibles avec des rendements de classement proches de l'optimum.

Concernant les gros et très gros bois résineux (sapin ou douglas) de qualité secondaire, le procédé de déroulage offre la possibilité de les valoriser en feuilles de placages destinées à la fabrication de produits techniques comme le LVL. Les résultats de travaux de modélisation sur ce thème menés par notre équipe montrent qu'il est possible d'obtenir une grande variété de qualités mécaniques de LVL en fonction des procédés de déroulage et d'assemblage des placages : il convient donc d'optimiser ces procédés pour avoir la meilleure qualité possible. Les études vont se poursuivre dans le cadre d'une thèse dont les principaux objectifs sont (1) d'optimiser les paramètres du procédé de déroulage (température et durée d'étuvage des billons, angles de coupe du couteau, réglage de la barre de pression, épaisseur des placages...) spécifiquement pour les gros bois de douglas et (2) de développer des modèles de prédiction permettant de connaître les propriétés mécaniques des panneaux LVL en fonction de la qualité des placages. Un des points essentiels sera aussi la prise en compte par les modèles des données « forêt » qui évaluent la qualité du bois selon des critères sylvicoles, dendrométriques, l'insertion des branches, la taille et leur nombre de branches, etc.

Les moyens supplémentaires pour la fabrication des produits techniques en bois reconstitués, comparativement à ceux nécessaires pour la production de bois massifs, renchérisse leur coût, mais leurs performances optimisées et mieux maîtrisées permettent pour certaines applications de les rentabiliser. Le manque prévisible dans les années à venir de bois d'œuvre résineux pour répondre aux besoins des marchés de la construction bois devrait aussi conduire à un meilleur positionnement économique des produits techniques comme le CLT produit à partir de feuillus de qualité secondaire. ”

■ Prochain numéro :

Le numéro 58 sera dédié aux actes du colloque « RENECOFOR, 25 ans de suivi des écosystèmes forestiers » qui s'est tenu à Beaune en octobre 2017.

■ Retrouvez RenDez-Vous techniques en ligne

Sur intraforêt : depuis toutes les pages d'intraforêt, cliquer sur le lien « Portail biblio » du pavé « Ressources » en colonne de gauche (ou noter, dans la barre d'adresse : <http://biblio.onf.fr>) pour arriver sur la page d'accueil du portail ; en choisissant (pavé de gauche) de faire une recherche « dans une collection ONF », puis en choisissant « Rendez-vous techniques » dans la nouvelle fenêtre, on accède à tous les articles et dossiers au format pdf.

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

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

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



Si vous désirez nous soumettre des articles

prenez contact avec :

ONF - Département recherche, développement et innovation
Christine Micheneau

