

## Effet du vieillissement sur la tenue mécanique des joints du bois lamellé-collé

GREFFIER Guilhem, ESPINOSA Luis, EYMA Florent, PERRIN Marianne

Institut Clément Ader (ICA) ; Université de Toulouse ; CNRS, UPS, INSA, ISAE-  
SUPAERO, IMT Mines Albi ; 3 rue Caroline Aigle, 31400 Toulouse, France  
[guilhem.greffier@iut-tarbes.fr](mailto:guilhem.greffier@iut-tarbes.fr)

**Mots clefs :** Durabilité ; Bois Lamellé Collé ; Ouvrages d'art ; Cisaillement

### Introduction

Dans le contexte environnemental actuel, l'utilisation du matériau bois apparaît comme un des leviers qui permettra de réduire le bilan carbone du secteur de la construction. En effet, ce secteur d'activité est une des principales sources d'émissions de CO<sub>2</sub> mondiales (Baude et al 2022). Un changement dans l'utilisation des matériaux est donc indispensable pour atteindre l'objectif de neutralité carbone fixé pour 2050 par la Stratégie Nationale Bas Carbone (Cerema 2021, IEA 2019). Afin de répondre à ces exigences l'utilisation de bois dans les ouvrages est une piste de développement intéressante. Pour ce faire, le bois Lamellé Collé LC, constitué de lamelles de bois aboutées et collées entre elles, permet de créer des portées et des sections adaptées à la plupart des ouvrages d'arts de petite longueur (inférieure à 50m) (Glulam Handbook 2018, Le Roy 2013).

A ce jour, le comportement à long terme du bois LC, particulièrement en extérieur, n'est pas suffisamment documenté (Ehrhart et al 2021). Les coefficients de sécurité appliqués au bois lamellé-collé dans l'Eurocode 5 sont issus d'études sur du bois massif (AFNOR 2005a, 2005b, Racher et al. 1996) et ne prennent donc pas en compte la spécificité de ce matériau avec notamment la présence de joints de colle.

Dans ce cadre, des essais actuellement en cours sur le site de l'IUT de Tarbes se concentrent sur l'évolution de la tenue au cisaillement des joints de colle exposés en conditions extérieures. Ces essais proposent également une instrumentation spécifique avec un suivi en continu des sollicitations hygromécaniques. L'objectif de ce travail est donc d'explorer le lien entre les mesures de déformations internes issues des variations d'humidités, mesurées via l'instrumentation des éprouvettes et l'évolution de la résistance au cisaillement des joints de colle.

### Matériel et méthodes

#### *Vieillissement du bois LC*

Une campagne d'essais en extérieur a été initiée en août 2020 pour une durée de 5 ans. 198 éprouvettes en bois LC constituées de trois lamelles de Douglas collées avec de la colle polyuréthane ont été fabriquées. L'essence de Douglas a été choisie car elle fait partie des plus courantes dans l'industrie du lamellé collé pour une utilisation en structure extérieure.

Les éprouvettes mesurent 480 mm de long pour une section de 30x30mm. Ces sections ont été définies selon la norme EN408 (AFNOR 2012). Trois scénarios de vieillissement distincts sont étudiés, 66 éprouvettes sont exposées en conditions extérieures avec une charge de 60 daN en flexion 4 points, 66 éprouvettes sont exposées à l'extérieur sans chargement et 66 éprouvettes sont conservées dans une pièce à température et humidité régulée comme référence. 6

éprouvettes de chaque série sont équipées du système d'instrumentation développé dans notre laboratoire (Uwizeyimana et al 2020) permettant d'avoir un suivi de l'humidité et des déformations dans le bois LC.

### Instrumentation

L'instrumentation des éprouvettes (Fig. 1) consiste en 3 mesures d'humidité par l'intermédiaire de capteurs résistifs de types patches et de deux jauges de déformation disposées de part et d'autre du joint de colle permettant de mesurer les déplacements différentiels entre deux lamelles. L'épaisseur des jauges ne permet pas de les coller sur le même plan transversal de part et d'autre du joint de colle sans risquer de fragiliser l'éprouvette. Elles ont donc été positionnées à la même distance du bord de chaque côté des éprouvettes. Les données récoltées sur site sont transmises par radio pour être exploitées depuis un PC à distance grâce à une interface dédiée (Greffier et al 2022).

