
Comportement au flambement d'un panneau de CLT

**Cédric PEREZ¹, Philippe GALIMARD², Jean-Luc COUREAU³,
Thomas GARNESSON⁴, Alain COINTE⁵.**

¹Université de Bordeaux, I2M, mail : cedric.perez@etu.u-bordeaux.fr

²Université de Bordeaux, I2M, mail : philippe.galimard@u-bordeaux.fr

³Université de Bordeaux, I2M, mail : jean-luc.coureau@u-bordeaux.fr

⁴Université de Bordeaux, NOBATEK, mail : tgarnesson@nobatek.com

⁵Université de Bordeaux, I2M, mail : alain.cointe@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. Les essais de flambement se sont déroulés sur des éprouvettes bi-articulées asservies en déplacement. Des essais de flexion ont été réalisés dans un premier temps afin de comprendre le comportement des panneaux CLT et d'obtenir la rigidité en flexion des panneaux. Les éprouvettes se composent de trois catégories, des panneaux sans renfort, des panneaux avec des renforts de 35x70x1750 mm³ et des panneaux avec renfort de 35x70x2320 mm³. Les résultats d'essais permettent d'étudier l'influence de la taille des renforts sur la résistance au flambement des panneaux CLT, ainsi que l'influence des défauts sur le phénomène de flambement. Les renforts vont permettre d'optimiser les sections des panneaux de CLT et ainsi réduire le poids propre des bâtiments de grande hauteur.

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. The buckling tests were carried out on pinned ends specimens and are controlled in displacement. Bending tests were carried out initially in order to understand the behaviour of CLT panels and to get the panels' bending rigidity. The specimens consist of three categories, panels without reinforcement, panels with reinforcement 35x70x1750mm³, and panels with reinforcement 35x70x2320mm³. The experimental results are used to study the influence of the reinforcement sizes on the buckling resistance of CLT panels and the influence of the defects on the buckling phenomenon. The reinforcements will optimize the sections of the CLT panels and so reduce the weight of high buildings.

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

KEY WORDS: Cross Laminated Timber, buckling resistance, bending rigidity, buckling tests.

1. Introduction.

Les panneaux en bois lamellé-croisé ou Cross Laminated Timber (CLT) sont des éléments de structure, plancher, mur et même ponts [SIG 12]. Les panneaux lamellé-croisé 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. Ce matériau est reconnu pour ses grandes performances thermiques, son bon comportement au feu et sa résistance structurelle ainsi que pour sa facilité de mise en œuvre. Les panneaux utilisés dans la réalisation des murs ont les couches extérieures orientées parallèlement aux charges verticales de compression. De cette façon la résistance du mur est maximale par rapport au flambement.

Depuis quelques années de nombreux bâtiments en CLT ont vu le jour à travers le monde, pouvant aller jusqu'à plus de 9 étages, comme l'exemple du « Stadhaus » à Londres. L'idée d'utiliser ces panneaux dans la construction d'ouvrage de grande hauteur est de plus en plus courante. C'est le cas d'un projet de l'architecte Jean-Paul Viguier dans le cadre d'Euratlantique (projet urbain de Bordeaux), la tour de logement est en panneau lamellé croisé de 7000 m², 57 mètres de haut soit 18 niveaux en plein cœur de Bordeaux. Un autre appel à projet se déroule aussi à Vienne, le projet Hoho, qui consiste à élaborer une tour de plus de 80 mètre au centre de la ville.

Ces projets de grandes hauteurs vont engendrer des efforts exceptionnellement importants pour 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) (Figure 1). 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. Par la suite des essais en flambement permettront de comprendre le comportement des panneaux ainsi que de promouvoir l'efficacité des renforts dans la résistance au flambement.

