

# Endommagement de poutres en LVL sous des sollicitations cycliques de flambement et de torsion

M. CHAPLAIN<sup>a</sup>, F. BOURAS<sup>b</sup>, Z. NAFA<sup>b</sup>

a. Université Bordeaux1, I2M/GCE, 351 cours de la libération-33405 Talence cedex, FRANCE

b. Université 08 mai 45, LGCH, BP 401, 24000 Guelma, ALGERIE

## Résumé :

*Le travail présenté concerne l'étude du comportement d'éléments structuraux en LVL (Laminated Veneer Lumber), soumis à des chargements cycliques entraînant une rupture par flambement ou torsion. Cette étude s'intègre dans une démarche permettant de mieux dimensionner les structures bois en zone sismique par exemple. Les essais de torsions sont réalisés sur des éprouvettes de section rectangulaire encastrées en tête et en pied avec une possibilité de glissement en tête afin d'éviter le gauchissement, ceux de flambement sont réalisés sur des éprouvettes bi-articulées. Les essais de flambement, dits de post-flambement, sont conduits dans le domaine post-pic. Le signal du chargement cyclique, en déplacement (flambement) ou couple (torsion), est triangulaire à divers niveaux et amplitudes, la fréquence est de l'ordre de 1 Hz. Un paramètre d'endommagement est calculé en analysant la dégradation de la rigidité ou l'évolution de « l'écoulement » de la déformation angulaire ou de la force avec le temps. Les résultats des essais permettent d'étudier l'influence du niveau et de l'amplitude du chargement sur l'endommagement et la durée de vie.*

## Abstract :

*This paper deals with the study of the LVL behaviour under cyclic buckling and torsional buckling until failure. The aims of this study is to better design the timber structures in seismic zones for example. Cyclic torsion tests were carried out on rectangular specimen, end restraint, with possibility of sliding head avoiding warping, buckling are realised on bi-articulated specimens. The signal of cyclic loading, displacement (buckling) or torque, is triangular at various levels and amplitudes, the frequency is holding at 1 Hz. A damage parameter is determined based on the analysis of stiffness degradation and "flow" of angular deformation and of load with time. The experimental results are used to study the influence of level and of magnitude of the loading on damage and lifetime. Modelling based on the damage theory is proposed.*

**Mots clefs :** LVL (Laminated Veneer Lumber), flambement - torsion cyclique, fatigue, dommage

## 1 Introduction

Bien que le bois soit de plus en plus utilisé dans la construction, les études sur le flambement de poteaux à base de bois ou le déversement de poutres sont très limitées. Les études du comportement cyclique de flambement ou de torsion de poteaux en bois sont quasi-inexistantes [1, 2]. A travers cette étude, nous cherchons à répondre à diverses questions : si l'instabilité d'un élément de structure ne provoque pas une instabilité globale, quel niveau et quelle durée de sollicitation cet élément peut-il reprendre avant de se rompre ? Quand doit-on changer l'élément (état de dommage) ? Quel est l'apport à la structure de cette instabilité (ductilité, dissipation d'énergie) ? Comment intégrer ce comportement au niveau réglementaire ?...

Dans cette étude, des éprouvettes en LVL, à une teneur en eau voisine de 9%, sont soumises à des chargements cycliques de compressions (flambement) et de torsion, le déversement créant de la torsion dans les poutres. Les essais de torsion sont réalisés sous un chargement triangulaire piloté en force à une fréquence de 1 Hz, ils complètent une étude réalisée sur du lamellé collé [4, 7]. Les essais de flambement sont réalisés sous un chargement cyclique triangulaire piloté en déplacement : lors de ces essais de « post-flambement », la limite d'instabilité va être dépassée. Des essais cycliques en pré-flambement jusqu'à l'atteinte de l'instabilité, non présentés ici, ont également été réalisés dans le cas où l'instabilité de l'élément serait critique pour la structure [3]. Un paramètre de dommage est calculé à partir des essais ; il devrait, en plus du temps à rupture, permettre de modéliser et prévoir l'état de dommage des éléments sous sollicitations

répétées à divers niveaux et amplitudes de chargement. Un modèle de dommage intégrant une modélisation viscoélastique du bois a été développé par les auteurs [4], il n'est pas présenté dans ce papier.