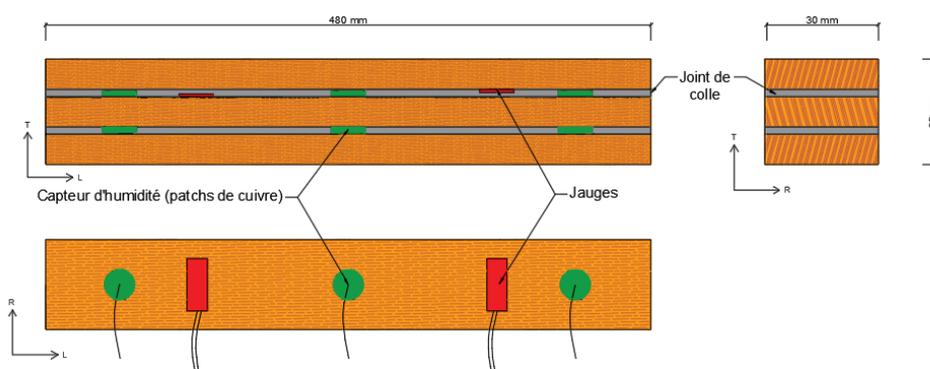


Fig. 1 : Systèmes intégrés de suivi des paramètres de vieillissement du bois lamellé collé

### Essais de cisaillement

Tous les 6 mois, 6 éprouvettes chargées et 6 éprouvettes non-chargées sont caractérisées. 5 éprouvettes de chaque cas sont testées en flexion et une éprouvette est débitée en 14 échantillons cubiques de 30 mm de côté. Le joint de colle supérieur de ces échantillons est testé en cisaillement comme illustré sur la Fig. 2. Les essais de cisaillement sur le joint de colle sont réalisés en suivant les recommandations de l'annexe D de la norme NF 14080 (AFNOR 2013).

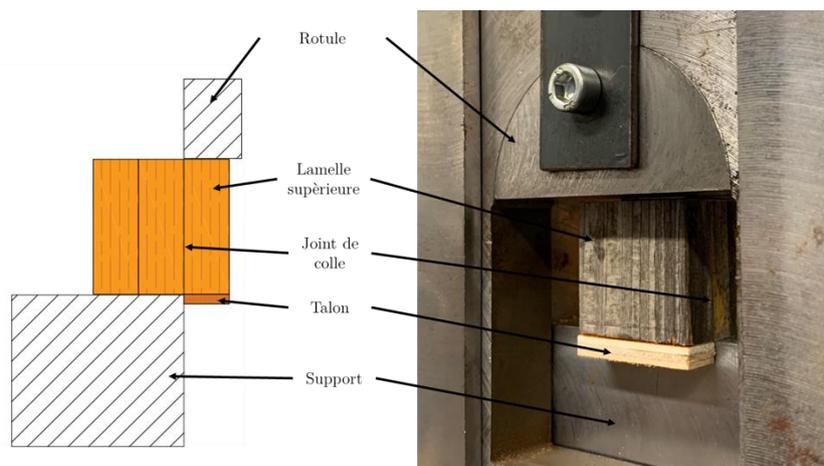


Fig. 2 : Dispositif d'essais en cisaillement

L'effort et le déplacement sont mesurés via la cellule de charge et le déplacement de la traverse de la machine d'essais. Le calcul de la résistance au cisaillement du joint de colle est déterminé par l'équation 1 :

$$\sigma_v = \frac{Fv_{max}}{A} \quad (1)$$

avec :

- $\sigma_v$  : la résistance au cisaillement du joint de colle (en MPa) ;
- $Fv_{max}$  : la charge à la rupture (en N) ;
- $A$  : la surface de cisaillement (en mm<sup>2</sup>).

Le taux de délamination, qui est un outil couramment utilisé pour évaluer la tenue d'un joint de colle aux sollicitations hygromécaniques dans le bois, est également mesuré selon les exigences de la NF EN 14080 (AFNOR 2013). Le taux de délamination d'un joint de colle correspond au rapport entre la longueur de joint délaminé et la longueur totale du joint de colle sur les deux faces de l'échantillon d'essai. Il est calculé comme suit (Equation 2) :

$$Délam = \frac{l_{tot,delam}}{l_{tot,joint\ de\ collage}} \cdot 100 \quad (2)$$

avec :

- $l_{tot,delam}$  : la longueur de joint délaminé sur les deux faces en bout de l'échantillon (en mm) ;
- $l_{tot,joint\ de\ collage}$  : la longueur totale de joint sur les deux faces en bout de l'échantillon (en mm) ;
- $Délam$  : le taux de délamination (en %).

