

Bois lamellé collés de feuillus de qualité secondaire : quelles optimisations pour une utilisation en structures ?

PILON Martin, BLÉRON Laurent

LERMAB, Université de Lorraine, 27 rue Philippe Séguin, 88000 Épinal, France

martin.pilon@univ-lorraine.fr

Mots clefs : construction ; feuillus ; bois lamellé-collé ; analyse économique ; rendement matière, dimensionnement

Contexte et objectifs :

La ressource en bois feuillu en Europe Occidentale et en particulier en France est abondante (IGN 2023), mais pas forcément valorisée, notamment pour des grumes dites de qualité secondaire, en produit avec une valeur ajoutée importante. Ces grumes correspondent aux catégories C ou D d'après les normes NF EN 1316-[1, 2, 3]. Une diminution des ressources de résineux dans les années à venir du fait du changement climatique (Vacek et al 2004), et des problèmes sanitaires sur certaines essences de feuillus, comme par exemple avec la chalarose du frêne, vont amener des volumes disponibles importants sur les marchés.

Du fait des défauts des grumes de qualité secondaire, principalement la présence de nœuds et des défauts de rectitude, l'utilisation en sciage massif comme bois d'œuvre semble difficile. Un des débouchés possibles de cette ressource pourrait être la fabrication de bois lamellé collé (BLC). En effet le procédé permet de purger les défauts de singularité et le billonnage en petites longueurs puis la recomposition par aboutage permet d'optimiser le rendement matière vis-à-vis des défauts de rectitude des grumes. De plus, la fabrication de BLC de feuillus nécessiterait peu d'investissements pour des nouvelles unités de production, en faisant l'hypothèse que les usines de BLC résineux puissent être utilisées également pour la fabrication de BLC feuillus, avec quelques adaptations mineures.

L'idée de BLC de feuillus n'est pas nouvelle (Aicher et al 2014) et des produits émergent sur le marché comme ceux des entreprises Fagus et Manubois. Leur développement à plus grande échelle semble limité principalement par leur coût, plus élevé que des produits à base de résineux. Une des raisons de ce coût important semble être le faible rendement matière de la transformation de la grume jusqu'à l'avivé classé (Schlotzhauer et al 2019, Torno et al 2013). Ce rendement reste à préciser du fait des différences dans les résultats de la littérature. De plus ces études sont faites avec un séchage en avivés et non en plot, alors que ce dernier semble classiquement utilisé pour des usages de feuillus en menuiserie. Via une étude sur le rendement matière, l'objectif vise à faire une analyse économique des différentes étapes de la fabrication du BLC de feuillus : pour estimer le coût de fabrication, identifier des leviers permettant de le minimiser, ainsi que de le comparer à celui du BLC de résineux.

D'un autre côté, ces essences feuillues ont pour la plupart des propriétés mécaniques supérieures aux résineux, en particulier pour les propriétés de résistances. Le second objectif est de déterminer, via une estimation du gain de matière possible en comparaison avec une solution en résineux, les utilisations optimales de solutions BLC feuillus. Ainsi une comparaison avec le surcoût du BLC de feuillus déterminé avec l'étude de rendement matière, permettra de connaître les cas d'utilisation pertinents d'un point de vue économique.

Matériel et méthodes :

Rendement matière et coût de fabrication

L'analyse de rendement matière est faite à partir d'un ensemble de grumes de hêtre (58m³), chêne (30m³) et frêne (30m³), de qualité C et D. Le choix des longueurs de billonnage est effectué suivant les défauts des grumes (rectitude et gros nœuds). Le sciage en plateau, d'épaisseurs 45mm et 60mm, est effectué avec une scie bi-coupe ayant une lame d'épaisseur d'environ 5mm. L'ensemble d'un billon est scié avec la même épaisseur de plateau. Le sciage en avivés est réalisé après séchage avec une déligneuse qui optimise entre deux largeurs de commande, une largeur principale A et une largeur secondaire B. La déligneuse choisit en fonction de la largeur du plateau les largeurs d'avivés qui génèrent le moins de perte. Une largeur de produit secondaire de 80mm a été ajoutée dans certains cas pour limiter les pertes, mais dans ce cas la déligneuse a été programmée pour empêcher de scier deux largeurs de 80mm et privilégier le sciage d'un produit principal. L'ensemble des commandes utilisées sont précisées dans le Tab. 1.

