

Analyse et modélisation du processus de rupture des assemblages bois par goujons collés

J. LARTIGAU^a, S. MOREL^a, J.-L. COUREAU^a, P. GALIMARD^a, E. MAURIN^b

a. Institut de Mécanique et d'Ingénieries (I2M) – UMR 4295, Bât. A11-BIS, 351 Cours de la Libération, 33405 TALENCE Cedex

b. Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH), 29 Rue de Paris, 77420 CHAMPS-SUR-MARNE

Résumé :

Les assemblages par goujons collés sont un moyen de consolidation fréquemment utilisé en restauration des structures bois. La présente étude vise à caractériser le comportement de ces assemblages en couplant tests expérimentaux et modélisation numérique. Sur la base d'essais expérimentaux, l'approche numérique permet de mettre en évidence une présence importante du mode d'ouverture de fissure (mode I) en début de fissuration et la nécessité d'utiliser un critère de mode mixte (mode I et mode II) afin de décrire précisément le processus complet de rupture de ces assemblages. Une formulation analytique est proposée et permettra la réalisation d'abaques de dimensionnement des assemblages par goujons collés, utilisable en bureau d'études techniques.

Abstract:

Structural bonding technology is an economically and attractive connection process in timber engineering. Within old or historical wooden structures, local reinforcement of weak zones is frequently provided by glued-in rods connections. Despite previous research programs, some design rules, predicting pull out strengths, are available but a common criterion is still lacking. The combination of experimental and numerical investigations on small specimens leads to a better knowledge of mechanical and fracture behavior of such connections. Fracture behavior is considered through a modeling using a fracture criterion in mixed mode (mode I + mode II). The main results aim at supplying information relative to the safety prediction of glued-in rods.

Mots clés : structures bois, assemblages par goujons collés, modélisation par éléments finis, mécanique de la rupture, mode mixte

1 Introduction

Le collage structural connaît un important développement et une utilisation accrue dans divers domaines (aéronautique, automobile, construction ...). En construction bois, la réhabilitation d'éléments de structures anciennes fait souvent appel à la technologie du collage structural. Au-delà de leurs avantages esthétiques, les assemblages par goujons collés assurent le transfert des charges entre les différents éléments de structure. Typiquement, il met en jeu trois matériaux : bois, adhésif et acier. Cette configuration complexifie l'analyse de ces assemblages et explique le manque de connaissance relative à leur comportement. Il faut noter qu'aujourd'hui il n'existe pas de modèle de dimensionnement standard au niveau européen. Le comportement mécanique global de ces assemblages dépend de nombreux paramètres tels que la géométrie du joint de colle, les propriétés des matériaux utilisés et les conditions de chargement. L'influence de ces nombreux facteurs fut et demeure encore aujourd'hui le sujet de plusieurs études scientifiques [1-3], aboutissant au développement de formulations de dimensionnement majoritairement phénoménologiques [4]. Dans le but de définir des règles professionnelles de dimensionnement de ces assemblages, plusieurs campagnes expérimentales sont entreprises pour évaluer leur performance mécanique. La présente étude consiste à coupler tests expérimentaux et modélisation numérique. L'outil numérique permet de révéler d'importantes informations sur le comportement à rupture de tels assemblages, difficilement évaluables par le biais unique des seules expériences.