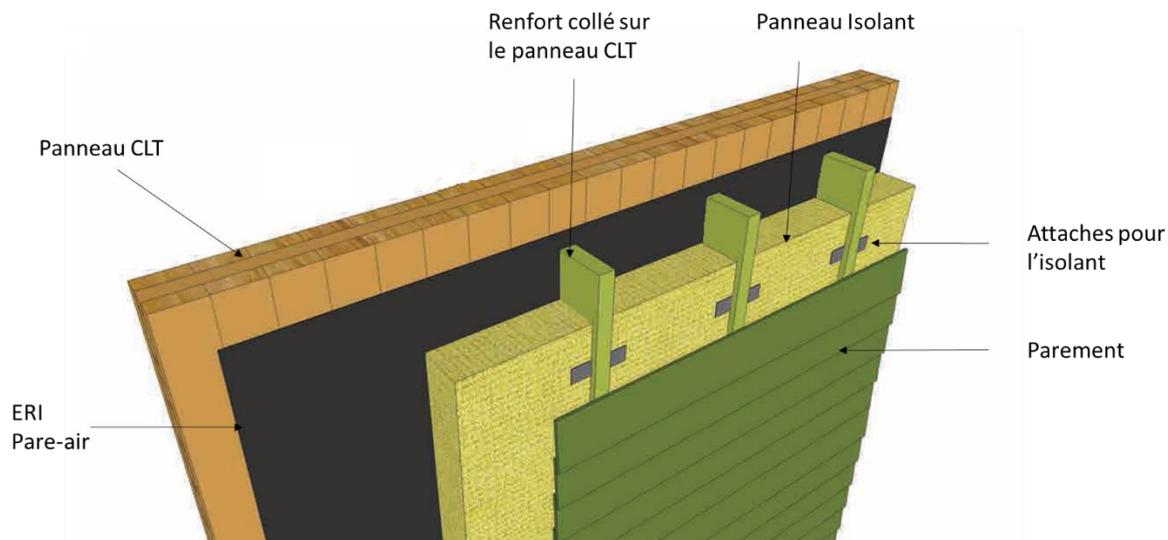


Figure 1. Panneaux de CLT renforcés avec isolant.

2. Campagne expérimentale

L'idée principale qui ressort du projet d'INEF⁴ est d'optimiser les systèmes constructifs. Le but est de coller des renforts sur des panneaux de CLT afin de minimiser la section des panneaux CLT. L'entreprise SACBA a fourni les panneaux trois couches de CLT de deux longueurs différentes, une de 2850 mm et l'autre de 2500 mm (Tableau 1). Les panneaux sont composés de planches C24 en épicea.

Les panneaux de 2850 mm ont été recoupés à une longueur de 2500 mm. Ainsi nous avons dix panneaux de section de 50x500 mm² avec les couches extérieurs de 15 mm. Huit panneaux sont donc recoupés. Dans un premier temps, des essais de flexion des panneaux ont été réalisés. Dans un second temps, afin d'augmenter la rigidité en flexion des panneaux, des renforts de classe C24 et de section 35x70 mm² de deux longueurs différentes (1750 mm et 2320 mm) ont été collés sur certains des panneaux en laboratoire (Colle : PURBOND HB S709). Ils ont ensuite subi un nouvel essai de flexion. Dans un troisième temps, tous les panneaux sans renfort et avec renfort ont été testés au flambement. Les essais se sont déroulés dans des conditions de température de 20°C et d'humidité relative de 65%.

Les essais de flexion et de flambement ont été réalisés avec une presse multifonction Quiri Hydro Systems composée de deux vérins d'une poussée de 250 kN chacun. La charge est mesurée à l'aide de capteur force d'une précision de 200 N. Les déplacements ont été mesurés par des capteurs à fils AK industries CD50.

Nom	Classe des Planches	Longueur livrée [mm]	Panneaux recoupés à 2500 mm	Section [mm ²]	ρ masse volumique à 12% [kg/m ³]	Panneau avec renfort	Classe	Longueur [mm]	Section [mm ²]
250-1	C24	2500	✗	50x500		✗			
250-2	C24	2500	✗	50x500	420	✗			
285-4	C24	2850	✓	50x500	465	✗			
285-5	C24	2850	✓	50x500	476	✗			
285-6	C24	2850	✓	50x500	466	✓	C24	1750	35x70
285-7	C24	2850	✓	50x500	469	✓	C24	1750	35x70
285-8	C24	2850	✓	50x500		✓	C24	1750	35x70
285-1	C24	2850	✓	50x500	463	✓	C24	2320	35x70
285-2	C24	2850	✓	50x500	494	✓	C24	2320	35x70
285-3	C24	2850	✓	50x500	475	✓	C24	2320	35x70

Tableau 1. Caractéristiques géométriques des panneaux et des renforts.