Tab. 1 : Liste des commandes utilisées pour le sciage en avivés

Commande	A	B	2 produits B	épaisseur
1	160	110	Oui	45
2	140	80	Non	45
3	160	80	Non	45
4	140	110	Oui	45
5	140	100	Oui	60

Sur l'ensemble des grumes (107), une traçabilité de la grume jusqu'aux avivés finaux est mise en place. Ainsi une numérotation est donnée pour les grumes, les billons, les plateaux puis les avivés. Pour chaque billon la longueur et deux mesures de diamètre à chaque extrémité sont relevées. Le volume du billon est obtenu via un volume de cylindre. Le diamètre du cylindre est la moyenne des deux moyennes des diamètres des deux extrémités. Le volume des avivés non classés et non rabotés est obtenu par dénombrement en connaissant leur section nominale et la longueur du billon. Le volume des avivés classés sera également obtenu de la même manière après un classement visuel. Le volume des avivés rabotés sera connu en mesurant leur longueur et en connaissant la section de commande du rabotage.

L'analyse économique sera faite en supposant un prix volumique des grumes, en connaissant le rendement matière et en supposant un coût pour chacune des opérations suivantes : billonnage, sciage en plateau, séchage, sciage en avivés, classement et rabotage.

Utilisation optimale d'éléments BLC feuillus

Pour déterminer les usages de BLC feuillus les plus économes en volume matière par rapport à des solutions BLC résineux usuelles, une étude paramétrique est réalisée sur les trois cas de dimensionnement suivants : cas de compression de type poteau, cas de traction de type tirant, cas de flexion de type poutre. Pour chacun de ces cas, le dimensionnement est effectué d'abord avec une solution en résineux classique (G124h) puis avec une solution « BLC feuillu ». Le résultat final est le ratio de volume matière entre la solution en résineux et la solution en feuillus. Les dimensionnements sont effectués selon les Eurocodes et les annexes françaises en vigueur. Les notations utilisées ci-dessous sont celles de ces normes.

Les hypothèses communes aux trois cas de dimensionnement sont les suivantes : concernant les propriétés de la solution « BLC feuillu », les valeurs fournies par le fabricant Manubois

pour du BLC de hêtre sont utilisées ici comme référence et précisées dans le Tab. 2. Le hêtre est choisi car ses propriétés mécaniques peuvent constituer une borne haute par rapport aux autres feuillus. Le coefficient partiel $\gamma_m=1,25$ est utilisé pour les deux solutions. Les facteurs de modification k_{mod} est pris égal à celui du GI24h également pour la solution BLC de feuillus. L'analyse est restreinte au cas de dimensionnement à froid à l'état limite ultime (ELU), et à l'état limite de service (ELS) pour les dimensionnements de poutre, mais uniquement avec les vérifications de type flèche.

Tab. 2 : Propriétés mécaniques utilisées – solution BLC feuillus et BLC résineux

Propriétés	GI24h	BLC de hêtre
Résistance à la flexion - $f_{m,0,k}$ [MPa]	24	36
Résistance à la traction - $f_{t,0,k}$ [MPa]	19,2	27
Résistance à la compression - $f_{c,0,k}$ [MPa]	24	50
Résistance au cisaillement - $f_{v,k}$ [MPa]	3,5	6
Module d'élasticité moyen - $E_{m,0,mean}$ [MPa]	11500	14400
Module d'élasticité caractéristique - $E_{m,0,k}$ [MPa]	9600	12900
Module de cisaillement - G_{mean} [MPa]	650	650
Masse volumique moyenne - ρ_{mean} [MPa]	420	710

Pour le cas de compression de type poteau : est considérée une barre de longueur de flambement L_{eff} , soumise à un effort normal de compression (F), de section rectangulaire et avec trois ratios largeur (b) sur hauteur (h) possibles [0.5 ; 0.75 ; 1]. La longueur de flambement L_{eff} est identique dans les deux directions ($L_{eff,y}$ égale à $L_{eff,z}$), variable et comprise entre 1 et 10m. L'effort est variable, avec le ratio F sur k_{mod} compris entre 10 et 3000kN. Un facteur de rectitude β_c de 0,1 est utilisé. Les dimensions de la section sont déterminées pour obtenir un taux de travail de 100%. L'élanement de la solution en résineux est déterminé avec la formule suivante :

$$\lambda = \frac{L_{eff}\sqrt{12}}{b}$$

Tab. 3 : Scénarios de dimensionnement pour le cas de flexion de type poutre

Scénarios	Charges [kN/m ²]					Limites flèches		Classe de service
	permanentes	exploitations	neige	vent pression	vent dépression	$w_{inst(Q)}$	$w_{net,fin}$	
1.Toiture légère	0,4	0	0,36	0,29	-0,39	L/300	L/250	2
2.Toiture lourde	2,5	0	0,36	0,29	-0,39	L/300	L/250	1
3.Plancher léger - bureau	1,2	3,5	0	0	0	L/300	L/300	1
4.Plancher lourd -résidentiel	2,4	2	0	0	0	L/300	L/300	1

