

# Optimisation et Modélisation d'un panneau en Cross Laminated Timber au Flambement

Cédric PEREZ<sup>1</sup>, Philippe GALIMARD<sup>2</sup>, Jean-Luc COUREAU<sup>3</sup>, Alain COINTE<sup>4</sup>, Myriam CHAPLAIN<sup>5</sup>.

<sup>1</sup> Université de Bordeaux, UMR 5295, Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M), 351 cours de la Libération, 33400 Talence, France (cedric.perez@etu.u-bordeaux.fr)

<sup>2</sup> Université de Bordeaux, UMR 5295, Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M), 351 cours de la Libération, 33400 Talence, France (philippe.galimard@u-bordeaux.fr)

<sup>3</sup> Université de Bordeaux, UMR 5295, Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M), 351 cours de la Libération, 33400 Talence, France (jean-luc.coureau@u-bordeaux.fr)

<sup>4</sup> Université de Bordeaux, UMR 5295, Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M), 351 cours de la Libération, 33400 Talence, France (alain.cointe@u-bordeaux.fr)

<sup>5</sup> Université de Bordeaux, UMR 5295, Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M), 351 cours de la Libération, 33400 Talence, France (myriam.chaplain@u-bordeaux.fr)

---

*RÉSUMÉ.* Le travail présenté concerne l'étude du comportement au flambement de panneaux en CLT renforcés (Cross Laminated Timber). Cette étude s'intègre dans le cadre du projet BOIS 5+ d'INEF4 qui consiste à trouver une méthode d'optimisation de système constructif pour les bâtiments bois multi-étages. Des essais de flambement et des essais de flexion 4 points ont été réalisés sur des panneaux CLT et des panneaux de CLT renforcés. Plusieurs essais de caractérisation ont été effectués afin d'obtenir des propriétés mécaniques des lamelles des panneaux. Ces propriétés ont ensuite été injectées dans un modèle numérique du panneau de CLT au flambement. La comparaison entre le modèle numérique et les essais ont permis de mettre en avant un défaut des panneaux, une hétérogénéité entre les couches des panneaux de CLT. Ce défaut a une incidence sur le facteur d'imperfection  $\beta_c$  de l'Eurocode 5.

*ABSTRACT.* This paper deals with the study of the buckling behaviour of reinforced CLT (Cross Laminated Timber) panels. The aims of the INEF 4 project, Bois 5+, is to find a method of optimizing building system for multi-storey wood buildings. Buckling tests and bending tests were carried out on CLT panels and reinforced CLT panels. Several characterizations have been carried out in order to obtain mechanical properties of panels' wood boards. These properties were then injected into a numerical model of buckling CLT panels. The comparison between the numerical model and the tests has highlighted defects, and heterogeneity between the layers of the CLT panels. This defect affects the imperfection factor  $\beta_c$  of Eurocode 5.

*MOTS-CLÉS :* Cross Laminated Timber, résistance au flambement, rigidité en flexion, essais de flambement, modèle numérique.

*KEYWORDS:* Cross Laminated Timber, buckling resistance, bending rigidity, buckling tests, numerical model.

---

Les panneaux en bois lamellé-croisé ou Cross Laminated Timber (CLT) sont des éléments de structure, plancher, mur et même pont [?]. Les panneaux lamellés croisés se composent de planches de bois empilées alternativement à 90° et collées sur leur face supérieure et inférieure. Ils sont composés de 3 à 7 couches principalement. Depuis quelques années de nombreux bâtiments en CLT ont vu le jour à travers le monde, pouvant aller jusqu'à plus de 18 étages comme à Vancouver sur le campus de l'Université de la Colombie-Britannique en 2015. Le fait d'utiliser ces panneaux dans la construction d'ouvrage de grande hauteur est de plus en plus courante. C'est le cas en France avec vingt-quatre projets Adivbois en cours. Ces projets de grandes hauteurs vont engendrer des efforts exceptionnellement inhabituels sur les structures bois. Les études du comportement au flambement des panneaux sont peu disponibles. Un des objectifs du projet Bois 5+ de l'institut INEF4, consiste à optimiser les systèmes constructifs pour les bâtiments bois multi-étage sur des critères multi-objectifs (mécanique, thermique, acoustique...). A travers cette étude, nous proposons une méthode de renforcement des panneaux qui aura plusieurs fonctions : mécanique (rigidifier les panneaux face au flambement), et fonctionnelle (accroche pour les panneaux d'isolation et de soutien du parement) tout en réduisant la quantité de matière des panneaux. La fonction mécanique, que joueront les renforts, sera étudiée tout d'abord par des essais de flexion, afin de caractériser les panneaux de CLT par leur module de rigidité en flexion. Des essais de flambement permettront de comprendre le comportement des panneaux ainsi que de promouvoir l'efficacité des renforts dans la résistance au flambement. Par la suite, un modèle en éléments finis reproduisant un panneau de CLT soumis au phénomène de flambement sera mis en place. Le modèle sera alors comparé à la campagne d'essai des panneaux de CLT.

