

Essai de résistance en cisaillement longitudinal pour la caractérisation de bois feuillus avec une flexion 4 points asymétrique

PILON Martin¹, LAGARRIGUE Matthieu², BLÉRON Laurent¹

¹LERMAB, Université de Lorraine, 27 rue Philippe Séguin, 88000 Épinal, France

²Ecole Centrale de Nantes, 1 rue de la Noë, 44000 Nantes, France

martin.pilon@univ-lorraine.fr

Mots clefs : feuillus, caractérisation, essais de cisaillement, construction

Contexte et objectifs

Les réserves de bois feuillus en Europe sont importantes, en particulier en France, où 70 % de la superficie forestière en est constituée. La ressource est actuellement en grande partie utilisée à des fins énergétiques comme bois énergie, ce qui ne permet pas un stockage du CO₂ sur le long terme. Cela pourrait être le cas si elle était plutôt utilisée dans la construction comme éléments structurels. Un des freins actuels est le manque de caractérisation précise de chaque essence. Par conséquent, des limites inférieures, communes à plusieurs essences, sont souvent utilisées pour les propriétés mécaniques. La connaissance de la résistance au cisaillement parallèle au fil est nécessaire pour l'utilisation structurelle des bois. Cette résistance, notée f_v , dans l'Eurocode 5, peut être estimée de manière sécuritaire à partir de la norme NF EN 384-2022 en connaissant les propriétés principales, mais des campagnes d'essais permettraient une connaissance plus fine de cette propriété, ce qui pourrait limiter les volumes utilisés et donc in fine le coût de la construction en bois feuillus.

L'essai expérimental normatif actuel pour obtenir la résistance au cisaillement longitudinal du bois est donné dans la norme NF EN 408-2012. Cet essai présente des inconvénients. Tout d'abord, en raison de l'inclinaison, une contrainte de compression perpendiculaire au fil du bois est ajoutée simultanément à la contrainte de cisaillement. Cette concomitance est connue pour augmenter la résistance au cisaillement (Zhang et al 2024, Steiger et al 2011). Deuxièmement, comme l'ont démontré Ravenshorst et al (2016), la forme et l'épaisseur des plaques d'acier jouent un rôle clé pour garantir un champ de contrainte de cisaillement homogène dans l'échantillon de bois. Pour cette raison, la norme exige des plaques d'acier plus épaisses pour tester les bois durs, sans donner plus de détails sur les dimensions précises. Enfin, le joint de colle entre l'acier et l'échantillon doit être plus résistant que la résistance du bois pour obtenir une rupture du bois par cisaillement lors de l'essai, ce qui n'est pas le cas pour certains feuillus européens, comme l'ont démontré Benistand (2019) et Van de Kuilen et al (2017).

De nombreux essais de cisaillement existants dans la littérature consistent à appliquer une contrainte de cisaillement sur une surface. Étant donné que la résistance du bois dépend du volume contraint, le cisaillement doit être appliqué de manière homogène sur un volume suffisant, en particulier pour le bois présentant des défauts. Comme la création d'un état de contrainte de cisaillement pur dans un volume est un problème difficile, la recherche de nouveaux essais de cisaillement est toujours d'actualité, en particulier pour les bois feuillus. Une autre famille d'essais de cisaillement consiste à appliquer une flexion à une poutre en bois afin de générer simultanément un cisaillement. La complexité réside dans la recherche d'une configuration où la rupture par cisaillement se produit sans rupture préalable par flexion. Plusieurs configurations testées peuvent être trouvées dans la littérature, notamment la flexion classique en trois points, ou la flexion asymétrique en quatre points, ou même la flexion en cinq

Afin de solliciter un volume suffisant, les tests les plus prometteurs semblent être ces essais de flexion, en particulier celui de la flexion asymétrique en quatre points. Il a l'avantage de solliciter un volume et de tester une configuration proche de celle pour laquelle la résistance au cisaillement est nécessaire lors du dimensionnement des structures. C'est pourquoi ce type d'essai est étudié ici. Les répartitions du cisaillement et du moment le long de la poutre dans cette configuration sont illustrées dans la Fig. 2. Comparé à une flexion en trois points, l'avantage de cette configuration est un moment de flexion réduit de moitié pour une même valeur de cisaillement. Concernant l'application des efforts, ils peuvent être appliqués à l'aide d'une cale de répartition de charge afin d'éviter le matage, ou à l'aide d'une tige en acier (vis ou tiges collées). Cette dernière option rend la contrainte de cisaillement plus homogène dans l'échantillon, comme l'ont démontré par modélisation numérique Steiger et al (2011). De plus, la longueur importante de la cale nécessaire pour éviter le matage impose une poutre plus longue, et donc un risque accru de rupture par flexion. Il a ainsi été choisi d'appliquer l'effort via des vis et de mener une campagne d'essais avec ce nouveau type de test.