Pour le cas de traction de type tirant : est considérée simplement une barre soumise à un effort normal de traction, dimensionnée à l'ELU à froid. Enfin, pour le cas de flexion de type poutre : est considérée une barre sur deux appuis avec chargement uniforme, correspondant à une bande de chargement de largeur (e). Pour essayer d'encadrer au mieux l'ensemble des cas de dimensionnement courants, quatre scénarios de charges sont choisis et précisés dans le Tab. 3. Le coefficient k_h est pris égal à 1 dans les deux cas. La vérification est faite à l'ELU en flexion

et en cisaillement. Pour le calcul des déplacements, la déformée de cisaillement est considérée, de même que le poids propre de la poutre. Le dimensionnement est réalisé d'abord pour une poutre BLC résineux avec un ratio largeur sur hauteur fixé à 0.2. Une fois les dimensions déterminées, le dimensionnement est effectué pour le cas BLC feuillu mais cette fois en fixant la largeur, égale à celle de la solution BLC résineux.

Résultats et discussion

Rendement matière

L'analyse de l'influence sur le rendement matière des paramètres suivants sera effectuée : diamètre des billons, qualité C ou D, longueur de billonnage, et sections d'avivés.

Utilisation optimale d'éléments BLC feuillu

Pour le cas de compression de type poteau, des gains de matière importants sont remarqués, surtout pour des éléments peu élancés et de section carré, comme mis en évidence par les figures Fig. 1 et 2. Au maximum un ratio de 2,1 peut être atteint pour des éléments non soumis au flambement (correspondant au ratio des $f_{c,0,k}$). Pour des sections carrées, un ratio de 1,45 est atteint pour des éléments résineux d'élancement réduit (autour de 50), correspondant par exemple à une section de 210 x 210mm pour une longueur de flambement de 3m. De plus, le gain de matière évolue selon l'élancement de la solution BLC résineux.

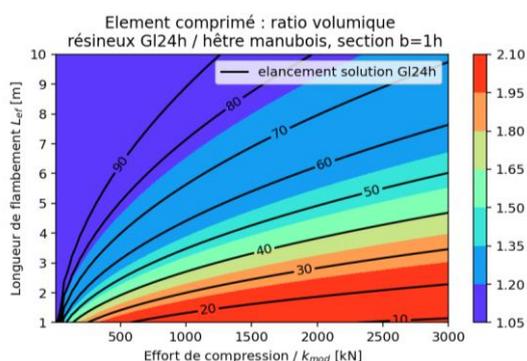


Fig. 1 : Ratio de volume matière résineux/ feuillu – poteau en compression – section carré

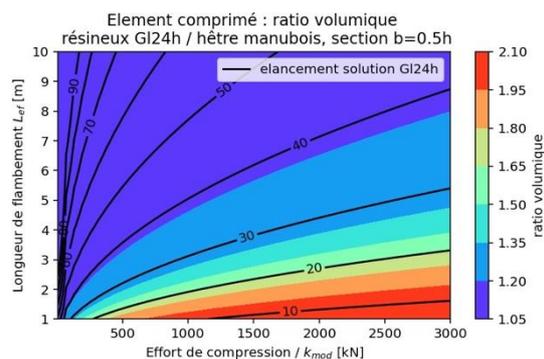


Fig. 2 : Ratio de volume matière résineux/ feuillu – poteau en compression – section b=0.5h

Pour les cas de traction de type tirant : le ratio de volume est directement égal au ratio des résistances à la traction, si on ne considère pas l'effet de la présence d'assemblages, soit un ratio de 1,4.

Pour le cas de flexion de type poutre : les résultats pour deux scénarios sont donnés avec les figures Fig. 3 et 4. Peu de gain de matière est observable, et les résultats sont assez similaires entre les différents scénarios. Dans les cas usuels de longueur et d'entraxe, le gain de matière est d'environ 1,08, correspondant logiquement à la racine cubique du ratio des modules d'Young. Les gains les plus importants sont observés pour des éléments pour lesquels l'état dimensionnant est l'ELU, c'est-à-dire une poutre avec des charges élevées (scénario 2,3 et 4) et une entraxe importante (ratio entraxe sur longueur proche de 1). Dans ce cas, un ratio de volume autour de 1,2 peut être atteint, cela correspond à des ratios hauteur sur longueur supérieurs à 0,1.