2.1. Essais de flexion.

Les essais de flexion respectent la norme NF EN 408. Le but de ces essais est d'obtenir les rigidités locales en flexion pure de chaque panneau pour pouvoir calculer la charge critique d'Euler avant de réaliser l'essai de flambement.

Les essais de flexion 4 points (Figure 2) se sont déroulés avec la presse multifonction. Les appuis sont des cylindres en acier espacés de 2250 mm. Des cales en bois ont été disposées sous les vérins afin d'éviter le poinçonnement dû à la compression transversale aux fibres des planches extérieures. La distance entre appui et vérin est de 710 mm. Deux capteurs à fils mesurent la flèche en milieu de travée. Deux autres capteurs mesurent le déplacement à une distance de 320 mm du milieu de travée. Nous avons réalisés des essais cycliques, en restant toujours dans le domaine élastique du panneau. Deux cycles avec les deux vérins asservis en déplacement. Une charge maximale de 7,5 kN pour les panneaux sans renfort et de 9,5 kN pour les panneaux renforcés, soit 60% de l'estimation de la résistance estimée par l'Eurocode 5. Puis deux cycles avec chaque vérin seul.



Figure 2. Dispositif de flexion 4 points d'un panneau CLT avec renfort suivant la norme NF EN 408.

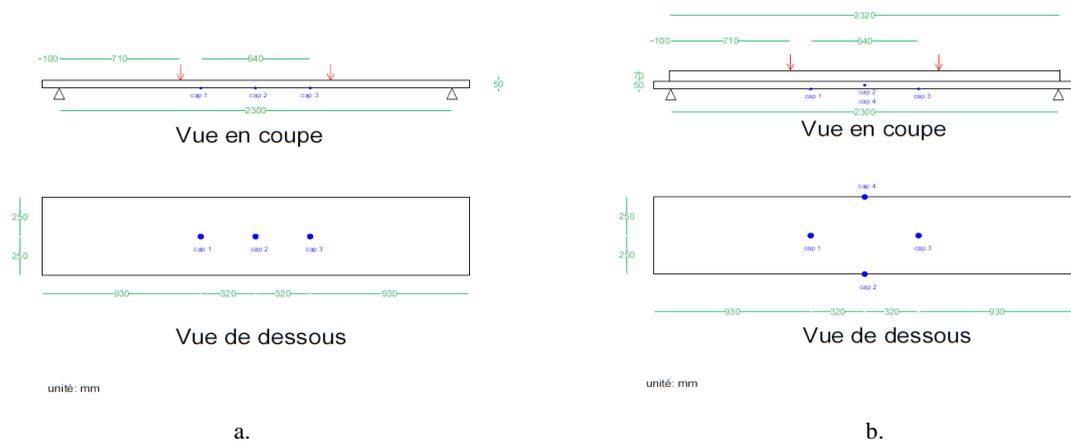


Figure 3. Schéma des essais de flexion 4 points **a.** panneau de CLT sans renfort. **b.** panneau de CLT avec renfort (2320mm).

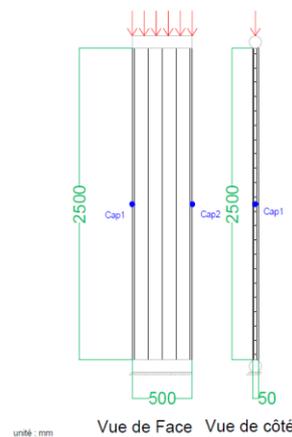
2.2. Essais de flambement.

Les essais de flambement ont été réalisés avec le même procédé pour les 10 éprouvettes (Figure 4). Un système bi-articulé a été placé aux extrémités de chaque panneau afin d'obtenir, lors des essais, une longueur de flambement égale à la longueur du panneau. Des essais ont été réalisés afin de vérifier que le dispositif n'influence pas la direction de flambement des panneaux.

Les essais de flambement ont été réalisés en deux étapes, la première afin d'obtenir des courbes de flambement jusqu'au pic de forces. Les panneaux ont subi plusieurs cycles charge-décharge afin d'observer l'évolution de la rigidité. La seconde étape consiste à obtenir le comportement post-pic de la force et le mode de ruine.



a.



b.