## 2 Campagnes expérimentales

### 2.1 Essais de post-flambement

Les essais de flambement sont réalisés sur 18 éprouvettes bi-articulées de  $17,5 \times 100 \times 800 \text{ mm}^3$ , modèles réduits de poteaux de constructions en bois. Les essais sont menés sous un protocole de chargement en post-flambement. Les articulations du dispositif de flambement sont composées de deux demi-cylindres, façonnés de manière à recevoir nos éprouvettes, et insérés dans des cornières (Fig. 1). Une feuille de téflon calée entre ces deux éléments nous permet d'obtenir un frottement très faible, constituant ainsi une articulation presque parfaite. La longueur de flambement est ainsi égale à la longueur de l'éprouvette soit 800 mm. Un LVDT placé à mi hauteur de la poutre, permet de mesurer l'excentricité supposée maximale en ce point [3].

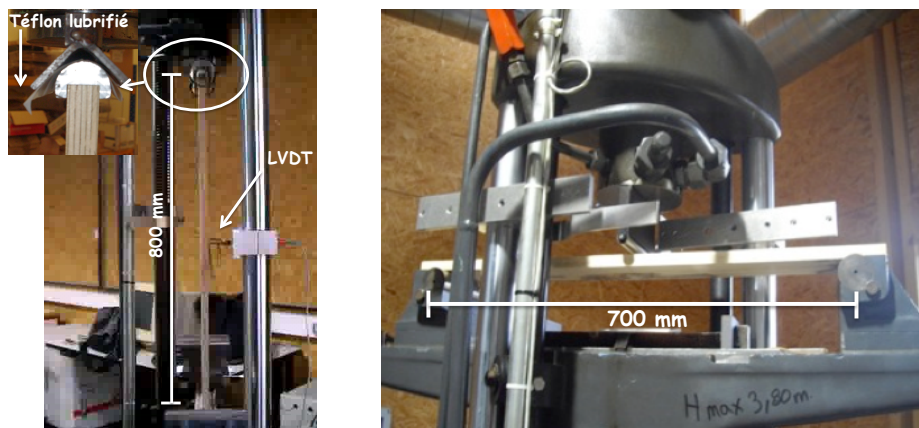


FIG. 1 – Dispositifs de flambement et de flexion 3 points sur des éprouvettes de LVL.

#### 2.1.1 Essais préliminaires de caractérisation

Au préalable des essais cycliques, des essais monotones en flexion (Fig. 1) sont réalisés dans le domaine élastique afin de déterminer le module d'élasticité longitudinal ( $E_L$ ) du LVL et ainsi calculer la charge critique d'Euler  $F_{eth}$ . On obtient un module de Young  $E_L$  moyen de 12 200 MPa, écart type de 9%. Des essais monotones de compressions sont ensuite effectués afin d'obtenir le déplacement de la traverse correspondant au début d'instabilité ( $\delta_e$ ) et la force d'instabilité  $F_e$ . Ces essais sont arrêtés juste après l'instabilité pour ne pas endommager les éprouvettes qui seront ensuite testées sous chargements cycliques. Le déplacement à l'instabilité servira de référence lors des chargements cycliques pilotés en déplacement. Les essais sont réalisés à la vitesse de 1 mm/min. L'intersection des droites de régressions des deux zones de linéarité de la courbe force-déplacement traverse permet de déterminer  $\delta_e$ ,  $F_e$ . (Fig. 2a).