## 2. Campagnes expérimentales

Plusieurs campagnes expérimentales ont été mises en œuvre lors de cette étude. Deux campagnes d'essais sont réalisées sur dix panneaux entiers. Huit panneaux ont subi une découpe au sein du laboratoire afin que les dix panneaux aient la même longueur de 2500 mm. Les panneaux sont composés de 3 couches en épicea classé C24. Les couches extérieures sont de 15 mm d'épaisseur et la couche intérieure de 20 mm. La largeur des panneaux est de 500 mm. Un renfort de section 35x70 mm<sup>2</sup> en bois de classe C24 a été collé (Colle : PURBOND HB S709) en laboratoire sur six des panneaux. Parmi ces six renforts la moitié ont une longueur de 1750 mm et l'autre moitié de 2320 mm. Ensuite 5 panneaux ont été sciés au sein du laboratoire afin d'en extraire trois « sandwichs ». Ces sandwichs sont composés de trois couches, une lamelle sur chaque couches extérieures et d'une multitude de lamelles transverses sur la couche intérieure. La section des sandwichs est de 50 mm d'épaisseur pour 111 mm de largeur. Pour finir nous avons taillé les sandwichs afin de récupérer les lamelles des panneaux (111x14 mm<sup>2</sup>). Des essais de flexion 4 points et 3 points ont été réalisés sur les sandwichs et les lamelles afin d'obtenir leurs propriétés mécanique (le module d'Young longitudinal ( $E_L$ ) et une estimation du cisaillement roulant ( $G_{RT}$ )). Ces essais sont conformes à la norme NF EN 408 [?]. Les propriétés mécaniques jouent un rôle majeur dans la rigidité des panneaux de CLT [?]. Les panneaux de CLT ont été testés en flexion 4 points. Ces essais ont permis d'obtenir la rigidité des panneaux. Cette rigidité permet d'obtenir une première estimation de la force critique d'Euler. Cette force critique d'Euler [??] est la charge maximale théorique que peut soutenir un élément soumis au phénomène de flambement. Les panneaux (??) ont subi des cycles charge-décharge en déplacement imposé pour pouvoir mesurer l'évolution de la raideur en fonction des cycles et estimer l'asymptote de la charge critique d'Euler [?] . Enfin, nous avons amené les panneaux jusqu'à la rupture afin d'obtenir le comportement post pic de la courbe Force-Déplacement(??).

$$F_{cr} = \frac{\Pi^2 EI}{l^2} \quad (1)$$

$EI$  rigidité en flexion du panneau de CLT,  $l$  longueur de flambement du panneau.

Les essais de flambement ont été réalisés pour les 6 panneaux renforcés et les 4 non-renforcés. Une articulation a été placée à chaque extrémité des panneaux, ce qui permet d'obtenir une longueur de flambement équivalente à la longueur des panneaux.

## 3. Résultats

Les essais de caractérisation, les essais sur les lamelles et les sandwichs nous ont permis d'obtenir le module longitudinal des lamelles,  $E_{L,moyen} = 10,2$  GPa, qui est légèrement inférieur au résultat attendu pour un bois de classe C24. Le module de cisaillement roulant moyen,  $G_{RT} = 0,17$  GPa, est quatre fois plus important que celui proposé par le Manuel CLT [?]. Ces résultats nous ont permis de remonter jusqu'à la rigidité des panneaux. En effet le Manuel CLT donne une approche simplifiée et très semblable à celle de l'annexe B de l'Eurocode 5 [?]. Cette approche est la méthode Gamma [??] [??] [?].

$$(EI)_{eff} = \sum_i (E_{L,i} I_i + \gamma_i A_i E_{L,i} a_i^2) \quad (2)$$

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \Pi^2 E_{L,i} A_i \frac{\bar{h}_i}{G_{RT,i} b_i l_i^2}} \quad (3)$$