## Résultats

### Evolution des déformations différentielles

Le suivi des déformations mesurées par l'intermédiaire des jauges positionnées de part et d'autre des joints de colle montre des déformations équivalentes entre les jauges pour les premiers mois de suivi. Nous observons ensuite deux principaux cas de figures pour l'évolution des déformations différentielles.

Le premier cas de figure a été constaté sur 3 éprouvettes, sur lesquelles on peut observer un accroissement des déformations différentielles lors des phases d'humidification avec la courbe verte au-dessus de la courbe orange dans les phases humides (cercles verts sur la Fig. 3). Lors des phases de séchages (cercles rouges sur la Fig. 3) les déformations différentielles reviennent à leur état initial.

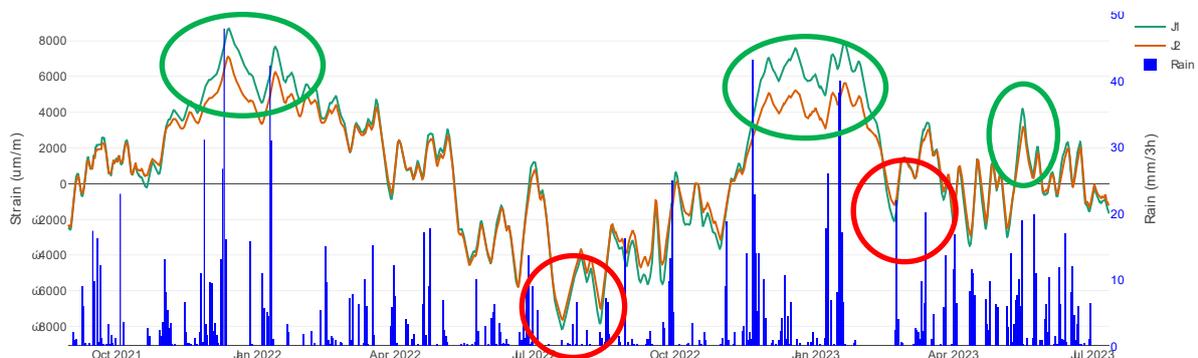


Fig. 3 : Evolution de la déformation de la lamelle supérieure (J1, en vert) et de la lamelle intermédiaire (J2, en orange) sur 20 mois (Epreuve 1)

Pour le second cas de figure, nous constatons là encore un accroissement des déformations différentielles lors des phases d'humidification. Cependant, il semble que la répétition des cycles de retrait/gonflement entraîne un déplacement irréversible d'une lamelle par rapport à l'autre. Sur la Fig. 4 (repère A), lors du premier cycle saisonnier, entre août 2021 et août 2022, le comportement des deux jauges est analogue à celui constaté pour le premier cas de figure.

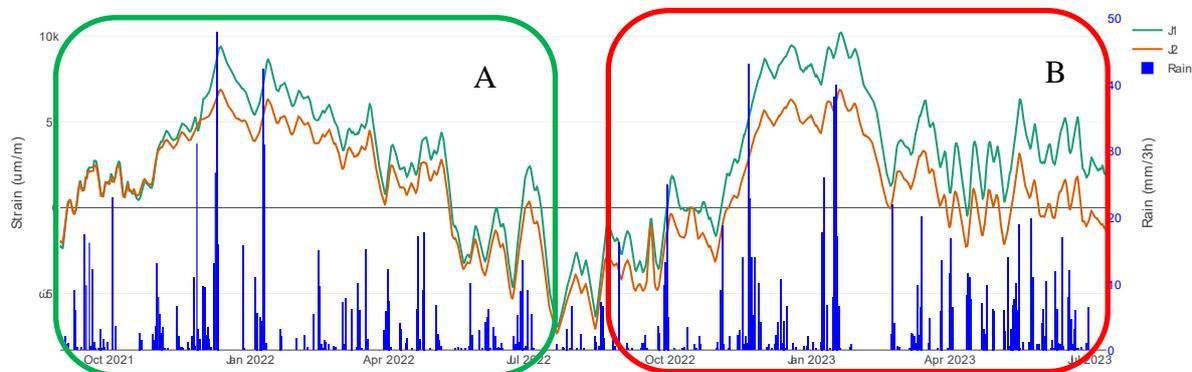


Fig. 4 : Evolution de la déformation de la lamelle supérieure et de la lamelle intermédiaire: Jauge supérieure J1 en vert, Jauge inférieure J2 en orange (Epreuve 2)

En revanche, lors du deuxième cycle saisonnier, les déformations différentielles observées lors de la phase d'humidification, ne décroissent pas lors de la phase de séchage (Fig. 4 repère B). Nous avons donc, pour certaines éprouvettes, des comportements spécifiques d'une lamelle à l'autre. Une des conséquences de ce phénomène pourrait être un endommagement du joint de colle.