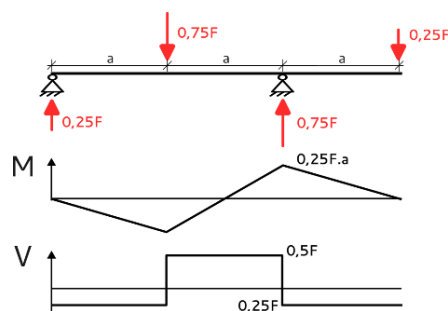


Fig. 2 : Efforts internes pour l'essai de flexion 4 points asymétrique

Des poutres en bois de trois essences européennes ont été utilisées : frêne (*Fraxinus excelsior*), hêtre (*Fagus sylvatica*) et chêne (*Quercus robur* et *Quercus petraea* sans distinction). Les échantillons proviennent de grumes de qualité secondaire, ils présentent donc des défauts, principalement des nœuds et des déviations de fibres. Les poutres testées ont une section de 38 mm par 100 mm de hauteur, et une longueur de 570 mm. Elles sont soumises à une configuration de flexion asymétrique en 4 points. Les efforts sont appliqués à la poutre à l'aide de vis disposées selon le schéma présenté en Fig. 1. Les vis utilisées sont des VGZH du fabricant Rothoblass, avec un diamètre extérieur de 6 mm, un diamètre intérieur de 4,5 mm et un filetage complet. Un pré-perçage de 4 mm sur la hauteur totale de la planche a été effectué à l'aide d'une machine CNC. Afin de garantir une rigidité homogène le long de la vis, la pointe dépasse du bois, et de l'autre côté, la tête n'est pas en contact avec le bois. De plus, pour toutes les vis, la distance entre la tête de vis et le bord de la planche est identique afin d'assurer une répartition

homogène de la force entre les différentes vis. Pour garantir ce dernier point, une cale a été placée entre la tête de vis et le bois lors du vissage. La charge est appliquée sur les têtes de vis à l'aide de plaques en acier munies de trous non débouchant et des demi-cylindres afin de créer une liaison pivot garantissant une bonne répartition de la charge entre les vis (Fig. 1). La répartition inégale de la charge (0,75F et 0,25F) a été créée à l'aide d'une poutre de répartition munie d'une articulation à une distance de 3/4 et 1/4 entre les points d'application de la charge, comme le montre la figure Fig. 1. L'abscisse maximale de la rupture a été enregistrée. Si plusieurs ruptures se produisent successivement, seule l'abscisse de la première est prise en compte. La teneur en humidité est obtenue par la méthode de dessiccation sur un morceau d'environ 3 cm de long provenant de la partie centrale de la poutre. La densité est mesurée à partir de la partie centrale de l'éprouvette.

Pour calculer la contrainte de cisaillement à la rupture, il est nécessaire trouver une relation avec la force totale F mesurée et l'abscisse de rupture observée, car la contrainte de cisaillement n'est pas répartie uniformément sur la hauteur de la section transversale. Comme la distance entre les points de charge est de l'ordre de la hauteur de l'échantillon, la théorie classique des poutres doit être utilisée avec prudence. Par conséquent, un modèle numérique est utilisé pour déterminer la répartition de la contrainte de cisaillement dans la zone cisailée.