Conclusion et perspectives

D'un point de vue économique, les débouchés d'une solution « BLC feuillu » semblent être uniquement sur des éléments soumis à de l'effort normal, traction ou compression pour des

éléments peu élancés. En imaginant, par exemple, un surcoût de fabrication de 40% par rapport à un BLC résineux, ce surcoût pourrait être compensé par un gain de matière équivalent sur des poteaux de section carrée avec un élancement inférieur à 50 et sur des tirants. En revanche, il ne pourrait pas être compensé sur des poutres.

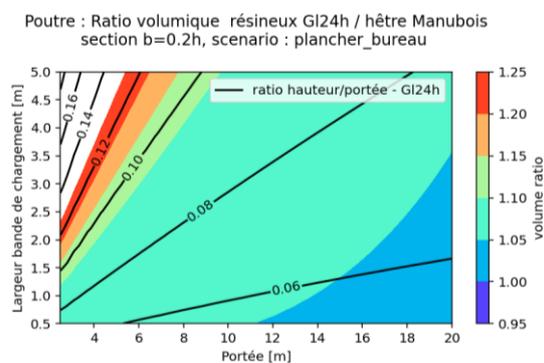


Fig. 3 : Ratio de volume matière résineux/ feuillus – poutre en flexion – scénario plancher bureau

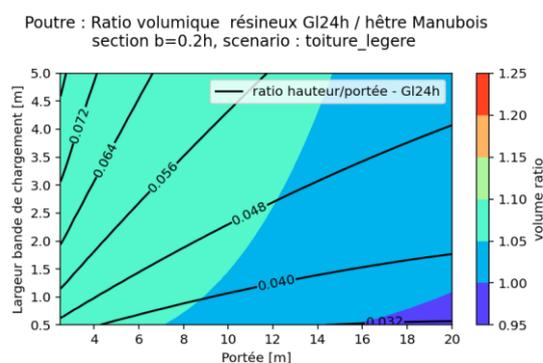


Fig. 4 : Ratio de volume matière résineux/ feuillus – poutre en flexion – scénario toiture légère

Pour optimiser les usages de BLC feuillus, il conviendrait donc de préciser en premier lieu les caractéristiques utiles pour les éléments soumis à un effort normal. Cela pourrait passer par une meilleure corrélation entre la propriété de résistance utilisée pour le classement (résistance à la flexion $f_{m,0,k}$, ou peut-être la résistance à la traction $f_{t,0,k}$ à terme) et les propriétés spécifiquement utilisées pour des éléments soumis à des efforts normaux (résistance à la traction $f_{t,0,k}$, résistance à la compression $f_{c,0,k}$ et masse volumique ρ_{k} pour la portance locale des connecteurs). De plus, il conviendrait d'optimiser les résistances des assemblages pour des éléments soumis à des efforts normaux, afin d'en diminuer le coût. Cela pourrait se faire avec une diminution du nombre de broches via une meilleure connaissance de l'influence du fretage sur la portance des broches, et sur la rupture par fendage dans un assemblage.

Remerciements

Ce projet est réalisé en collaboration avec le CRITT-bois et l'entreprise Weisrock. Il a été financé par l'Etat dans le cadre de France 2030 opéré par l'ADEME.

Références

Institut National de l'Information Géographique et Forestière (2023) Inventaire forestier national – Mémento.

Vacek Z, Vacek S, Cukor J (2023) European forests under global climate change: Review of tree growth processes, crises and management strategies, *Journal of Environmental Management*, 332.

Aicher S, Cristian, Zachary C, Dill-Langer G (2014) Hardwood Glulams – Emerging Timber Products Of Superior Mechanical Properties, *World Conference on Timber Engineering*.

Schlotzhauer P, Kovryga A, Emmerich L, Bollmus S, Van de Kuilen JW, Militz H (2019) Analysis of Economic Feasibility of Ash and Maple Lamella Production for Glued Laminated Timber, *Forest* 10, 529.

Torno S, Knorz M, Van de Kuilen JW (2013) Supply of beech lamellas for the production of glued laminated timber. *International Scientific Conference on Hardwood Processing*.