

---

# Etude expérimentale du flambement sous sollicitations cycliques de poteaux en bois massif ou reconstitués.

F. Bouras<sup>1,2</sup>, M. Chaplain<sup>1</sup>, Z. Nafa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Univ. Bordeaux 1, I2M/GCE, 351 cours de la Libération- 33405 Talence cedex; [bouras@us2b.pierroton.inra.fr](mailto:bouras@us2b.pierroton.inra.fr); [myriam.chaplain@u-bordeaux1.fr](mailto:myriam.chaplain@u-bordeaux1.fr)

<sup>2</sup> Université de Guelam, LGCH, PB401– 24000 Guelma, Algérie; [naf\\_zah@yahoo.fr](mailto:naf_zah@yahoo.fr)

---

*RÉSUMÉ. Le travail présenté concerne l'étude expérimentale du comportement mécanique d'éléments structuraux en bois, soumis à des chargements cycliques – de types sismiques - entraînant une instabilité de flambement. Les essais sont menés sous un protocole de chargement en pré-flambement qui considère qu'une instabilité du poteau conduirait à une instabilité globale de la structure. Le signal du chargement est triangulaire avec une fréquence de 1 Hz. Les résultats d'essais cycliques sur deux types de bois (bois reconstitué et bois massif) permettent de constater un comportement visco-élastique. Suite aux essais de flexion le calcul du module de Young des éprouvettes avant et après essai cycliques montre un gain de performance élastique (augmentation du module de Young et de la charge critique d'Euler). Pour un niveau de charge donné, le LVL (Laminated Veneer Lumber. et le bois massif présente une durée de vie similaire.*

*ABSTRACT. The aim of the present work concerns the experimental study of mechanical behavior of timber structural elements, submitted to cyclic loading - Seismic types - leading to a buckling instability. The tests are conducted under a program of pre-buckling load which considers that local instability would lead to global instability. The signal is a triangular loading with a frequency of 1 Hz. The results of cyclic tests on two types of wood show a viscoelastic behavior. Bending test allow us the calculation of Young's modulus of specimens before and after cyclic testing. Thus the elastic performance slightly increases (higher Young's modulus and critical load for Euler). For a given stress level, LVL and solid wood has a similar life time.*