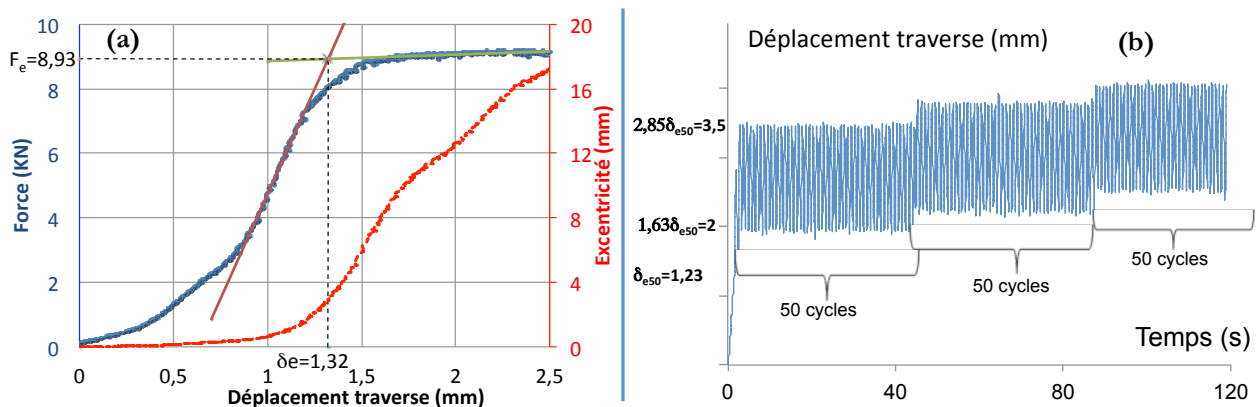


FIG. 2 – (a) Exemple de courbes force-déplacement traverse et excentricité-déplacement traverse obtenues lors d'essais statiques de flambement : détermination de  $\delta_e$  et  $F_e$ . (b) Consigne réelle des essais cycliques triangulaires, fréquence  $\approx 1,1 \text{ Hz}$ .

La valeur moyenne de  $F_c$  obtenue expérimentalement est de 8,0 kN (avec un écart type de 8%) alors que la force théorique, obtenue en supposant les articulations parfaites et en prenant le module  $E_L$  obtenu lors des essais de flexion,  $F_{eth}$  est égale à 8,1 kN (écart type de 9%). On peut donc bien assimiler notre système à une poutre bi-articulée. Nous avons aussi déterminé la valeur du déplacement correspondant à une fréquence cumulé de 50% ( $\delta_{e50}$ ) pour lequel apparaît un début d'instabilité. Cette valeur va servir de référence dans la programmation de nos essais cycliques.

### 2.1.2 Essais cycliques de post flambement

La figure 2b présente le protocole d'essai cyclique retenu : au bout de 50 cycles, le déplacement imposé est augmenté afin d'être sûr d'atteindre la rupture de l'éprouvette avant l'arrêt par surchauffe de la presse. De par l'inertie importante de la traverse de la presse (Fig. 1), la consigne programmée et réelle sont différentes : le déplacement réel de la traverse est parfois plus important que prévu et surtout présente des « imperfections ». La fréquence prévue de 1 Hz est en réalité d'environ 1,1 Hz. La consigne est la suivante : après une pré-charge jusqu'à atteindre environ 2 mm ( $\approx 1,63\delta_{e50}$ ) les éprouvettes sont soumises à un chargement cyclique triangulaire avec une amplitude de 1,5 mm ( $\approx 1,22\delta_{e50}$ ). Le chargement cyclique se fait par paquets de 50 cycles avec une augmentation de 0,3 mm ( $\approx 0,24\delta_{e50}$ ) entre deux paquets.

## 2.2 Essais de torsion

Les essais de torsion, effectués au FCBA de Bordeaux, sont réalisés sur une cinquantaine d'éprouvettes de section rectangulaire (40 x 28 mm<sup>2</sup>). La figure 3 présente le dispositif d'essai : les éprouvettes sont encastrées en tête et en pied avec une possibilité de glissement en tête afin d'éviter le gauchissement, la longueur libre est de 600 mm. La rotation mesurée est une rotation globale (rotation tête de vérin) : dans cette étude préliminaire, nous n'avons pas équipé la poutre d'un dispositif de mesure local.