Figure 4. Dispositif d'un essai de flambement. **a.** Panneau CLT renforcé. **b.** Schéma d'un panneau de CLT.

3. Résultats.

3.1. Essais de flexion.

3.1.1. Calculs analytiques des rigidités

La rigidité en flexion d'un panneau CLT peut être calculée à partir de plusieurs méthodes. L'annexe B de l'Eurocode 5 [EN 95] donne la rigidité efficace d'un assemblage mécanique de poutres assemblées mécaniquement [1].

La méthode Gamma [FPI 11], approche équivalente de l'annexe B, reprend certaines hypothèses de l'Eurocode 5 mais suppose que seules les couches orientées dans la direction longitudinale supportent la charge. Néanmoins

nous tenons compte de la déformation transversale des couches croisées, en prenant en considération leur module de cisaillement roulant (G_{RT}). Il est donc possible de supposer le système comme des poutres (couches longitudinales), raccordées entre elles par des liaisons, qui ont la rigidité de cisaillement roulant des couches croisées [2].

Une autre méthode peut être utilisée pour calculer cette rigidité, celle de Kreuzinger [FPI 11]. Dans cette méthode les caractéristiques du CLT sont séparées par deux poutrelles virtuelles (A et B). On applique pour la poutre A la somme des rigidités de flexion de chaque pli, tandis qu'on applique à la poutre B la rigidité en flexion liée aux efforts de liaisons, la déformation due au cisaillement du panneau, ainsi que la flexibilité de toutes les connexions. Ces deux poutres sont assemblées par des éléments de rigidité infinie. En combinant le moment de flexion et les forces de cisaillement des deux poutres, on obtient le résultat final pour la section totale croisée.

En comparant ces deux théories, on obtient une différence de 1%. Par sa simplicité de mise en œuvre nous utiliserons la méthode Gamma dans la résolution analytique pour comparer l'essai au théorique.

$$(EI)_{eff} = \Sigma(E_{L,i}I_i + \gamma_i A_i E_{L,i} a_i^2) \quad [1]$$

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \pi^2 E_{L,i} A_i \frac{\bar{h}_i}{G_{RT,i} b_i l_i^2}} \quad [2]$$

Où $(EI)_{eff}$ est la rigidité efficace en flexion du panneau, $E_{L,i}$ le module d'Young des planches longitudinales ($E_{0,mean} = 11$ GPa), I l'inertie des planches longitudinales, γ le module de raccordement, A la section des planches longitudinales et a l'écart entre le centre géométrique du panneau et celui des planches, \bar{h} 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 ($G_{RT} = G_{mean}/10 = 0,069$ GPa), b la largeur des planches longitudinales et l la longueur des planches longitudinales.

La rigidité en flexion des panneaux renforcés reprend la méthode Gamma. Puisque le renfort est collé au panneau de CLT, nous considérons que le coefficient de raccordement est égal à 1. De plus ce renfort va engendrer un déplacement du centre de gravité en G, ce qui implique un excentrement de la charge appliquée en G1 de 6 mm (Figure 5).

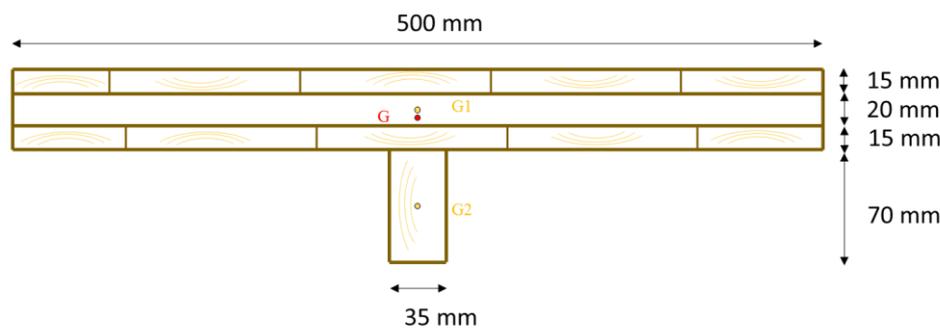
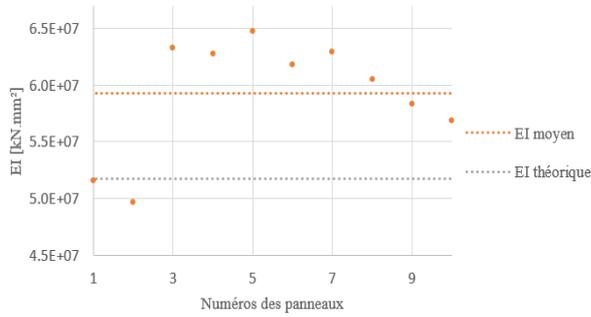