*MOTS-CLÉS: Essais cycliques, flexion, pré-flambement, bois, LVL*

*KEYWORD: Cyclic tests, pre-buckling, bending, wood, LVL*

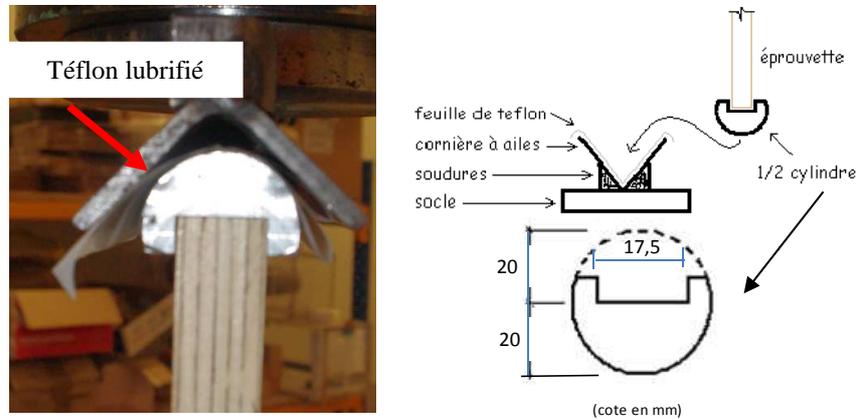
---

## Introduction

Dans le domaine de la construction, l'emploi du bois connaît un grand essor. Cependant les études sur le flambement des poteaux en bois massif ou reconstitué sont très limitées. Pour le comportement « statique », nous pouvons citer les travaux de Fairker (Fairker, 1964) qui a étudié le comportement de poteaux de différentes essences et différentes dimensions. Il a en particulier mis l'accent sur l'influence du rapport longueur de flambement/épaisseur sur les résistances. Agarwal (Agarwal *et al.*, 1989) a réalisé un travail expérimental sur des poteaux en bois massif en résineux et en feuillus. L'étude portait sur les effets du ratio largeur/épaisseur et de l'élançement mais aussi sur les effets des imperfections de la matière, de la courbure initiale du poteau et de l'excentricité de chargement. Des facteurs de réduction sont proposés pour prendre en compte ces imperfections et/ou ces excentricités. Des études de flambement cyclique ont été réalisées sur d'autres matériaux (béton, acier...) (Broderick *et al.*, 2005, Gomes *et al.*, 1997, kyungsoo *et al.*, 2007). Les études du comportement cyclique de flambement de poteaux en bois sont inexistantes. Afin de combler ce vide, un travail a été mené en collaboration entre l'ex US2B (Bordeaux) et le LGCH (Guelma - Algérie) sur l'étude expérimentale et la modélisation du comportement des poteaux sous charge de compression répétée conduisant à la rupture par flambement (Bouras *et al.*, 2010). Ce groupe de travail a aussi étudié la torsion cyclique des poutres (Chaplain *et al.*, 2009). L'étude présentée dans ce papier consiste en l'analyse expérimentale du comportement d'éléments structuraux en bois soumis à des chargements cycliques en pré-flambement. Les éléments étudiés sont des poteaux de dimensions réduites de 17,5 x 100 x 800 mm<sup>3</sup> de dimensions moyennes en bois massif (épicéa) et en LVL (pin maritime). Au préalable des essais de flambement cycliques, des essais monotones, pilotés en déplacement nous donnent les forces d'instabilités. En se référant à ces forces nous appliquons un chargement cyclique piloté en force. Le protocole des essais cycliques est inspiré de ceux utilisés pour simuler les chargements sismiques et notamment par ceux proposés par Ceccotti (Ceccotti, 1997).

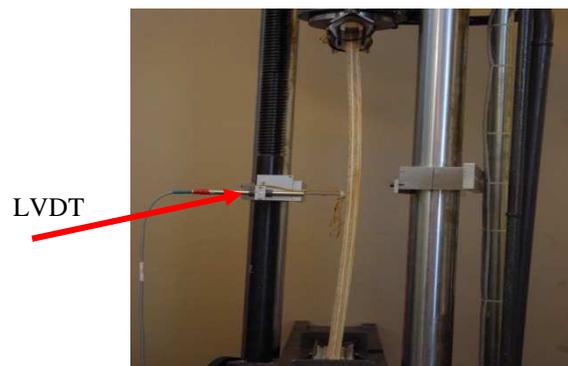
## Dispositif expérimental et éprouvettes

Le dispositif est conçu pour réaliser des tests de flambement bi-articulé. Les articulations du dispositif de flambement sont composées de deux demi-cylindres, façonnés de manière à recevoir nos éprouvettes et insérés dans des cornières à ailes (figure 1). Cette cornière est fixée par soudure, sur un socle qui prend place sur la presse. Une feuille de téflon de 0,6 mm d'épaisseur et lubrifiée de part et d'autre (côté cornière et côté demi rond) est calée entre ces deux éléments nous permet d'obtenir un frottement très faible, constituant ainsi une articulation presque parfaite. Ce dispositif lubrifié nous a permis de résoudre un problème de frottement parasite constaté au niveau des appuis lors d'essais précédents.



**Figure 1.** Dispositif de flambement

Durant les essais, le déplacement de la traverse, le temps, l'effort de compression appliqué sont mesurés ainsi que l'excentricité de la poutre en son milieu. La mesure de cette excentricité a été effectuée à l'aide d'un capteur de déplacement (LVDT – course de 80 mm), elle nous permet de calculer les contraintes maximales sous l'effet de la compression (figure 2). Les éprouvettes étudiées sont des modèles réduits homothétiques de poteaux que l'on peut trouver dans les constructions en bois, de dimensions moyennes égales à 17,5 mm pour l'épaisseur, 100 mm pour la largeur et 800 mm pour la hauteur. Leurs élancements sont voisins de 154. Une série de 35 éprouvettes de LVL (Laminated Veneer Lumber), et une série de 39 éprouvettes en épicéa ont été réalisées. Les caractéristiques moyennes, dimensions, densité et teneur en eau, sont recensées sur le tableau 1.



