



HAL
open science

Comportement mécanique des assemblages bois par goujons collés

Julie Lartigau

► **To cite this version:**

Julie Lartigau. Comportement mécanique des assemblages bois par goujons collés. 31e rencontres universitaires de l'AUGC "De l'expérimentation à la modélisation en Génie Civil", ENS Cachan, May 2013, Cachan, France. <hal-03409260>

HAL Id: hal-03409260

<https://hal.science/hal-03409260v1>

Submitted on 29 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Comportement mécanique des assemblages bois par goujons collés

Julie LARTIGAU

Institut de Mécanique et d'Ingénieries–UMR 5295 (Université Bordeaux I / CNRS)

Bât. A11-BIS – 351 Cours de la Libération

33405 Talence Cedex

j.lartigau@i2m.u-bordeaux1.fr

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

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.

KEY WORDS: timber structures, glued-in rod connections, finite element simulations, fracture mechanics, mixed mode.

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 [AIC 99 ; BRO 01], aboutissant au développement de formulations de dimensionnement majoritairement phénoménologiques [EUR 05]. 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

L'essence de bois choisie pour la présente étude est l'épicéa (densité : 0,41). Les spécimens sont des cubes de 50 mm d'arête conditionnés en chambre climatique régulée, de façon à ce qu'ils atteignent un taux d'équilibre hygroscopique de 12%. Une tige filetée en acier (diamètre nominal : 8 mm) est collée selon la direction longitudinale du bois au moyen d'un adhésif époxyde bi-composant. Le goujon satisfait des performances mécaniques élevées, validées au cours d'essais (limite d'élasticité : 640 MPa et résistance en traction : 800 MPa). 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.

Les assemblages sont alors testés en configuration « pull-compression ». 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 (Figure 1). La moyenne de ces deux déplacements permet d'estimer le déplacement effectif de l'assemblage, noté δ (déplacement relatif du goujon par rapport au substrat bois).

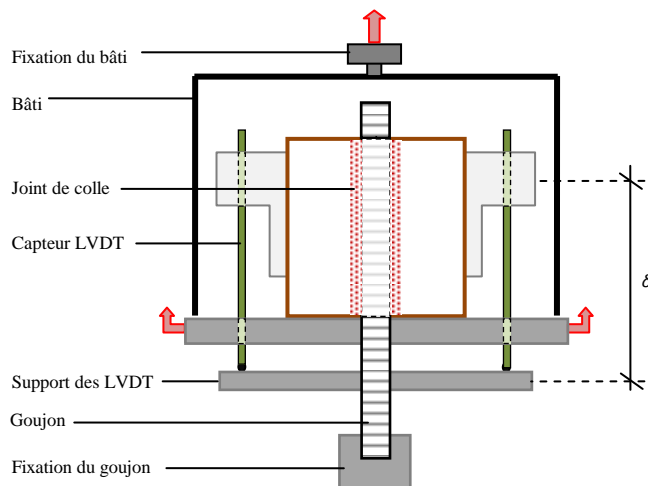


Figure 1. Schéma de principe mécanique de l'essai

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. A partir de ce dispositif expérimental, la raideur initiale et la contrainte de cisaillement sont évaluées. La raideur initiale, déterminée à partir des courbes force-déplacement expérimentales, est un paramètre nécessaire aux calculs par éléments finis (*EF*) et 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 initiale numérique à celle obtenue à partir des essais expérimentaux. 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. Les propriétés mécaniques et géométriques des matériaux de

l'assemblage ainsi que les conditions aux limites constituent les entrées du modèle. Les déplacements et contraintes, rapportés au chargement appliqué, constituent les résultats du modèle.

Pour des raisons de symétrie matérielle et de chargement par rapport à l'axe médian de la tige, un modèle axisymétrique est adopté. Les éléments utilisés dans le maillage sont des triangles à 6 nœuds. Ils sont définis dans le repère (r,z) dont l'axe z correspond à l'axe du goujon. La densité de maillage optimale est établie par l'étude de l'évolution des raideurs numériques en fonction du nombre d'éléments par millimètre. Le maillage est considéré comme optimisé dès lors que les raideurs numériques tendent à se stabiliser. Un comportement élastique orthotrope est affecté au bois modélisé. Ces propriétés élastiques sont ajustées à partir des modèles prévisionnels développés dans Guitard [GUI 87]. Elles sont calculées en fonction de la densité moyenne des éprouvettes bois testées. Les caractéristiques mécaniques du goujon et de l'adhésif nécessaires au modèle sont prises égales à celles mesurées expérimentalement. Un comportement élastique isotrope est affecté au goujon et à l'adhésif. L'adhérence entre les différents substrats est considérée comme parfaite. En ce sens, les nœuds en commun aux interfaces bois/adhésif et goujon/adhésif sont éliminés.

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* (Figure 2). 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 [JOH 95 ; SER 01].