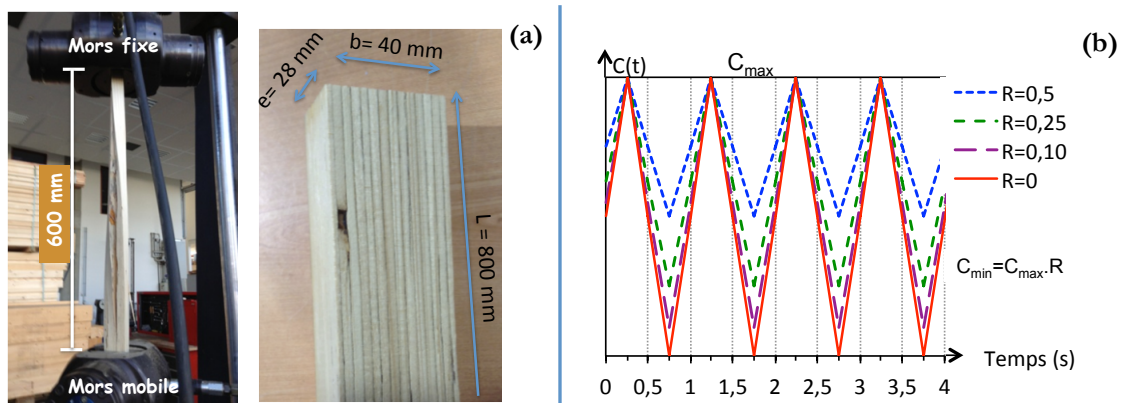


FIG. 3 – (a) Dispositif d'essai, éprouvette de LVL testée. (b) Consignes cycliques.

La campagne expérimentale se décompose en trois phases appliquées à chaque poutre : premièrement un essai monotone piloté en déplacement dans le domaine élastique (angle de torsion limité  $15^\circ$ ), deuxièmement un essai cycle piloté en couple et troisièmement un essai monotone jusqu'à l'angle maximum de la presse. De part la limitation en rotations de la presse ( $75^\circ$  maximum), les éprouvettes testées sous chargement de fatigue ne sont pas entièrement endommagées, le dernier essai monotone nous permet de déterminer le niveau de dommage des diverses éprouvettes.

### 2.2.1 Essais préliminaires de caractérisation

Avant les essais cycliques, chaque éprouvette est soumise à un chargement de torsion monotone sous une vitesse de 0,5 degré par seconde lors du chargement et du déchargement dans le domaine élastique : angle de torsion limité à  $15^\circ$ . Cet essai préliminaire va nous servir à différencier les poutres sur la base du couple atteint à  $15^\circ$  ( $C_{15^\circ}$ ) (Fig. 4a). Afin d'avoir une estimation des résistances ( $C_s$ ) des éprouvettes, des essais monotones jusqu'à  $75^\circ$  ont aussi été réalisés sur 8 éprouvettes jumelles à celles testées en cyclique. En effet dans huit poutres de LVL, deux éprouvettes ont été taillées côte à côte (Fig. 4b) : l'une, notée éprouvette a, est testée sous le protocole cyclique, l'autre, notée éprouvette b, n'est soumise qu'à un chargement monotone jusqu'à  $75^\circ$ . Les résistances des 2 éprouvettes sont considérées comme similaires et donc la résistance ( $C_{75^\circ}$ ) obtenue sur l'éprouvette b est supposée proche de la résistance ( $C_s$ ) de l'éprouvette a.

