

Tronçonnage du bois de chêne basé sur la mesure de l'orientation des fibres pour garantir la résistance des aboutages

SOH MBOU Delin¹, POT Guillaume¹, VIGUIER Joffrey¹, MARCON Bertrand¹,
MILHE Louis¹, CHASTAGNIER Thibault², LOUVET Thibaut²,
LANVIN Jean-Denis³, REULING Didier³

¹ Arts et Métiers Sciences et Technologies, LaBoMaP, Rue porte de Paris, 71250 Cluny, France.

² Ducerf Groupe, Le Bourg, 71120 Vendennes-lès-Charolles, France.

³ FCBA, Allée de Boutaut BP227, 33028 Bordeaux, France.

Delin.SOH_MBOU@ensam.eu

Mots clés : Aboutages ; chêne ; orientation des fibres ; sciages ; tronçonnage.

Contexte et objectif

Contexte

L'aboutage est une technique d'assemblage de courts morceaux de bois, appelés courçons, pour former des pièces plus longues et continues. Cette méthode est particulièrement utile pour les feuillus, permettant d'extraire les imperfections au sein des planches et de reconstituer des produits structurels. Les pièces sont usinées en forme de dents, emboîtées, collées, puis pressées pour assurer une jonction solide.

Selon la norme NF EN 14080 (2013), la résistance d'un aboutage doit être assurée en comparant sa distance au nœud le plus proche et le diamètre du nœud en question : "En dehors de l'aboutage, la distance entre le bord d'un nœud et la base d'un aboutage à entures multiples ne doit pas être inférieure à trois fois le diamètre du nœud d , à moins qu'une procédure de classement approuvée ne soit utilisée et qu'il soit démontré par des essais qu'une résistance adéquate des aboutages à entures multiples est atteinte avec une plus faible distance minimale".

Objectif

L'objectif du présent travail est de définir une méthode basée uniquement sur les données d'orientation des fibres obtenues par scan des surfaces planches pour effectuer les opérations de tronçonnage, en garantissant à la fois la résistance des aboutages et celle des courçons entre les aboutages dans le cas de bois de chêne de qualité secondaire. Cette approche vise à proposer une méthode automatisée et standardisée pour assurer la résistance des aboutages qui pourrait être plus cohérente et plus efficace que la méthode visuelle actuelle en particulier pour les bois feuillus.

Matériel et Méthode

Calcul de l'orientation des fibres dans un sciage

L'échantillonnage sur lequel s'est basée cette étude est constitué de deux lots de 572 mm de longueur en moyenne. Le premier lot de de pièces de section $19.5 \times 69.5 \text{ mm}^2$ a été utilisé pour garantir une classe de résistance en traction nommée ici T11 et équivalent à D18 (classe de la norme (EN 338, 2016). Le second lot est lui de pièces de section $19.5 \times 100 \text{ mm}^2$, et a été utilisé pour garantir une classe de résistance en traction nommée ici T14 et équivalent à D24. L'objectif est l'utilisation de bois de faible largeur, à faible coût économique pour la fabrication des produits bois collés tels que les lamelles aboutées. Un scanner industriel a été utilisé pour

analyser les planches. Comme proposé par Besseau (2021), l'angle de fibre 3D a été calculé en interpolant les angles planaires mesurés sur les faces et chants d'une planche de bois.

Module élastique local basé sur l'orientation des fibres

En l'absence d'une méthode automatique et précise de différenciation entre la direction radiale et la direction tangentielle, un modèle isotrope transverse a été choisi. Le module d'élasticité longitudinal E_0 a été fixé à 95 % du percentile des résultats des essais de traction sur un lot de planches issues de la même ressource (Pot et al 2024), soit 14 620 MPa. Le choix de cette valeur rend les résultats des modules d'élasticité locaux modélisés cohérents avec les modules d'élasticité mesurés. La valeur de E_0 a néanmoins influencé les autres propriétés du matériau telles que le module d'élasticité transversal E_{90} et le module de cisaillement G_{LTrans} . En effet, E_{90} a été calculé comme la moyenne des rapports orthotropes (E_R/E_L et E_T/E_L) donnés par Kretschmann (2010) pour le chêne blanc (Tab. 1) multipliée par E_0 . G_{LTrans} , le module de cisaillement dans le plan isotrope transverse, a été calculé de manière similaire comme la moyenne des rapports orthotropes de Kretschmann (G_{LT}/E_L et G_{LR}/E_L) multipliée comme précédemment par E_0 . Le coefficient de Poisson transverse ν_{Trans} , lui a été calculé comme la moyenne des coefficients de Poisson orthotropes de Kretschmann (ν_{LT} et ν_{LR}). Le Tab. 1 résume les propriétés mécaniques utilisées. Ces propriétés permettent d'exprimer la matrice des complaisances $[S]$ dans le repère local du matériau (\vec{L}, \vec{Trans}).