**Figure 2.** Photo de la poutre flambée et du capteur LVDT

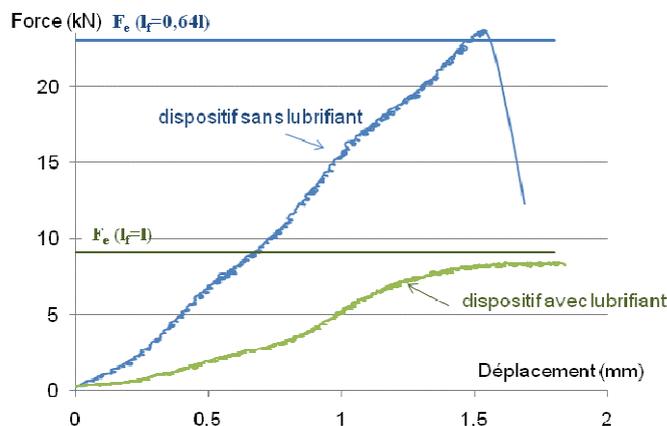
Éprouvettes	Nombre	Dimensions moyennes (mm)			Densité	H%
		Haut.	Larg.	Prof.		
LVL ( <i>écart type</i> )	35	800,6 (0,4)	101,1 (0,42)	17,5 (0,2)	0,56 (0,01)	11 (0,02)
Bois massif ( <i>écart type</i> )	39	800,4 (0,49)	100,8 (0,36)	17,4 (0,1)	0,42 (0,02)	15 (0,01)

**Tableau 1.** Dimensions moyennes des éprouvettes testées

## Essais-résultats campagne expérimentale

### 3.1. Les essais monotones

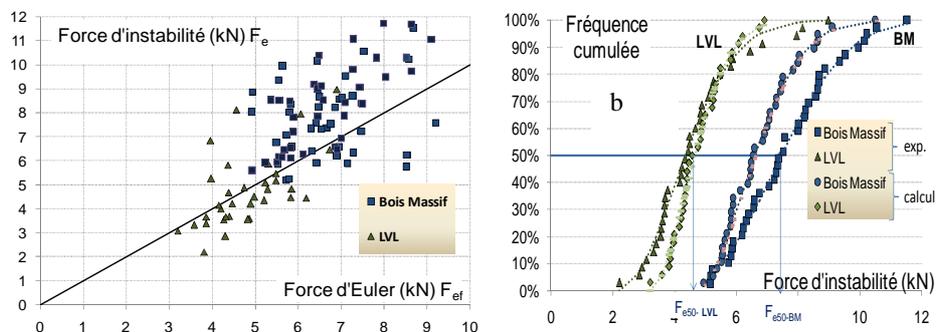
Des essais monotones réalisés avant les essais cycliques, permettent de déterminer la force correspondant au début d'instabilité. Ils sont réalisés à une vitesse de 1 mm/min. La force à l'instabilité est notée  $F_e$ , elle nous servira comme référence lors des chargements cycliques pilotés en force. L'instabilité se traduit par une chute brusque ou une stabilisation de la force reprise par l'éprouvette. Les résultats ont montré une grande différence entre les valeurs de l'instabilité en fonction de la lubrification des  $\frac{1}{2}$  disques. La figure 3 représente deux évolutions de la force en fonction du déplacement traverse dans le cas d'un dispositif « lubrifié » ou non : la lubrification permet d'obtenir une quasi articulation ( $l_f =$  longueur de la poutre). Le frottement du dispositif non lubrifié correspond quasiment à la force d'instabilité calculer avec une longueur de flambement de 0,64 fois la longueur de l'éprouvette. Dans cet article, seul les résultats avec le système lubrifié sont présentés. La force maximale à l'instabilité obtenue, avec le nouveau dispositif, pour les deux matériaux est en moyenne de 4,76 kN (*écart type* de 1,24 kN) pour le LVL et de 7,65kN avec un *écart type* de 1,6 kN pour l'épicéa. Le comportement (relation force / déplacement traverse) des deux matériaux jusqu'à l'instabilité est très disparate où le bois massif présente un force instabilité moyenne presque égale au double de celle du LVL.