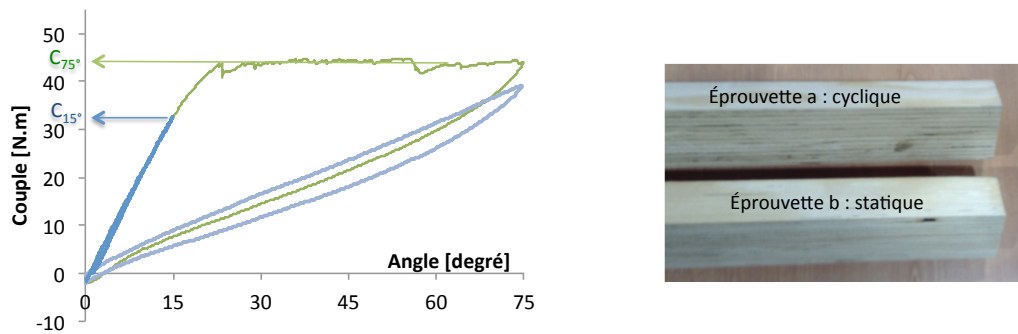


FIG. 4 – Evolution couple-rotation avant et après les essais de fatigue (ép. a – courbes bleues) et résultat sur une ép. b, testée uniquement sous chargement monotone jusqu'à la limite de la machine (75°) (courbe verte).

Les essais monotones après chargement cycliques sont réalisés suivant les mêmes consignes de chargement que lors des premiers essais monotones : charge / déchargement à 0,5 %/s. Par contre, l'angle maximum de l'essai est dans ce cas de 75° (limite machine). Dans cette étude, le dommage est caractérisé par un paramètre  $D$  qui varie entre la valeur 0 quand le matériau est sain et la valeur  $D_{crit}$  en fin d'essai. L'analyse de la perte de « raideur » entre les essais monotones avant et après les cycles nous permettra de déterminer l'endommagement critique final  $D_{crit}$  (cf. chapitre 3)

## 2.2.2 Essais cycliques de torsion

La consigne des essais cycliques de torsion est triangulaire, la fréquence a été fixée à 1 Hz, fréquence courante en zone sismique par exemple. Le couple maximum a été fixé égale à 45 N.m au regard d'essais monotones à rupture préliminaires sur les éprouvettes b ( $C_s$  moyen  $\approx$  48 N.m). Quatre couples minimum ont été choisis 0 N.m, 4 N.m, 11 N.m et 22 N.m, soit les rapports  $R$  ( $R =$  couple minimum/couple maximum) :  $R=0$ ,  $R = 0,1$ ,  $R = 0,25$  et  $R = 0,5$ . La plage de rotation permise par la machine est de 75°, pour avoir un angle de déformation maximum des éprouvettes nous sommes limité aux essais ondulés, les essais alternés auraient donné des angles de déformations moins importants donc moins endommageant. La figure 3b résume les diverses consignes de pilotage. Chaque série de chargement a été appliquée à au moins 10 éprouvettes.

## 3 Interprétations des essais

### 3.1 Evolution du dommage

Le comportement « dynamique » est modélisé en se basant sur la théorie de l'endommagement. Le dommage est caractérisé par un paramètre noté  $D$  et qui varie entre 0 (matériau vierge) et  $D_{crit}$  quand le matériau est « entièrement » endommagé. Le paramètre de dommage  $D$  peut être obtenu à partir de l'étude des variations des rigidités ( $k$ ) lors de chaque cycle. La perte de rigidité peut être traduite par l'expression (1) [6] :

$$D = 1 - \frac{K}{K_{ini}} \quad (1)$$

Où  $k_{ini}$  est la rigidité initiale.

Pour les essais de torsion, la rigidité  $k$  étant fonction du module de cisaillement  $G$ , on obtient  $D$  en remplacement  $k$  par  $G$  dans l'expression (1).  $D_{crit}$  est obtenue à partir de l'équation (2):

$$D_{crit} = 1 - \frac{G_{fin}}{G_{ini}} \quad (2)$$

avec  $G_{ini}$  et  $G_{fin}$  respectivement les modules de cisaillement obtenus lors de l'essai monotone initial et celui final. Les valeurs moyennes obtenues sont : 532 MPa (écart type de 12%) pour  $G_{ini}$  et 100 MPa (écart type de 10%) pour  $G_{fin}$  et 0,81 (écart type 1,8%) pour l'endommagement critique  $D_{crit}$

La rigidité retenue pour les essais de flambement de cette étude correspond à la raideur entre le déplacement imposée et la force de compression résultante [3].