Tab. 1: Propriétés mécaniques du chêne selon (Kretschmann, 2010) et propriétés mécaniques isotropes transverses simplifiées utilisées dans ce présent travail.

E_L	E_R	E_T	G_{LR}	G_{LT}	ν_{LR}	ν_{LT}
(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)		
14000	2280	1010	1200	1100	0.37	0.43
E_0	E_{90}	G_{LTrans}		ν_{LTrans}		
(MPa)	(MPa)	(MPa)				
14620	1718	1201		0.4		

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_0} & -\frac{\nu_{TransL}}{E_{90}} & 0 \\ -\frac{\nu_{LTrans}}{E_0} & \frac{1}{E_{90}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{LTrans}} \end{bmatrix}$$

Pour chaque élément de la grille d'angles interpolés γ_{xyz} , la matrice des complaisances $[S]$ a été obtenue par rotation en fonction de γ_{xyz} , afin d'obtenir la matrice des complaisances locales $[S']$ pour chaque position dans le système d'axes de l'échantillon ($\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$). Le module élastique local longitudinal (selon \vec{x}) est obtenu par inversion du premier terme de la matrice des complaisances $[S']$. La rigidité locale longitudinale moyenne a été calculée pour chaque section transversale, tous les millimètres dans la longueur. Le module élastique axial apparent, $E_{a,BT}(x)$, est calculé comme la moyenne glissante harmonique de la rigidité locale, c'est-à-dire calculé comme la raideur équivalente des ressorts en série de raideurs individuelles (Pot et al. 2024) sur une longueur choisie de 90 mm (Olsson et al 2018, Briggert et al 2018). Le module $E_{a,BT}(x)$ minimum sur le profil de chaque planche est utilisée comme indicateur de la résistance à la traction, en supposant que la résistance est corrélée à cette rigidité minimum.

Optimisation du tronçonnage des planches pour assurer la résistance des lamelles aboutées

La correspondance entre la résistance à la traction et l'indicateur de résistance à la traction utilisé a été obtenue sur la base de plus de 900 essais de sciages de bois de chêne (Pot et al 2024). Ces valeurs indicatrices de résistance exprimées ici en termes de modules élastiques

pourraient être aussi exprimées en termes d'angle moyen dans la section (Tab. 2). Des opérations de tronçonnage ont ensuite été réalisées en se basant sur cet indice pour déterminer les positions de tronçonnage optimales, assurant ainsi la résistance des morceaux de bois et des aboutages pour une classe de résistance donnée (Fig. 1).

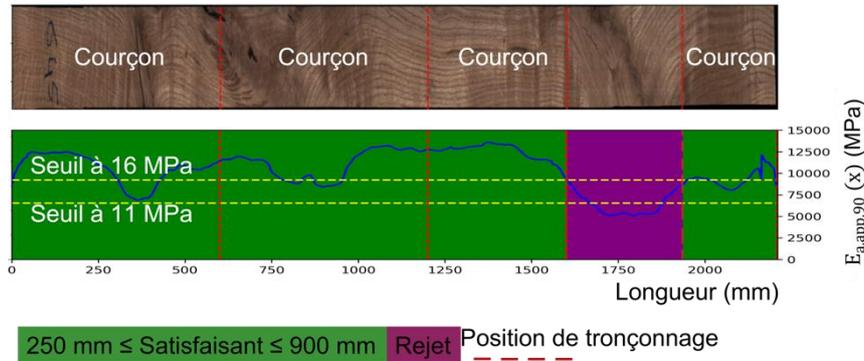


Fig. 1 : Exemple d'application de l'algorithme de tronçonnage pour une classe de résistance T11. En vert les pièces conservées et en violet les pièces rejetées

Résultats et discussions

Les courçons obtenus ont été assemblés par aboutage à entures multiples dans l'usine des bois Profilés (71), et la méthode a été validée par des essais de traction (Fig. 2, Tab 2.). Les aboutages des planches de $19.5 \times 69.5 \text{ mm}^2$ (classe T11) ont été testés à l'ENSAM de Cluny et celles de $19.5 \times 100 \text{ mm}^2$ (classe T14), à FCBA de Bordeaux.