Où  $(EI)_{eff}$  est la rigidité efficace en flexion du panneau,  $E_{L,i}$  le module d'Young des planches longitudinales ( $E_{L,i} = E_{0,mean} = 11$  GPa),  $I_i$  l'inertie des planches longitudinales,  $\gamma_i$  le module de raccordement,  $A_i$  la section des planches longitudinales et  $a_i$  l'écart entre le centre géométrique du panneau et celui des planches,  $\bar{h}_i$  est l'épaisseur des couches de panneaux dans la direction perpendiculaire à l'action,  $G_{RT,i}$  est le cisaillement roulant des planches perpendiculaire à l'action ( $G_{RT,i} = G_{mean}/10 = 0,069$  GPa),  $b_i$  la largeur des planches longitudinales et  $l_i$  la longueur des planches longitudinales.

Nous avons comparé la rigidité moyenne des essais des panneaux non renforcés,  $EI_{moyen,essais,SR} = 5,910^7 \text{kN.mm}^2$ , avec la rigidité moyenne des panneaux reconstitués par la méthode Gamma,  $EI_{moyen,gamma} = 4,910^7 \text{kN.mm}^2$ , et nous avons trouvé une différence de 20% entre les deux. Un essai complémentaire a été réalisé en utilisant des cales en téflons au niveau des appuis. Cet essai a permis de montrer, que lors de nos essais de flexion sur les panneaux, nous n'avions pas pris en compte l'influence du frottement sur la rigidité globale des panneaux,  $EI_{essais,teflon} = 5.19 \times 10^7 \text{kN}$ . Les rigidités des panneaux renforcés obtenues par les essais de flexion et par la méthode Gamma sont proches car des cales ont été mises lors des essais,  $EI_{moyen,essais,R} = 15,010^7 \text{kN.mm}^2$   $EI_{moyen,gamma} = 14,510^7 \text{kN.mm}^2$ . La rigidité des panneaux renforcés a donc été multiplié par trois. Les essais de flambement nous ont permis d'obtenir les courbes Force déplacement de chaque panneaux (?). Ces courbes nous fournissent deux renseignements importants sur les panneaux qui sont la charge maximale que peut supporter un panneau et sa raideur. Nous avons constaté une raideur des panneaux recoupés bien plus faible que celle des panneaux non recoupés. Cette différence de raideur peut être le signe de défauts dans le panneau. Les panneaux renforcés résistent à une charge deux fois plus importante  $F_{moyen,panneau} = 72 \text{kN}$ ,  $F_{panneau,renfort} = 145 \text{kN}$ . De plus la différence de longueur des renforts n'a pas d'impact sur la résistance des panneaux au flambement. A la rupture des panneaux, les fibres de la couche en compression subissent une déformation « plastique » ce qui entraine une rupture fragile des fibres de la couche de traction.



Figure 1. Dispositif d'un essai de flambement.

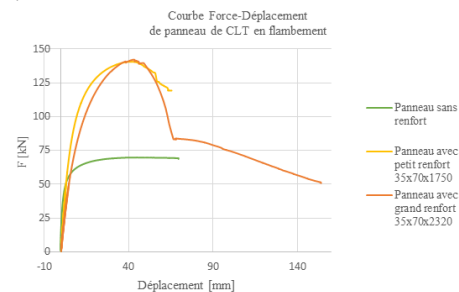


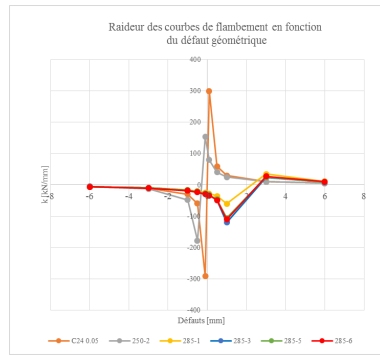
Figure 2. Courbe Force-Déplacement de panneaux de CLT avec et sans Renfort