Figure 5. Coupe d'un panneau CLT renforcé testé au flambement ($G1$ centre de gravité du CLT, $G2$ centre de gravité du renfort, G centre de gravité du panneau CLT renforcé).

3.1.2. Résultats expérimentaux.

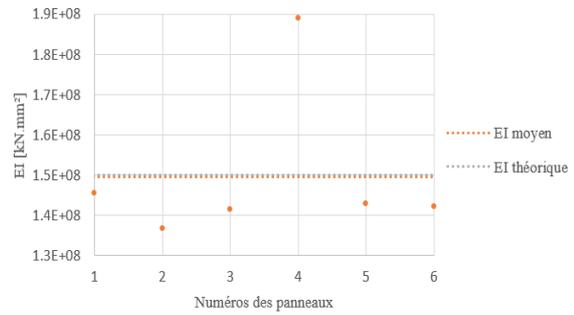
La rigidité théorique calculée sur la base des valeurs moyennes nominales du bois (EI théorique) est de $5,18 \times 10^7$ kN.mm² tandis que la rigidité moyenne des essais (EI moyen) est supérieure, $5,92 \times 10^7$ kN.mm² soit une différence de 15% (Figure 6a). Cette variation peut s'expliquer par la grande variabilité du bois [GUI 04]. Cette différence n'apparaît plus lorsque l'on réalise les essais de flexion avec les panneaux et leur renfort collé. Nous obtenons une rigidité de flexion théorique et expérimentale de $15,0 \times 10^7$ kN.mm² (Figure 6b).

Variabilité des rigidités de flexion efficace des panneaux sans renfort



a.

Variabilité des rigidités de flexion efficace des panneaux avec renfort



b.

Figure 6. a. Comparaison de la rigidité de flexion des essais sans renfort avec la rigidité de flexion théorique. **b.** Comparaison de la rigidité de flexion des essais avec renfort avec la rigidité de flexion théorique.

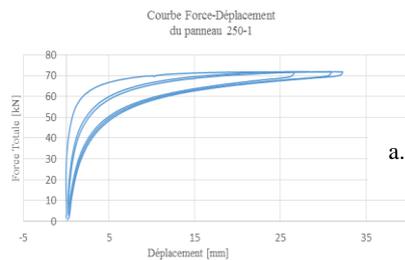
3.2. Essais de flambement.

3.2.1. Analyse des panneaux sans renfort.

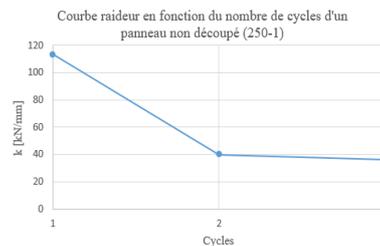
Les courbes Force-déplacement (Figure 7) nous donnent des informations sur la résistance des panneaux au flambement ainsi qu'une idée de l'effet sur le flambement des défauts du panneau.

Les défauts initiaux se remarquent par la raideur initiale des panneaux (Figure 7b et 7d). Le panneau 250-1 n'ayant pas subi d'usinage en pied possède une raideur initiale importante ($k = 113 \text{ kN/mm}$) ce qui n'est pas le cas du panneau 285-5 qui a été usiné ($k = 10.1 \text{ kN/mm}$). Nous pouvons également remarquer que le nombre de cycle n'influence pas sur la résistance au flambement malgré cette chute de raideur (Figure 7a et 7c).