Malheureusement, la détermination de  $D$  à partir de l'équation (1) est parasitée par la viscosité du matériau, en effet la rigidité observée lors des cycles ne correspond pas à la raideur de notre matériau (au sens rhéologique du terme), elle intègre l'écoulement visqueux du bois.

Un autre moyen d'obtenir  $D$  lors d'essais avec une consigne de chargement constante (cas des essais de torsion) est l'étude de l'évolution des déformations en fonction du temps. L'endommagement lors des cycles est analysé à partir de l'évolution de la déformation angulaire maximum (Fig. 5). Après un premier écoulement croissant, phase généralement appelée phase primaire, l'évolution de la déformation angulaire extrême en fonction du nombre de cycles devient quasi linéaire (écoulement secondaire). Après un nombre de cycles plus ou moins élevé, une troisième phase « exponentielle » (écoulement tertiaire) est observée dès l'initiation d'une fissuration précurseur de la rupture. Le paramètre d'évolution du dommage peut ainsi être considéré comme la différence entre la phase tertiaire et la phase secondaire, différence que nous normalisons par la suite pour obtenir le paramètre de dommage  $D$  (Fig. 5b).

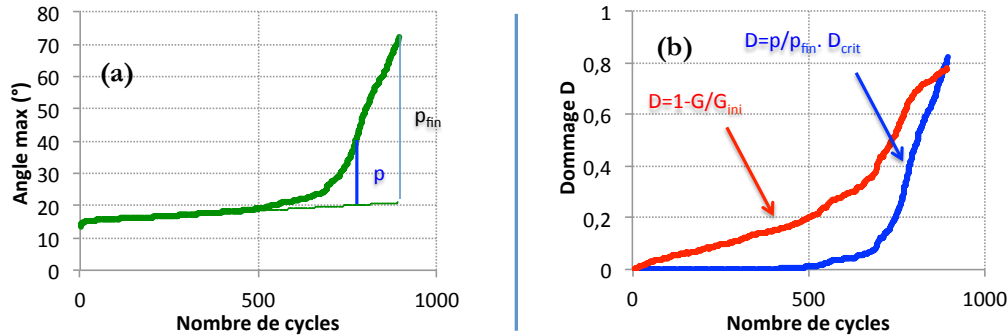


FIG. 5 – (a) Evolution déformation angulaire maximum - cycle durant les essais cycliques (b): détermination du dommage  $D$  à partir de «  $p$  » et des variations de rigidité ( $G$ ) - Essais de torsion cycliques.

Pour le cas des essais de flambement, le dépouillement est plus délicat de part le pilotage en déplacement augmentant tous les 50 cycles. Nous avons cependant tenté une analyse similaire à celle appliquée aux essais de torsions : cette fois c'est « l'écoulement » de la force de compression qui est étudiée (Fig. 6).

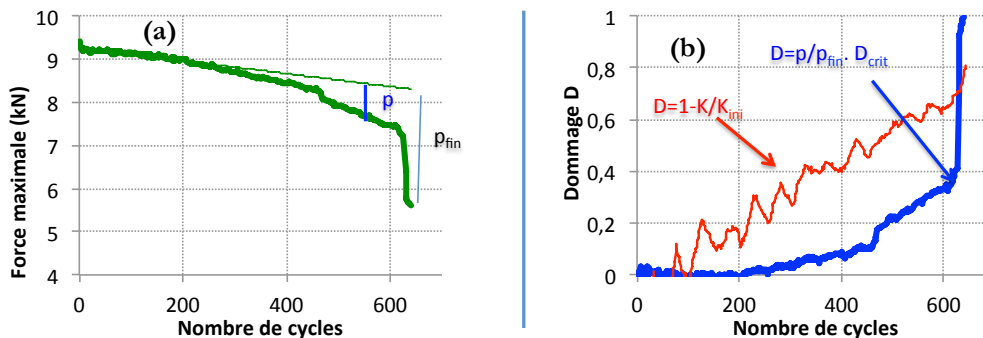


FIG. 6 – (a) Evolution la force maximum - cycle durant les essais cycliques (b): détermination du dommage  $D$  à partir de «  $p$  » et des variations de rigidité ( $k$ ) - Essais de flambement cycliques.