#### Evolution des taux de délamination

L'analyse des taux de délamination en fonction des conditions de vieillissement met en évidence l'apparition de délaminations dès 6 mois en extérieur. La Fig. 5 illustre les délaminations observées sur une éprouvette après un an d'exposition en extérieur. Nous constatons dans ce cas des délaminations sur environ 2 mm de profondeur sur une seule face du joint supérieur et inférieur.

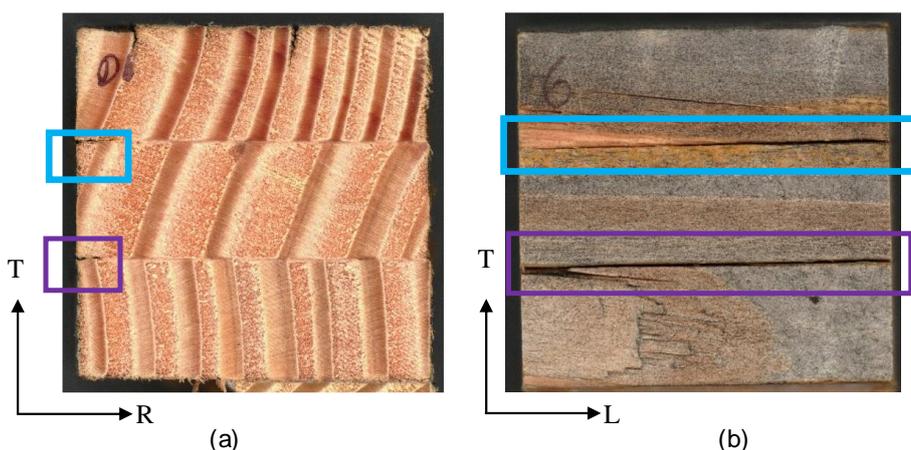


Fig. 5 : Délaminations sur des échantillons d'une éprouvette après 1 an d'exposition en extérieur sans chargement : (a) : plan TR ; (b) : plan TL

Ces taux de délamination peuvent être assez hétérogènes sur les échantillons issus d'une même éprouvette. L'évolution des taux de délamination moyen en fonction de la durée d'exposition en extérieur ne met pas en évidence de tendance remarquable et les taux de délaminations restent

de manière générale faibles avec un taux de délamination moyen mesuré à 5.5 % pour l'éprouvette exposée 12 mois en extérieur non chargée qui est l'éprouvette la plus délaminée.

### Evolution de la résistance en cisaillement

Les résultats des essais mécaniques en cisaillement montrent une diminution conséquente de la résistance en cisaillement dès les 6 premiers mois d'exposition en extérieur, avec une diminution moyenne de 21 % pour la série « 6 mois » et de 26 % pour la série « 6 mois chargé ». Si l'on s'intéresse maintenant aux effets à plus long-terme (Fig. 6), les propriétés ne montrent pas de tendance d'évolution significative. Seuls les échantillons exposés 24 mois sans chargement présentent des résistances de cisaillement significativement plus faibles que les autres échantillons exposés en extérieur.

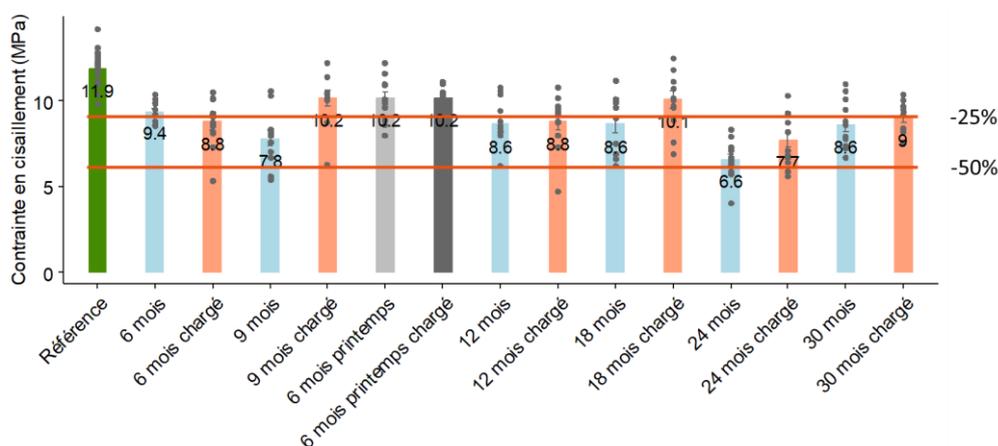


Fig. 6 : Evolution de la résistance en cisaillement après 24 mois d'essais. Les seuils (en rouge) sont déterminés en prenant la valeur moyenne de résistance de référence à 100 %