2 Etude expérimentale des assemblages bois par goujons collés

2.1 Matériaux

L'essence de bois choisie pour la présente étude est l'épicéa (*Picea Abies L.*), classiquement utilisée pour la réalisation de structures bois neuves. Le bois est préalablement conditionné en chambre climatique régulée, de façon à ce qu'il se stabilise à un taux d'équilibre hygroscopique avoisinant les 12%. Il est enfin usiné pour obtenir des cubes de 50 mm d'arête, ayant une masse volumique moyenne de 410 kg/m³. Un perçage de 12 mm de diamètre est réalisé sur toute la hauteur de chaque cube, selon la direction du fil du bois. Cette réservation permet d'accueillir le goujon et le joint de colle. Le goujon est une tige filetée en acier de 8 mm de diamètre, satisfaisant des conditions mécaniques élevées validées au cours d'essais (classe de qualité du filetage : 8.8, limite d'élasticité : 640 MPa et résistance minimale en traction : 800 MPa). Dans le cas d'un chargement axial, ces performances mécaniques permettent d'éviter une rupture ductile par plastification de l'acier. Un adhésif époxyde bi-composant est employé pour ce type d'assemblage, car il présente de meilleures performances en comparaison avec les adhésifs polyuréthanes ou phénols-résorcinols. L'espacement résiduel entre le bois et la tige filetée permet de créer une épaisseur de joint de colle annulaire de 2 mm, sur une hauteur de 50 mm. Les propriétés mécaniques de l'adhésif ont également été examinées au travers d'essais de traction sur le matériau massif, et conduisent à un module d'élasticité moyen de 4 270 MPa, un coefficient de Poisson de 0,343, et une résistance en traction de 28 MPa.

2.2 Méthodes

Les éprouvettes sont testées en configuration « pull-compression » (FIG. 1). Lors de la mise en charge, leur face inférieure se positionne contre la plaque du bâti, engendrant ainsi des contraintes de compression du bois et des contraintes de cisaillement au sein du joint de colle.

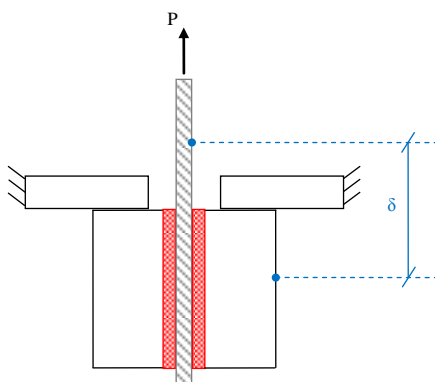


FIG. 1 – Schéma de principe mécanique de l'essai.

Un dispositif de mesure des déplacements est mis en place sur chaque éprouvette testée au moyen de deux capteurs LVDT placés de part et d'autre du spécimen. La moyenne de ces deux déplacements permet d'estimer le déplacement effectif de l'assemblage (déplacement relatif du goujon par rapport au substrat bois).

2.3 Résultats expérimentaux

Les 45 spécimens testés présentent une rupture dite adhésive entre le bois et l'adhésif : le bois proche du joint collé est extrait avec la tige filetée, le cylindre d'adhésif restant intact (FIG. 2). Ce type de rupture à l'interface bois/adhésif constitue le mode de ruine recherché, et témoigne d'une mise en œuvre correcte, d'une réticulation complète de l'adhésif et d'une bonne qualité des matériaux mis en jeu.

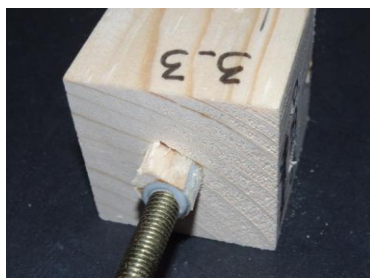


FIG. 2 – Rupture caractéristique des assemblages.

La contrainte de cisaillement à l'interface bois/adhésif (lieu de rupture) est donc calculée, en divisant la charge au pic par la surface cisailée, selon l'Equation (1) :

$$\tau_u = \frac{P_u}{S} = \frac{P_u}{\pi \cdot d_p \cdot l_a} \quad (1)$$

Où τ_u est la résistance en cisaillement, P_u la charge au pic, d_p le diamètre de perçage dans le bois (12 mm) et l_a la longueur de collage (50 mm).

Les mesures relevées par les capteurs LVDT permettent l'analyse des courbes force-déplacement de chaque éprouvette testée. Ces dernières présentent la même allure, constituées de parties distinctes : un domaine linéaire élastique, à partir duquel est évaluée la raideur initiale de l'assemblage et une zone non-linéaire, où apparaît la diminution progressive de la raideur. Cette décroissance indique l'initiation de l'endommagement et/ou la propagation de fissure à l'interface bois/adhésif, conduisant à la rupture des spécimens.