Les figures 5b et 6b comparent les deux méthodes de détermination de  $D$ . Quelques essais de torsions arrêtés au bout de 2 000 cycles sans dommage apparent de la poutre n'ont fait apparaître qu'un écoulement secondaire, soit  $D$  égale à zéro; par contre lors des cycles, la rigidité « apparente » avait bien évolué, soit un  $D$  final non nul. Des essais monotones réalisés sur ces éprouvettes non endommagées en apparence ont permis de confirmer l'absence de dommage ( $G_{ini}=G_{fin}$ ). La méthode basée sur les écoulements semble donc être préférable pour déterminer le dommage  $D$ , du moins pour le cas d'un chargement constant.

### 3.2 Durée de vie

Pour les essais de flambement, la durée de vie est présentée en fonction du rapport  $\delta_e/\delta_{e50}$ ,  $\delta_e$  étant le déplacement à l'instabilité de l'éprouvette et  $\delta_{e50}$  le déplacement de référence du pilotage (Fig. 7b). Les essais sont peu nombreux, et les temps à rupture sont proches et diminuent lorsque le déplacement à l'instabilité  $\delta_e$  de l'éprouvette diminue.

Pour les essais de torsion, pour distinguer chacune des éprouvettes, nous disposons du couple à  $15^\circ$  ( $C_{15^\circ}$ ), de leur module de cisaillement  $G$  et de leur densité mais pas de leur résistance à la rupture en statique ( $C_s$ ) qui nous permettrait de définir un niveau de charge  $SL$  égal au rapport couple maximum  $C_{max}$  appliqué sur la résistance  $C_s$  ( $SL=C_{max}/C_s$ ). Si on considère que la résistance ( $C_{75^\circ}$ ) obtenue sur l'éprouvette b correspond à la

résistance  $C_s$  de l'éprouvette a, on constate qu'il existe une relation entre la valeur de  $C_s$  et  $C_{15^\circ}$ . De même, la densité du bois évolue dans le même sens que sa résistance [5]. Aussi, nous pourrions définir dans cette étude un niveau de référence de charge  $SL_r$  comme le rapport entre le couple maximum appliqué et le couple  $C_{15^\circ}$ . Pour plus de précision, ce niveau de charge de référence est pondéré par la densité  $d$  (3):

$$SL_r = \frac{C_{\max}}{C_{15^\circ}} \frac{1}{\beta} \quad \text{avec } \beta = \frac{d}{\bar{d}}, \quad \bar{d} \text{ est la moyennes des densités } d \quad (3)$$

Le nombre de cycles « à rupture », ou plutôt à la limite  $75^\circ$ , expérimental est présenté en fonction du niveau de charge  $SL_r$  auquel il est soumis en utilisant un diagramme semi-logarithmique (Fig. 7a). On constate que le nombre de cycles à rupture augmente bien lorsque  $SL_r$  diminue, par contre, l'influence de  $R$  sur les durées de vie semble négligeable. Ceci peut sans doute s'expliquer par le fait que le temps à rupture sera plus conditionné par la cadence de retour de l'effort max que par la vitesse du chargement triangulaire.