**Figure 3.** Exemple de résultats d'essais statiques sur du LVL avec le deuxième dispositif sans lubrifiant ( $l_f=0,64l$ ) et avec lubrifiant ( $l_f=l$ ),  $l$  : longueur de l'éprouvette,  $l_f$  : longueur de flambement

### 3.2. Les essais de flexion

Une campagne d'essais en flexion statique, pilotés en déplacement à une vitesse de 10 mm/min a été réalisée pour déterminer le module d'élasticité longitudinal et ainsi calculer la charge critique d'Euler. Ces essais sont effectués avant et après les essais cycliques afin de détecter un endommagement via la mesure du module de Young des éprouvettes après le cyclique et ainsi pouvoir comparer les charges critiques d'Euler. Ces essais nous ont aussi permis de permettre en exergue le problème de frottement lors d'anciens tests (figure 3). Sur la figure 4a est représenté la charge critique d'Euler calculée à partir des résultats des essais de flexion, notée  $f_{ef}$ , en fonction de la force d'instabilité  $f_e$  obtenus lors des essais monotones. Près de 20% des éprouvettes en LVL ont une force d'instabilité calculée  $f_{ef}$  inférieure à celle obtenue lors des essais monotones à gauche de la droite ( $y = x$ ) ; ceci est sans doute dû à un frottement au niveau des appuis. Par contre le bois massif présente presque toujours une force d'instabilité plus élevée en pratique qu'en théorie, ceci est sans doute dû à une lubrification moins efficace de notre système quand l'effort appliqué est élevé. On retrouve ces résultats sous la forme d'une distribution cumulée sur la figure 4b. Expérimentalement, le bois massif a une force plus élevée que celle issue des calculs ( $F_{ef}$ ) : la force d'instabilité à 50% de la probabilité cumulée est égale à 6,6 kN pour la valeur calculée et de 7,6 kN expérimentalement.



**Figure 4.** a/ Force d’instabilité  $F_e$  (expérimentale) en fonction de la force critique d’Euler  $F_{ef}$ ; b/ Distribution cumulée expérimentale (essais monotones) et théorique (calcul à partir de  $E$ )

Le tableau 2 montre, qu’après les essais cycliques, le module de Young et la force d’Euler augmentent en moyenne de 2% pour le LVL et de 4% pour le bois massif. Ceci peut être imputé à une consolidation des éprouvettes.

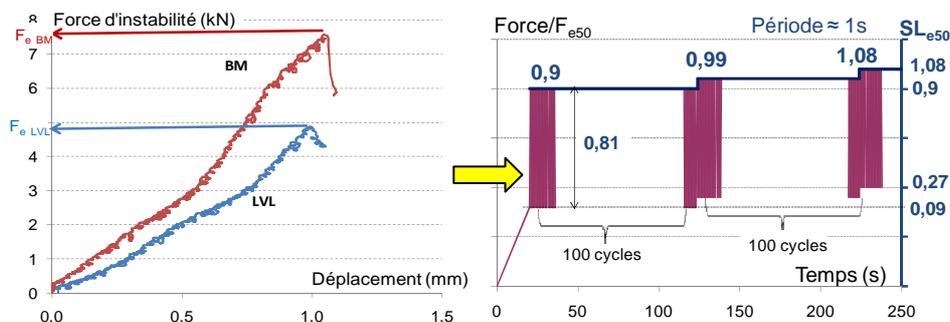
	Avant chargement cyclique		Après chargement cyclique		$E_2/E_1$	$F_{ef2}/F_{ef1}$	$F_e$ exp. (kN)
	$E_1$ (MPa)	$F_{ef1}$ (kN)	$E_2$ (MPa)	$F_{ef2}$ (kN)			
LVL	6 377 (1 169)	4,84 (0,88)	6 523 (988)	4,95 (0,73)	1,02 (0,03)	1,02 (0,03)	4,76 (1,24)
BM	8 929 (1 626)	6,78 (1,23)	9 298 (1 670)	7,06 (1,26)	1,04 (0,02)	1,04 (0,02)	7,65 (1,60)