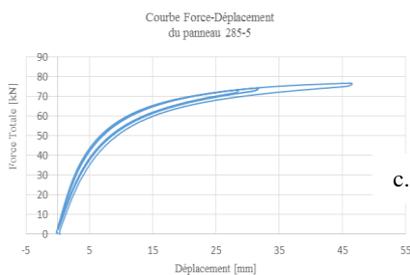
A la rupture des panneaux, les fibres de la couche en compression subissent une déformation « plastique » ce qui entraîne une rupture fragile des fibres de la couche en traction.



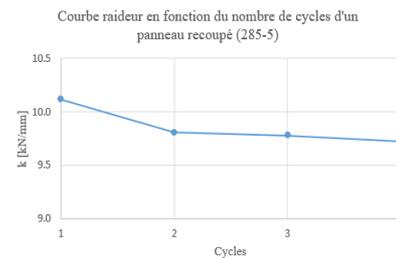
a.



b.



c.



d.

Figure 7. a. Courbes Force-déplacement d'essais de flambement d'un panneaux non usiné (250-1) **b.** Rapport entre la raideur et le nombre de cycles des essais de flambement d'un panneau non usiné (250-1) **c.** Courbes Force-déplacement d'essais de flambement d'un panneaux usiné (285-5) **d.** Rapport entre la raideur et le nombre de cycles des essais de flambement d'un panneau non usiné (285-5).

Nom	Rigidité de flexion [kN.mm ²]	Force critique [kN]
250-1	5,16E+07	71,9
250-2	4,96E+07	66,9
285-4	6,33E+07	76,4
285-5	6,28E+07	76,7

Tableau 2. Rigidité en flexion et Force critique des panneaux CLT sans renfort.

3.2.2. Analyse des panneaux avec renfort.

Les panneaux renforcés ont une résistance au flambement deux fois supérieure à celle des panneaux sans renfort : 72 kN résistance au pic des panneaux non renforcés à 142 kN pour les panneaux avec renfort (Figure 8) (Tableau 2, 3a et 3b). La courbe Force déplacement montre que l'influence de la longueur des renforts sur la résistance au flambement n'est pas significative puisque les forces au pic des panneaux, avec un petit renfort ou un grand renfort, sont identiques.

La force au pic est liée à la rupture fragile du renfort (Figure 8). Après la rupture du renfort, une résistance résiduelle est observée. Elle correspond à la résistance du panneau seul (Figure 7a et 7c).

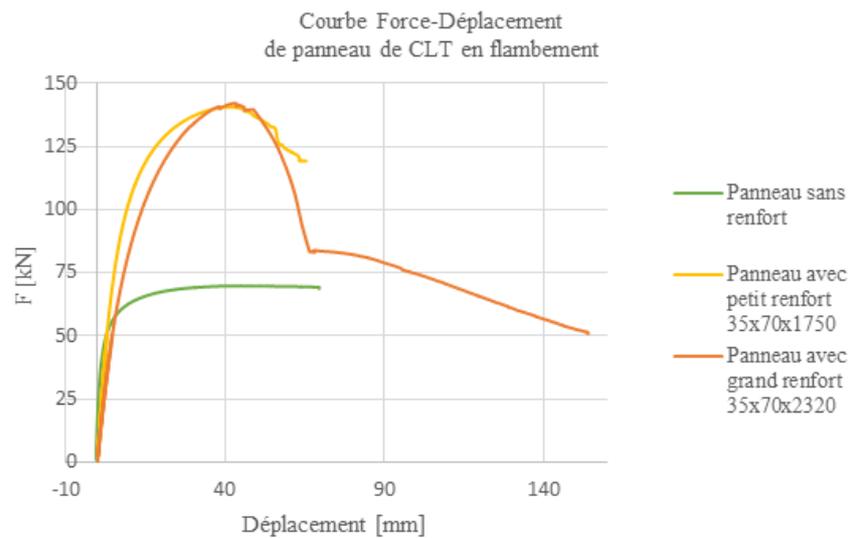


Figure 8. Courbe Force-Déplacement de panneaux de CLT avec et sans renfort.

Nom	Rigidité de flexion [kN.mm ²]	Force critique [kN]
285-6	5,16E+07	144,3
285-7	4,96E+07	142,1
285-8	6,33E+07	139,5

a.

b.