Le calcul est effectué à l'aide du logiciel RFEM6 de Dlubal. Un modèle en contrainte plane 2D avec des éléments de surface orthotropes et les propriétés élastiques linéaires suivantes ($E_x=15300$ MPa, $E_y=1330$ MPa, $\nu_{xy}=0,43$, $\nu_{yx}=0,037$). Les vis sont modélisées à l'aide d'éléments poutre 1D à section transversale circulaire et avec un module d'Young de 210000 MPa. Le diamètre est égal au diamètre intérieur du filetage de 4,5 mm pour le groupe de vis externe. Pour le groupe de vis central, deux vis sont modélisées avec une unique poutre d'un diamètre fictif égal à 6,4 mm afin d'obtenir une surface équivalente à deux fois la surface du noyau interne d'une vis, comme présenté sur la Fig.3. Une liaison rigide est utilisée pour relier la vis au bois dans la direction orthogonale de l'axe de la vis, suivant l'axe longitudinal, une raideur linéique est choisie avec la valeur fournie par le fabricant de vis et égale à 180 N/mm². Cette rigidité est doublée pour les vis centrales afin de considérer les deux vis avec un élément poutre. Une poutre rigide avec des articulations aux deux extrémités est utilisée pour relier la tête des vis d'un groupe. Dans la partie inférieure, un appui simple est appliqué au milieu de cette poutre rigide. De l'autre côté, des forces nodales sont appliquées avec une répartition de 3/4 et 1/4. En ce qui concerne le maillage, les éléments rectangulaires sont d'une taille d'environ 2,5 mm.

La répartition des contraintes de cisaillement dans la zone centrale cisailée est illustrée avec la Fig. 5. La distribution des contraintes est assez homogène sur toute la longueur de cette zone. La distribution des contraintes de cisaillement sur la hauteur n'est pas égale à la distribution parabolique théorique dans l'hypothèse classique d'une poutre Euler Bernouilli. Un polynôme symétrique de degré 4 : $\tau = ay^4 + cy^2 + e$ est ajusté à la courbe afin d'obtenir la relation entre l'effort total appliqué, l'abscisse verticale adimensionnelle y et la contrainte de cisaillement τ . Cette relation est utilisée pour calculer la contrainte pour chaque essai suivant le principe expliqué avec la Fig. 4.

Résultats et discussions

Certaines ruptures en flexion ont été observés (tension/compression dans la zone externe de la section transversale). De plus un flambage de la vis est apparu sur certaines éprouvettes, ce qui a potentiellement perturbé la distribution du cisaillement. Dans les deux cas les résultats de ces éprouvettes n'ont pas été considérés. Sur 73 essais, 4 éprouvettes ont rompu en flexion et 4 ont subis des flambements de vis.

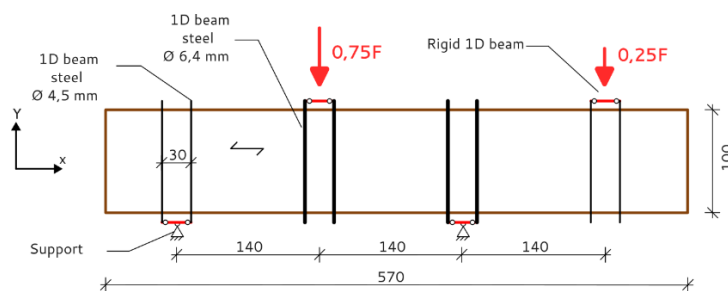


Fig. 3 : Schéma de la modélisation MEF

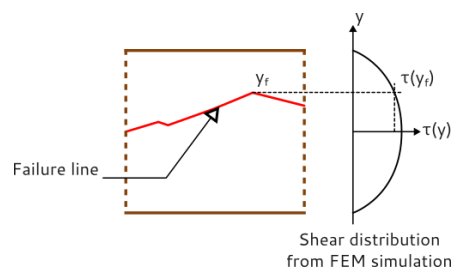


Fig. 4 : Principe de dépouillement

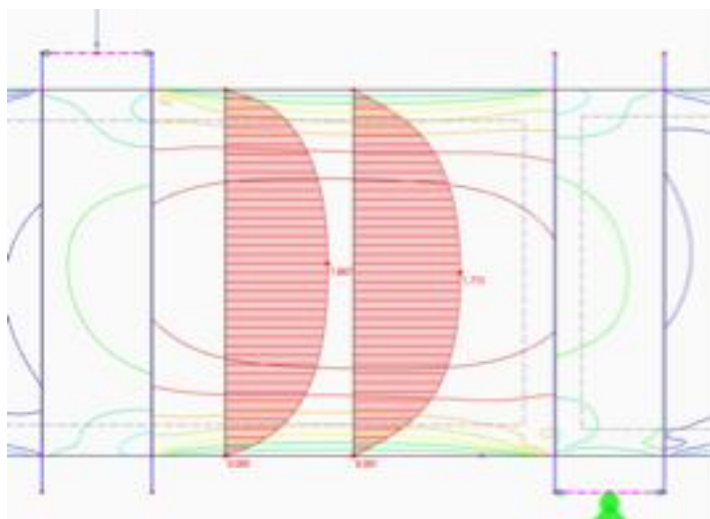


Fig. 5 : Distribution des contraintes de cisaillement dans la zone centrale, selon modèle MEF, pour une charge de 10kN