**Tableau 2.** Valeurs moyennes (et écart-types) du module de Young longitudinal et de la force d’Euler ( $F_{ef}$ ) obtenues à partir d’essais de flexion avant et après essais cycliques. Valeurs moyennes (et écart-types) de la force d’instabilité  $F_e$  issue des essais monotones

### 3.3. Les essais cycliques

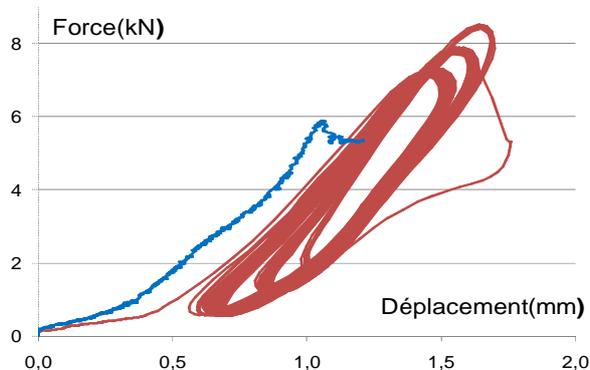
Le pilotage de la presse se fait en force. Le protocole est inspiré de ceux utilisés pour simuler les chargements sismiques et notamment par ceux proposés par Ceccotti (Ceccoti, 1997) pour les constructions en bois ou ceux généralement utilisés pour les testes sur des poteaux en béton armé ou en constructions métalliques (Broderick *et al.*, 2005, Gomes *et al.*, 1997). Les éprouvettes sont

sollicitées dans la phase pré-instabilité, le flambement de l'élément étant considéré comme « fatale » à la structure. Les éprouvettes sont pré-chargées à une vitesse de 50 mm/min jusqu'à une force égale à 9% de  $F_{e50}$  ( $F_{e50}$  étant la force de référence égale à 50% de la distribution cumulée des forces monotones  $F_e$  (figure 4b)). Les éprouvettes sont soumises à une force périodique triangulaire, pour les deux essences, jusqu'à 90% de  $F_{e50}$  soit une amplitude constante égale à 81% de leur force de référence  $F_{e50}$ . La vitesse de chargement est de 24 kN/s (vitesse maximale autorisée par la presse), soit une fréquence théorique constante pour tous les essais de 1 hertz. Le chargement cyclique se fait entre « paquets » de 100 cycles successifs avec un incrément de force par paquet de 9% de  $F_{e50}$ . Ce protocole a été fortement imposé par les capacités de la presse hydraulique utilisée qui ne nous permet pas de faire des cycles très rapides et/ou prolongés. La figure 5b représente la consigne de chargement divisée par la force de référence  $F_{e50}$ .



**Figure 5.** a) Exemple de courbe force-déplacement sous un chargement monotone à 1mm/min : détermination de  $F_e$  (Force d'instabilité) – b) Protocole du chargement cyclique adimensionnel et niveau de charge  $SL_{e50}$  de référence (Force/ $F_{e50}$ )

Durant les essais cycliques, l'analyse des courbes d'hystérésis force-déplacement (figure 6) montre que le force est en constante augmentation jusqu'à l'instabilité. Le comportement du bois peut être décrit comme visco-élastique (boucle d'hystérésis). L'élément a un comportement capable d'accumuler et de dissiper l'énergie lors d'une action sévère telle que l'action séismique. Le calcul d'énergie dissipée par cycles ne présente pas de variations notables, ceci tend à montrer qu'il n'y a pas eu d'endommagement pendant l'essai.