Tableau 3. a. Rigidité en flexion et Force critique des panneaux CLT avec des renforts 35x70x1750 mm³.

b. Rigidité en flexion et Force critique des panneaux CLT avec des renforts 35x70x2320 mm³

3.2.3. Comparaison avec le modèle analytique.

Nous pouvons affirmer que la différence entre les deux longueurs de renforts influence peu sur la résistance des panneaux au flambement (Figure 9). Le rapport entre la force critique et la rigidité de flexion des essais est constant. En comparant ce rapport expérimental au rapport entre la force critique d'Euler [EUL 44] et la rigidité en flexion de la méthode Gamma, nous constatons que l'écart du coefficient directeur est de 1% tandis que l'écart à l'origine est de 27%. L'approche théorique donne donc une approche intéressante mais surestime la force critique.

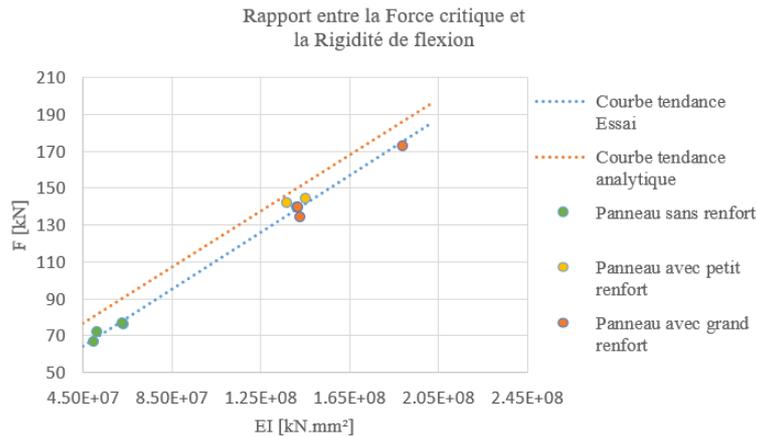


Figure 9. Comparaison des courbes de tendances Force-Rigidité de flexion, essai et analytique.

4. Conclusion.

Des essais de flexion et de flambement sur des panneaux de CLT renforcés ont été réalisés dans le cadre des objectifs du projet Bois 5+, qui a pour objectif de proposer une méthode d'optimisation de systèmes constructifs pour des bâtiments bois multi-étages. Les essais de flexion ont permis de déterminer les rigidités en flexion des panneaux qui interviennent dans la résistance au flambement [EUL 44]. 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. Il est donc nécessaire de les minimiser afin d'optimiser la résistance des panneaux. L'étude démontre que les renforts apportent une augmentation considérable de la résistance au flambement (deux fois supérieure à celle d'un panneau sans renfort). Cela implique qu'il est envisageable de réduire l'épaisseur des murs en CLT en leur ajoutant des renforts. De plus ces renforts pourront être utilisés à des fins non structurelles et permettront le soutien de parement et de panneau isolant.

Prochainement, ces essais vont être comparés avec une étude numérique, un modèle par éléments finis qui permettra d'optimiser les renforts.

5. Bibliographie.

- [EN 95] CEN., «Eurocode 5: Calcul des structures en bois. Partie 1-1 : Généralités - Règles communes et règles pour les bâtiments. Annexe B : Poutres assemblées mécaniquement.» EN 1995-1-1., Bruxelles, p 107-110, 2005.
- [EUL 44] EULER, L. « Methodus inveniendi lineas curvas : maximi minimive proprietate gaudentes, sive solutio problematis isoperimetrici latissimo sensu accepti. » Lausanne-Genève : Marcum-Michaelem Bousquet.1744
- [FPI 11] GAGNON S., PIRVU C., « Manuel CLT », FPIInnovations, Québec, Edition CANADIENNE, 2011.
- [GUI 04] GUITARD D., GRACHET C. « Paramètres structuraux et/ou ultrastructuraux facteurs de la variabilité intra-arbre de l'anisotropie élastique du bois. » Annals of Forest Science, Springer Verlag/EDP Sciences, p 129-139, 2004.
- [SIG 12] SIGRIST C., LEHMANN M., « Development of a cross laminated, post tensioned bridge deck », World Conference on Timber Engineering, Auckland Nouvelle Zélande, Juillet 2012.