Une particularité de ces résultats concerne l'apparition d'échantillons avec des propriétés très faibles, sous le seuil des 50 % (échantillons sur la Fig. 6 où la contrainte est inférieure à 6 MPa). Nous avons donc une hétérogénéité qui apparaît avec le vieillissement qui se traduit par des zones de faible résistance en cisaillement au sein des éprouvettes.

### Conclusion

Ces résultats mettent en évidence l'apparition de déformations différentielles entre les lamelles de part et d'autre des joints de colle. Ces déformations différentielles sont à l'origine de sollicitations mécaniques à l'interface collée. Ces sollicitations mécaniques semblent être à l'origine de l'apparition de délaminations cependant celles-ci restent limitées à quelques millimètres de profondeur au niveau des faces extérieures. L'évolution des résistances au cisaillement met, quant à elle, en évidence des dégradations importantes avec, dès 6 mois, des éprouvettes avec une diminution moyenne de la résistance au cisaillement de 25 % et localement des échantillons avec des résistances 50 % plus faibles que les échantillons de référence. Le taux de délamination semble donc être un indicateur insuffisant pour attester de la dégradation mécanique d'un joint de colle.

L'évolution de la résistance au cisaillement des joints de colle montre que d'autres mécanismes de dégradations que les délaminations sont à l'origine d'une dégradation des propriétés mécaniques de l'interface collée.

Les observations macro et microscopiques réalisées à ce jour ne nous ont cependant pas permis d'identifier le mécanisme de dégradation à l'origine de cette dégradation. Celle-ci pouvant être

associée à un phénomène de fatigue lié aux sollicitations hygromécaniques ou à une dégradation chimique des joints de colle par exemple.

## Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier l'agglomération de Tarbes Lourdes Pyrénées, L'IUT de Tarbes et la Région Occitanie pour leur support financier, ainsi qu'Emmanuel LAUGT pour son soutien technique et ses précieux conseils dans le cadre du développement du système de suivi.

## Références

AFNOR (2005a) NF EN 1995-1-1 : Eurocode 5—Conception et calcul des structures en bois—Partie 1-1 : Généralités—Règles communes et règles pour les bâtiments.

AFNOR (2005b) NF EN 1995-2 : Eurocode 5—Conception et calcul des structures bois—Partie 2 : Ponts.

AFNOR. (2012) NF EN 408+A1, Structures en bois—Bois de structure et bois lamellé-collé—Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques.

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

Baude M, Colin A, Calipel C, Duvernoy J, Foussard A (2022, Chiffres clés du climat—France, Europe et Monde. ISSN : 2555-7580 Cerema (2021) Réduire l'impact carbone des bâtiments, Le p'tit essentiel, 12 p.

Ehrhart T, Grönquist P, Schilling S, Steiger R, Frangi A (2021) Mechanical properties of European beech glulam after 32 years in a service class 2 environment. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000506091>

Glulam Handbook (2018) Volume 1—Histoire et développement du bois lamellé. handbook.

Greffier G, Perrin M, Eyma F, Espinosa L, Uwizeyimana P (2022) Structural Health Monitoring of glulam infrastructures with non-destructive embedded sensors, Dans The International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering (Vol. 27). Zurich, Switzerland. <https://doi.org/10.58286/27293>

Hill CAS (2019) The Environmental Consequences Concerning the Use of Timber in the Built Environment, *Frontiers in Built Environment*, Volume 5.

Hurmekoski E (2017) How can wood construction reduce environmental degradation? European Forest Institute.

IEA (2019) Global Status Report for Buildings and Construction 2019 – Analysis. IEA.

Le Roy R (2013) Ouvrages d'art en bois—Perspectives de développement en France, Présentation aux 2èmes Journées Scientifiques du GDR 3544 Sciences du bois

Racher P, Biger JP, Rouger F, Sagot G, Vidon G (1996) Structures en bois aux états limites : Introduction à l'Eurocode 5, STEP 1. Matériaux et bases de calcul. Eyrolles.

Uwizeyimana P, Perrin M, Eyma F (2020) Moisture monitoring in glulam timber structures with embedded resistive sensors: Study of influence parameters, *Wood Science and Technology*, 54(6), 1463-1478. <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01228-8>