Les valeurs expérimentales de la raideur et de la résistance en cisaillement sont récapitulées dans le TAB. 1, les valeurs entre parenthèses représentant les coefficients de variation obtenus sur les résultats.

	Raideur (kN/mm)	Résistance (MPa)
Valeur moyenne	59 (0,11)	6,3 (0,2)
Valeur au fractile à 5%	49	4,5
Valeur au fractile à 95%	70	8,8

TAB. 1 – Résultats expérimentaux.

La raideur initiale est un paramètre important nécessaire aux calculs par éléments finis. Cette raideur permettra notamment la calibration du modèle en élasticité.

3 Modélisation numérique

L'étude numérique consiste à modéliser en détail la configuration expérimentale à partir d'un calcul aux éléments finis (*EF*). La première étape de calibration du modèle se fait en élasticité linéaire, de manière à ajuster la raideur numérique à celle obtenue à partir des essais expérimentaux (TAB. 1). Une fois cette étape achevée, il est alors possible d'étudier l'état de contraintes à l'interface bois/adhésif (localisation de la rupture constatée expérimentalement). Enfin, l'approche envisagée pour déterminer la résistance de tels assemblages est basée sur les concepts de la Mécanique Linéaire Élastique de la Rupture équivalente (*MLEReq*). Cette théorie permet, à partir des données expérimentales (courbes force-déplacement), de définir les énergies de rupture consommées pour la séparation complète du collage, ou inversement de définir le comportement global de l'assemblage à partir d'une énergie de rupture critique.

3.1 Mise en place du modèle *EF*

Les calculs numériques sont effectués en élasticité linéaire avec le logiciel Castem 2009. Pour des raisons de symétrie matérielle et de chargement par rapport à l'axe médian de la tige, un modèle axisymétrique est adopté. Les propriétés mécaniques et géométriques des matériaux de l'assemblage ainsi que les conditions

aux limites constituent les entrées du modèle. Les propriétés élastiques de l'épicéa sont déterminées à partir de la masse volumique moyenne [5]. Les caractéristiques mécaniques de la tige et de l'adhésif nécessaires au modèle sont prises égales à celles mesurées expérimentalement.

3.2 Résultats des simulations

3.2.1 Raideurs initiales numériques

Un chargement unitaire de traction est imposé sur l'axe médian de la tige et les déplacements, évalués aux mêmes points de mesures que ceux utilisés expérimentalement, permettent d'estimer la raideur initiale numérique de l'assemblage. Une valeur numérique de 71 kN/mm est obtenue, correspondant à la raideur expérimentale au fractile à 95%. Cette raideur numérique reflète donc le cas d'un assemblage quasi-parfait, tandis que des défauts de polymérisation au sein du joint de colle ou encore des défauts d'adhérence entre substrats peuvent être à l'origine de l'écart constaté entre raideurs moyenne et numérique.

3.2.2 Etat de contraintes à l'interface bois/adhésif

Les contraintes de cisaillement et normales à l'interface bois/adhésif (lieu de la rupture expérimentale) sont estimées à partir de l'étude *EF* (FIG. 3).

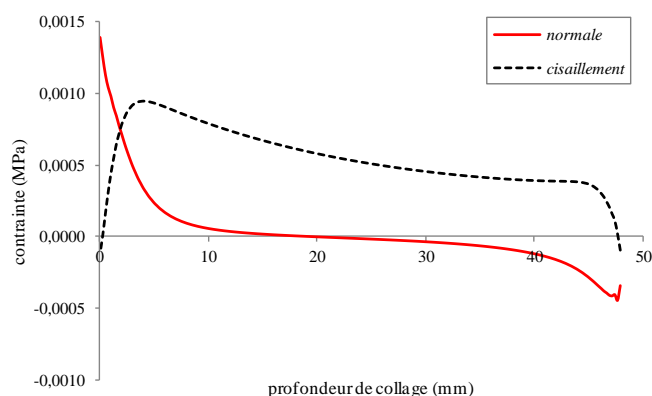


FIG. 3 – Etat de contraintes à l'interface bois/adhésif.