Fig. 6 : Illustration d'une rupture en cisaillement

Les ruptures par cisaillement observées étaient fragiles. Le plan de rupture suit la direction du fil du bois et les lignes verticales tracées préalablement montrent un saut à ce qui est considéré comme la ligne de rupture, comme le montre la Fig. 6. Les résultats sont présentés dans le Tab.1. Les résultats sont cohérents et proches des valeurs trouvées dans la bibliographie (Benistand 2019, Van de Kuilen et al 2017).

Tab. 1 : Résultats des essais de cisaillement

	nb essais	nb rupture flexion	nb flambement vis	nb essais corrects	$f_{v,mean}$	$f_{v,k}$	COV f_v	Densité ρ_{mean}	Densité ρ_k	Teneur en eau [%]
	[-]	[-]	[-]	[-]	[MPa]	[MPa]	[%]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[%]
Frêne	25	0	4	21	16,4	13,1	20,3%	684	608	11,5%
Chêne	25	2	0	23	12,2	9,5	12,5%	687	596	11,2%
Hêtre	23	2	0	21	13,2	9,2	16,2%	692	625	12,2%

Conclusion et perspectives

L'utilisation d'une poutre en flexion asymétrique en quatre points comme essai de résistance de cisaillement a démontré un potentiel intéressant, malgré la nécessité de calculer la contrainte de rupture en s'appuyant sur une modélisation MEF. Il est à noter que le type et la répartition des vis doivent être choisis avec soin pour éviter le flambage, ainsi que les dimensions de la poutre

pour éviter la rupture par flexion. Les valeurs de contraintes trouvées sont cohérentes avec la bibliographie et bien plus élevées que les valeurs tabulées de la norme NF EN 384-2022.

L'ajout d'une analyse par corrélation d'images numériques de la zone cisailée pendant l'essai, pourrait permettre de mesurer également le module de cisaillement pendant le même essai. De plus, cela pourrait confirmer l'hypothèse de la loi constitutive élastique utilisée pour le modèle numérique nécessaire pour trouver la relation entre la force mesurée et la contrainte calculée

Remerciements

Ce projet est réalisé en collaboration avec le CRITT-bois. Il a été financé par l'Etat dans le cadre de France 2030 opéré par l'ADEME. Les auteurs remercient l'entreprise Rothoblass pour la fourniture des vis.

Références

Zhang L, Han Y, Xie Q, Wang Y, Wu Y (2024) Mechanical performance of wood subjected to the interaction of transversal tension/compression and longitudinal shear stresses, *Construction and Building Materials*, 420 - 135637

Steiger R, Richter K (2011) Interaction of shear stresses and stresses perpendicular to the grain, CIB-W18, Alghero 08.11

Ravenshorst G, Gamper N, Vries P, Van de Kuilen J-W (2016) Determination of the shear strength of tropical hardwood timber, conference WCTE, Vienna, 22-25.08.16

Benistand T (2019) Caractérisation mécanique des bois feuillus Français en vue de leur meilleure intégration aux Eurocodes 5, thèse de l'université de Lorraine

Van de Kuilen J-W, Wolfgang G, Ravenshorst G, Antonelli V, Kovryga A (2017) Shear strength values for soft and hardwoods, conference INTER 50-06-1, Kyoto, 2-31.08.17

Palma P, Steiger R, Strahm T, Gehri E (2022) Shear stiffness and strength of European ash glued laminated timber, conference INTER 55-12-1, Bad Aibling, 22-25.08.22

Ehrhart T, Steiger R, Palma P, Frangi A (2018) Mechanical properties of European beech glued laminated timber, conference INTER 51-12-4, Tallinn, 13-16.08.18

Gheri E (2010) Shear problems in timber engineering – analysis and solutions, conference WCTE, Trentino, 20-24.06.2010