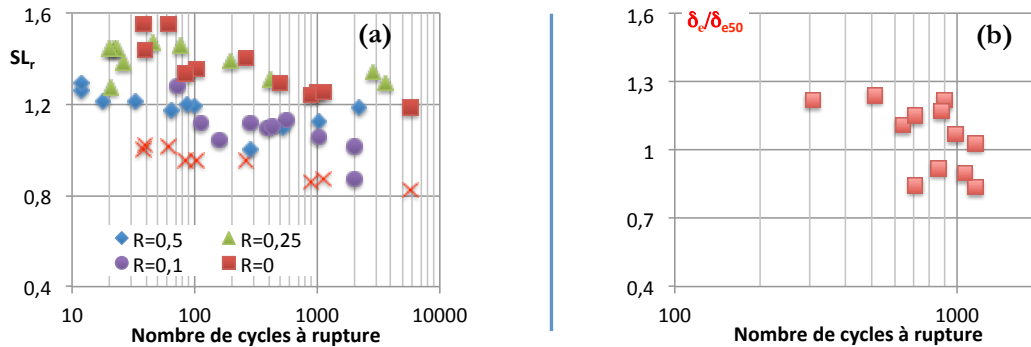


FIG. 7 – (a) Nombre de cycles « à rupture » des essais de torsion en fonction du niveau de chargement  $SL_r$  en fonction de  $R$  ( $R=C_{\max}/C_{\min}$ ), (Croix : valeurs avec  $SL=C_{\max}/C_s$  des poutres ayant une jumelle ( $R=0$ )). (b) Nombre de cycles à rupture des essais de flambement en fonction de  $\delta_c/\delta_{e50}$ .

## 4 Conclusion

Nous avons réalisé une série d'essais cycliques ondulés de torsions et de post flambement, à fréquence constante ( $f \approx 1$  Hz) et à amplitude variable, sur du LVL. Nous avons établi un protocole d'essai et de dépouillement qui permet d'obtenir l'évolution du dommage et la durée de vie des éprouvettes. Les essais de torsion à fréquence constante ont montré la faible influence de l'amplitude du signal sur la durée de vie contrairement à ce qui avait été observé lors d'essais de torsion sous chargement triangulaire à vitesse constante (fréquence variable) [4]. Pour les deux types d'instabilité, les propriétés viscoélastiques du bois se sont traduites par une (boucle d') hystérésis « significative » lors de chaque cycle, effet de dissipation d'énergie favorable à la tenue de la construction. Des essais complémentaires sur des poutres de section et/ou de longueur différentes pourront être réalisés. Ces prochains essais devront aussi intégrer l'effet de la teneur en eau du bois sur les instabilités (viscoélasticité du bois fortement liée à de la teneur en eau) et donc permettre la prise en compte de l'environnement (classe de service) de l'ouvrage.

## References

- [1] Ayina O., Morlier P., « Comportement en torsion du matériau bois », *Materials and Structures*, vol. 33, 1998, 405-410, 1998.
- [2] Bonfield P.W., Dinwoodie J.M., Ansell M.P., Hacker C.L., *Fatigue and creep of chipboard. Part 1: Fatigue at  $R = 0.01$* , *Wood Science and Technology*, vol. 28, 423-436, 1994.
- [3] Bouras F., Chaplain M., Nafa Z., *Experimental and modelling buckling of wood-based columns under repeated loading*, ICEM 14 – 14th International Conference on Experimental Mechanics. Poitiers, EPJ Web of Conferences, Volume 6, 7p, 2010.
- [4] Chaplain M., Nafa Z., Guenfoud M. *Damage and Fracture Mechanics, Damage of glulam beams under cyclic torsion: experiments and modeling*. Springer, Boukharouba T. et Pluvillage G, 349-356, 2009.
- [5] Kollman F.F.P., Wilfred Arthur Côté W.A., *Principles of Wood Science and Technology: Solid wood. I*, Volume 1, Allen & Unwin, 1968.
- [6] Lemaitre J, Chaboche J. L., *Mécanique des matériaux solides*, Paris, Edition Dunod, 1988.
- [7] Nafa Z, Chaplain M, *Endommagement du bois lamellé-collé soumis à un chargement de torsion cyclique*, *European Journal of Environmental and Civil Engineering* ; Vol. 12/9-10, 1123-1135, 2008.