Les calculs *EF* révèlent une contrainte normale sept fois plus élevée que la contrainte de cisaillement en tête de collage le long de l'interface bois/adhésif. Or, cette tendance s'inverse à partir de 2 millimètres. Ainsi, malgré un chargement macroscopique de type cisaillement, les contraintes normales à l'interface apparaissent prépondérantes en tête de collage. Ce résultat surprenant impliquera la nécessité d'utiliser un critère de rupture en mode mixte (mode I + mode II) afin de caractériser le processus complet des assemblages, et non plus un simple critère de mode II comme utilisé habituellement.

3.3 Approche Mécanique de la rupture

3.3.1 Taux de restitution d'énergie : découplage des modes de ruine

La « Crack Closure Technique » (*CCT*) est une méthode de calcul du taux de restitution d'énergie, permettant de connaître la part de chaque mode de ruine dans le processus de rupture en mode mixte. A partir de cette méthode de calcul développée dans [6], la contribution du mode I (G_I/G_{tot}) est prépondérante en tête de fissuration (FIG. 4), cette tendance s'inversant par la suite avec une dominance du mode II pour des longueurs de fissure supérieures.

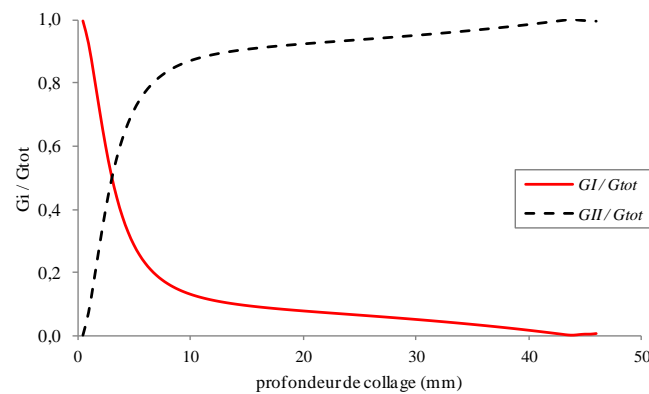


FIG. 4 – Découplage en évolutions propres à chaque mode de ruine.

Il faut noter que la mixité des modes n'est jamais constante quelle que soit la longueur de fissure.

3.3.2 Courbes de résistance (courbes-R)

A partir d'essais expérimentaux de charge/endommagement/décharge, il a été constaté que la *MLEReq* était applicable à ce type d'assemblage. Dans ce cadre, la non-linéarité des courbes force-déplacement, i.e. diminution de la raideur, pourra être attribuée à la propagation d'une fissure élastique équivalente. La résistance à la propagation de fissure G_{tot}^* est estimée en calculant la variation d'énergie élastique équivalente $W(a)$, restituée lors d'un incrément de fissure infinitésimal δa selon l'Equation (2) :

$$G_{tot}^*(a) = \frac{W(a)}{\delta A} = \frac{W(a)}{2\pi.r.\delta a} \quad (2)$$

A partir d'un point de la courbe force-déplacement expérimentale, dans sa phase d'endommagement, le calcul de la raideur correspondante peut être effectué. L'évolution de la raideur en fonction de la longueur de fissure a étant connue par calculs *EF*, a est estimée par processus dichotomique. L'énergie $W(a)$ est déduite de l'aire sous la courbe force-déplacement. La résistance à la propagation de fissure G_{tot}^* est alors connue en fonction d'un incrément de fissure de longueur δa imposé (ici $\delta a = 0,1$ mm). Le calcul est ainsi réitéré jusqu'à parcourir l'intégralité de la courbe force-déplacement, permettant l'estimation de courbes de résistance [7].

A partir des résultats apportés par la *MLEReq* et par la *CCT*, il est maintenant proposé d'établir un critère de rupture en mode mixte de ces assemblages.