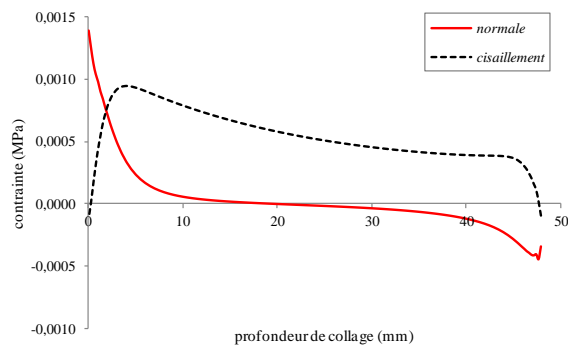


Figure 2. Etat de contraintes à l'interface bois/adhésif

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. D'une part, les essais sur les assemblages ont révélé une rupture localisée à l'interface entre le bois et l'adhésif. D'autre part, la modélisation *EF* a permis de mettre en évidence l'existence d'une mixité de modes de ruine dans le processus de rupture des assemblages. A partir de ces constats, la *CCT* est appliquée à l'étude de la rupture des assemblages. Une fissure est modélisée à l'interface entre les substrats bois et adhésif. A partir de cette méthode de calcul développée dans Krueger [KRU 04], la contribution du mode I (G_I / G_{tot}) est prépondérante en tête de fissuration (Figure 3), cette tendance s'inversant par la suite avec une dominance du mode II pour des longueurs de fissure supérieures.

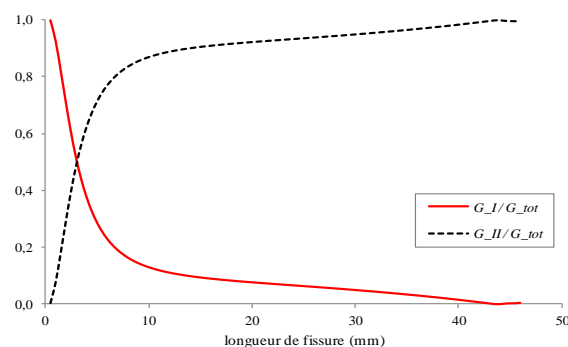


Figure 3. Découplage en évolutions propres à chaque mode de ruine

Les résultats obtenus par l'approche *CCT* confortent ceux décrits en Figure 2. Il faut également 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 [1] :

$$G_{tot}^*(a) = \frac{W(a)}{\delta A} = \frac{W(a)}{2\pi.r.\delta a} \quad [1]$$

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.

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 la phase d'initiation de la fissure ou 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 [2] :

$$\left[\frac{G_I^*(a)}{G_{RI}(a)} \right]^\eta + \left[\frac{G_{II}^*(a)}{G_{RII}(a)} \right]^\gamma = 1 \quad [2]$$

$$\text{avec : } G_i^*(a) = \frac{G_i(a)}{G_{tot}(a)} \times G_{tot}^*(a) \quad [3]$$

Le ratio $G_i(a) / G_{tot}(a)$ de l'Equation [3] est connu par les outils de l'approche *CCT* (Figure 3) et $G_{tot}^*(a)$ est estimée à partir des concepts de la *MLEReq* (Equation

[1]). $G_i^*(a)$ 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].

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

La première partie croissante de la courbe-R peut être généralement décrite par une loi puissance exprimée en fonction de l'incrément de longueur de fissure élastique équivalente. Elle caractérise la phase de développement de la zone d'élaboration de la fissure. La seconde partie tend vers une asymptote, ou valeur plateau, reflétant la propagation de la fissure principale avec sa zone endommagée.

Le critère de rupture semi-quadratique ($\eta = 1$ et $\gamma = 2$) est utilisé. 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 Tableau 1.

Tableau 1. Valeurs moyennes permettant de vérifier le critère de rupture

$G_{Ri,c}$ (J/m ²)	$G_{Ri,c}$ (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)

A partir des propriétés de rupture ainsi établies, il est alors possible de reconstituer les courbes force-déplacement par le biais des EF (Figure 4).

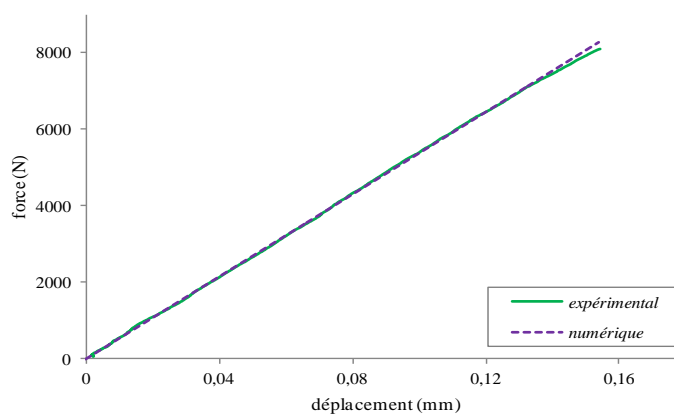


Figure 4. Confrontation des résultats expérimentaux et numériques

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 énergétique 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.

5. Bibliographie

- [AIC 99] 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.
- [BRO 01] BROUGHTON J.G., HUTCHINSON A.R. « Pull-out behavior of steel rods bonded into timber », *Materials and Structures*, vol. 34, 2001, p. 100-109.
- [EUR 05] EUROCODE 5. « Conception et calcul des structures en bois. Partie 2 : Ponts », Paris, AFNOR, 2005.
- [GUI 87] GUITARD D., *Mécanique du matériau bois et composites*, Toulouse, Editions Cépaduès, 1987.
- [JOH 95] JOHANSSON C.J., SERRANO E., GUSTAFSSON P.J., ENQUIST B. « Axial strength of glued in bolts – calculation model based on non linear fracture mechanics », *Proceedings of the 28th conference of CIB-W18*, Denmark, 1995.
- [KRU 04] KRUEGER R. « Virtual crack closure technique : History, approach and applications », *American Society of Mechanical Engineering*, vol. 57, n°2, 2004, p. 109-143.
- [SER 01] SERRANO E. « Glued in rods for timber structures – a 3D model and finite parameter studies », *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 21, n°2, 2001, p. 115-127.