#### 4. Modèle numérique

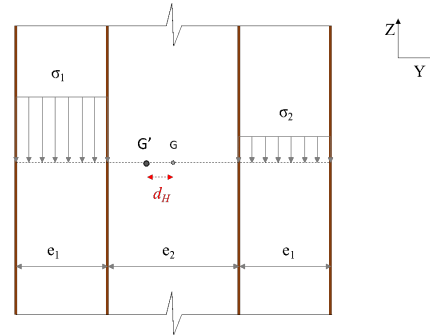
Le modèle de panneau CLT est une reconstitution 3D, par le logiciel éléments finis Cast3M, où chaque lamelle est représentée. La liaison entre les lamelles est considérée comme parfaite. Le module longitudinal des lamelles correspond au module élastique des essais de caractérisation. Les autres caractéristiques proviennent des rapports donnés dans la littérature, [?]. Les conditions d'appuis et de chargements sont situés sur une droite, au milieu de chaque extrémités du panneau. Lors de la réalisation du maillage, il est possible d'imposer une flèche initiale en milieu de portée, représentant un défaut géométrique dans le panneau. Ce modèle permet d'obtenir l'évolution de la flèche en fonction de la force en déplacement imposé. La courbe force-flèche forme un plateau lorsque le modèle atteint la force critique de flambement. Le modèle montre une diminution de la raideur initiale en fonction du défaut géométrique imposé. De plus, la courbe Raideur-Défaut, montre que la raideur est infiniment grande quand les défauts (géométriques, mécaniques ...) sont infiniment petits, et/ou qu'ils se compensent (?). Nous remarquons d'après la Figure 3 que les panneaux recoupés (285) ont une raideur qui augmente lorsque l'on impose un défaut de flèche initial de 2 mm. Lors des essais de caractérisation des lamelles, les modules moyens des couches étaient différents. Cette hétérogénéité provoque un déséquilibre du panneau. Ainsi l'axe neutre du panneau est excentré, il passe du point G au point G' (?). Le défaut d'hétérogénéité du panneau s'exprime sous la forme [?]:

$$d_H = e_1 + \frac{e_2}{2} - \frac{e_1(\alpha + 2e_2)}{2(\alpha + 1)} \quad (4)$$

Où  $d_H$  est le défaut d'hétérogénéité (mm),  $e_1$  est l'épaisseur des lamelles longitudinales (15 mm),  $e_2$  est l'épaisseur de la couche transversale (20 mm),  $\alpha$  est le rapport des modules moyens des couches longitudinales de même déformation.



**Figure 3.** Dispositif d'un essai de flambement.



**Figure 4.** Courbe Force-Déplacement de panneaux de CLT avec et sans Renfort

Ce défaut a un impact sur le facteur d'imperfection  $\beta_c$  définit l'Eurocode 5. En effet ce coefficient permet de simplifier le calcul en faisant une estimation des imperfections de la poutre, pour le facteur  $\eta$  [??] :

$$\eta = \frac{e_0 A}{I_G} = \beta_c (\lambda_{rel} - 0,3) \quad (5)$$

Où  $e_0 = d_H$  est un défaut (mm),  $A$  est la section du panneau,  $I_G/v'$  est le module d'inertie,  $\beta_c$  est le facteur d'imperfection et  $\lambda_{rel}$  est l'élancement relatif.

L'eurocode 5 donne, à ce jour, deux valeurs de  $\beta_c$ , 0,2 pour le bois massif et 0,1 pour le bois lamellé-collé. L'avis technique de Leno [?] propose d'utiliser pour le CLT le même coefficient d'imperfection que le bois lamellé-collé. En comparant la charge moyenne des essais  $F_{moyen,panneau} = 72$  kN avec celle fournie par l'Eurocode 5 en fonction des trois facteurs ( $\eta$ ,  $\beta_c = 0,2$ ,  $\beta_c = 0,1$ ), nous remarquons que les coefficients d'imperfections sont tous les trois sécuritaire ( $F_\eta = 55,6$  kN  $F_{\beta_c=0,2} = 51,9$  kN,  $F_{\beta_c=0,1} = 53,7$  kN). Le calcul le plus défavorable est pour le coefficient d'imperfection du bois massif. Comme le préconise l'avis technique de Leno, le coefficient d'imperfection du CLT peut être identique au coefficient d'imperfection du bois lamellé-collé.

## 5. Conclusion

Les essais de flambement ont mis en avant des défauts au sein du panneau (défaut d'usinage, excentrement de la charge, mise en œuvre) qui ont un impact important sur la raideur initiale des panneaux. Ces défauts initiaux ont également une répercussion sur la force critique au flambement. Le modèle réalisé sur Cast3M montre une bonne corrélation avec les essais. Le modèle a mis en avant le défaut d'hétérogénéité entre les couches des panneaux. Ce défaut est pris en compte dans l'Eurocode 5 par le facteur d'imperfection  $\beta_c$ , le modèle a permis de choisir une valeur de ce coefficient. En effet, le défaut d'hétérogénéité peut être évité en vérifiant, en amont de l'assemblage, les propriétés mécaniques des lamelles des panneaux de CLT, afin d'établir une position homogène des lamelles au sein des couches longitudinales.