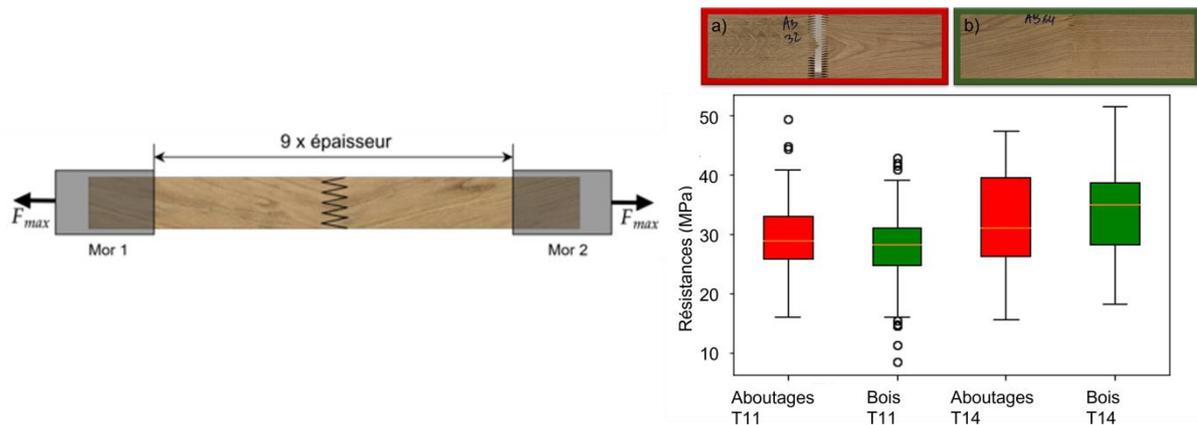


Fig. 2 : Distribution des résistances obtenues : à gauche les conditions d'essai et à droite, a) rupture dans l'aboutage ; b) rupture dans le bois

Tab. 2 : Résultats des essais de traction des aboutages

Classe	T11		T14	
	Bois	Aboutage	Bois	Aboutage
Type de rupture	Bois	Aboutage	Bois	Aboutage
Résistance caractéristique cible (MPa)	11	16	14	19
Valeur seuil de l'indicateur $E_{a,app}$ (MPa)	6.55×10^3	9.23×10^3	8.58×10^3	10.14×10^3
Angle seuil de l'indicateur (°)	21.8	14.7	16.2	12.7
Nombre d'échantillons	183		178	
	120	63	105	73
Pourcentage de la population	69%	31%	59%	41%
Résistance caractéristique (MPa)	15.6		19.4	
	14.0	20.5	21.2	18.5

Les résultats obtenus démontrent que la méthode garantit effectivement les résistances attendues pour les classes spécifiées, ce qui est un indicateur fort de son efficacité. Pour les éprouvettes de la classe T11, la résistance caractéristique obtenue est 15.6 MPa, soit 0.4 MPa en dessous du seuil, alors que pour les éprouvettes de la classe T14, la résistance caractéristique obtenue est 19.4 MPa, soit 0.4 MPa au-dessus du seuil. La différence de résistance entre les ruptures dans les entures (20.5 MPa) et celles dans le bois (14.0 MPa) est significative pour les éprouvettes T11. La faible résistance s'explique par des ruptures fréquentes dans le bois de moindre qualité, souvent trop éloignées des entures pour être considérées comme liées à la résistance des aboutages. La supériorité de la classe T14 permet d'utiliser un bois de meilleure qualité, ce qui se traduit par des pièces de bois aux caractéristiques nettement supérieures, notamment en termes de résistance, dépassant ainsi celles obtenues par aboutage.

Conclusions et perspectives

En se basant uniquement sur la mesure de l'orientation des fibres des sciages, cette méthode propose une approche innovante de gain de résistance ce qui pourrait transformer les pratiques industrielles actuelles. Des améliorations sont possibles, par exemple du fait que les profils ont été moyennés sur une longueur de 90 mm centrée, une pratique qui peut introduire des imprécisions dans la détermination des positions optimales de tronçonnage.

Des recherches supplémentaires pourraient se concentrer sur la quantification du rendement matière lors du tronçonnage, ce qui permettrait non seulement d'affiner la technique, mais aussi de démontrer sa viabilité économique dans un contexte industriel.

Remerciements

Ce projet est en collaboration avec FCBA et est soutenu financièrement par l'ADEME au travers de deux projets de recherche TreCEffiQuaS et Feuillus CHOC, dont le but est de valoriser les essences feuillues secondaires dans la construction.

Références

Besseau B (2021) Contribution au développement de procédés innovants pour une transformation plus efficiente du chêne (These de doctorat). HESAM.

Briggert A, Hu M, Olsson A, Oscarsson J (2018) Tracheid effect scanning and evaluation of in-plane and out-of-plane fibre direction in Norway spruce using. *Wood and Fiber Science* 50, 411–429.

EN 338, 2016. Structural timber — Strength classes.

Kretchmann D (2010) Mechanical Properties of Wood, in: *Wood Handbook*.

NF EN 14080 (2013) Structures en bois - Bois lamellé collé et bois massif reconstitué - Exigences.

Olsson A, Pot G, Viguier J, Faydi Y Oscarsson J (2018) Performance of strength grading methods based on fibre orientation and axial resonance frequency applied to Norway spruce (*Picea abies* L.), Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) and European oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl./*Quercus robur* L.). *Annals of Forest Science* 75, 102 p. <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0781-z>

Pot G, Viguier J, Besseau B, Lanvin J.-D, Reuling D (2024) Modelling tensile mechanical properties of oak timber from fibre orientation scanning for strength grading purpose, in: 11th Hardwood Conference. Presented at the 11th Hardwood Conference, Sopron, Hungary.