3.3.3 Proposition d'un critère de rupture en mode mixte (I + II)

Une généralisation du critère de rupture en mode mixte utilisé pour le bois est proposée. Le critère habituellement utilisé pour les valeurs plateaux de la courbe de résistance est ici étendu à toute longueur de fissure. Une formulation analytique, basée sur une analyse énergétique et non plus sur les théories classiques de la résistance des matériaux, est ainsi proposée, selon l'Equation [3] :

$$\left[\frac{G_I^*(a)}{G_{RI}(a)} \right]^\eta + \left[\frac{G_{II}^*(a)}{G_{RII}(a)} \right]^\gamma = 1 \quad (3)$$

Où $G_i^*(a)$ est la résistance effective constatée en mode i durant la rupture en mode mixte et $G_{Ri}(a)$ sont les valeurs des courbes-R en mode pur ($i = I$ ou II).

Les valeurs des courbes de résistance en mode pur font appel à des courbes de résistance analytiques

théoriques, selon l'Equation (4).

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{Ri}(a) = \frac{G_{Ric}}{\Delta a_c^\beta} \times \Delta a^\beta \text{ si } \Delta a < \Delta a_c \\ G_{Ri}(a) = G_{Ric} \quad \text{si } \Delta a \geq \Delta a_c \end{array} \right\} \text{ avec } 0 \leq \beta \leq 1 \quad (4)$$

Le critère de rupture semi-quadratique ($\eta = 1$ et $\gamma = 2$) semble correspondre au mieux aux résultats expérimentaux. L'ensemble des 45 éprouvettes est analysé. Les valeurs des courbes-R en mode pur prises en compte et qui font converger le critère vers 1 sont données dans le TAB. 2.

G_{Ric} (J/m ²)	G_{Riic} (J/m ²)	Δa_c (mm)	β_I	β_{II}
265 (0,35)	1 045 (0,23)	30 (0,07)	0,33 (0,13)	0,45 (0,20)

TAB. 2 – Valeurs moyennes permettant de vérifier le critère de rupture en mode mixte.

4 Conclusion et perspectives

Le comportement mécanique des assemblages bois par goujons collés est étudié par des essais de caractérisation et des simulations numériques. Ces deux approches sont intimement liées car la base de données expérimentale permet de s'assurer d'une utilisation optimale des résultats du modèle par éléments finis. La mixité des modes de ruine révélée par la modélisation conduit à utiliser un critère de rupture en mode mixte, et met en lumière une nouvelle approche de caractérisation des assemblages bois par goujons collés. A partir de valeurs de courbes-R en mode pur typiques, le critère de rupture est vérifié sur l'ensemble des éprouvettes testées. Cette approche permet également de déterminer la charge au pic et la longueur de fissure correspondante. D'un point de vue ingénierie, cette étude semble trouver tout son intérêt puisque l'analyse peut alors être reproduite pour de nouvelles configurations d'assemblages, utilisant notamment des matériaux différents.

Références

- [1] Aicher S., Gustafsson P.J., Wolf M., Load displacement and bond strength of glued-in rods in timber influenced by adhesive, wood density, rod slenderness and diameter, Proceedings of the international RILEM symposium on timber engineering, Stockholm, Sweden, 1999.
- [2] Broughton J.G., Hutchinson A.R., Pull-out behavior of steel rods bonded into timber, Materials and Structures, vol. 34, 2001, p. 100-109.
- [3] Otero Chans D., Cimadevila J.E., Gutiérrez E.M., Glued joints in hardwood timber, International Journal of Adhesion & Adhesives, 28: 457-463, 2008.
- [4] Eurocode 5, Conception et calcul des structures en bois. Partie 2 : Ponts, Paris, AFNOR, 2005.
- [5] Guitard D., Mécanique du matériau bois et composites, Toulouse, Editions Cépaduès, 1987.
- [6] Krueger R., Virtual crack closure technique : History, approach and applications, American Society of Mechanical Engineering, vol. 57, n°2, 2004, p. 109-143.
- [7] Morel S., Dourado N., Valentin G., Morais J., Wood: a quasibrittle material. R-curve behavior and peak load evaluation, International Journal of Fracture, 131: 385-400, 2005.