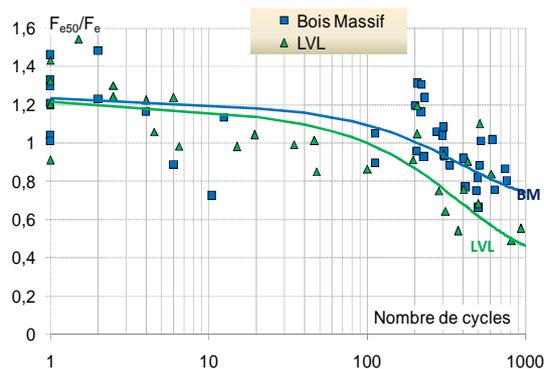


**Figure 6.** Exemple de comparaison de l'évolution de la force en fonction du déplacement entre l'essai monotone et l'essai cyclique (bois massif)

Lors des essais cycliques, une éprouvette de force à l'instabilité  $F_e$  a été soumise à un niveau de charge  $SL$  proportionnel à  $SL_{e50}$  (équ. [1]).

$$SL = \frac{F_{\max}}{F_e} = \frac{F_{\max}}{F_{e50}} \cdot \frac{F_{e50}}{F_e} = SL_{e50} \cdot \frac{F_{e50}}{F_e} \quad [1]$$

Le niveau de charge appliquée à chaque poutre était égal à  $F_{e50}/F_e$  fois le niveau de référence  $F_{e50}$ . La représentation de la courbe de durée de vie est exprimée en fonction de ce coefficient  $F_{e50}/F_e$  (figure 7).



**Figure 7.** Durée de vie des deux essences :  $F_{e50}/F_e$  (niveau de charge  $SL=SL_{e50} \cdot F_{e50}/F_e$ ) en fonction du nombre de cycles

Nous constatons sur la figure 7 que les durées de vie obtenues pour le LVL et le bois massif sont très proches, elles se distinguent cependant pour les valeurs les plus élevées des forces d'instabilité  $F_e$ . Pour les valeurs les plus faibles du rapport  $F_{e50}/F_e$ , le LVL présente une durée de vie plus faible que le bois massif.

Le tableau 3 montre les valeurs moyennes des énergies dissipées durant les tests cycliques ainsi que les raideurs.

	palier	1	2	3	4	5	6	7	8	9
LVL	Energie (kN.mm)	0,94	0,81	0,76	0,71	0,66	0,64	0,64	0,54	0,53
	(Ecart type)	(0,15)	(0,09)	(0,09)	(0,10)	(0,08)	(0,06)	(0,14)	(0,10)	(0,06)
LVL	Raideur (kN/mm)	6,40	7,91	8,85	9,67	10,4	10,9	11,49	12,35	13,81
	(Ecart type)	(1,35)	(1,27)	(1,51)	(1,82)	(1,65)	(1,56)	(1,53)	(2,76)	(2,84)
BM	Energie (kN.mm)	1,16	1,05	1,00	0,96	0,90	0,78	0,73	0,65	
	(Ecart type)	(0,16)	(0,15)	(0,15)	(0,16)	(0,18)	(0,17)	(0,16)	(0,09)	
BM	Raideur (kN/mm)	11,5	13,6	15,0	16,7	18,8	20,3	23,40	25,14	
	(Ecart type)	(2,43)	(2,22)	(2,39)	(3,03)	(4,06)	(5,30)	(5,61)	(3,92)	

**Tableau 3.** Valeurs moyennes des énergies dissipées et des raideurs obtenues après essais cycliques par paliers de cent cycles pour le LVL et le bois massif

Nous remarquons pour les deux types d'éprouvettes une diminution de l'énergie dissipée ce qui se traduit par une perte du caractère visqueux du bois. Pour les raideurs une augmentation est constatée ce qui dénote une fragilisation du bois exprimée par une diminution de la souplesse du matériau (à amplitude constante des forces par palier, un déplacement décroissant est constaté le long de l'essai cyclique).

### Conclusion

Une étude expérimentale a été faite sur le comportement cyclique en pré-flambement de poteaux en bois massif (épicéa) et LVL (pin maritime). De cette étude, nous pouvons dégager les conclusions suivantes :

- ✓ Les essais de flexion menés avant et après cyclique ont montré un gain en module d'élasticité ce qui dénote probablement une consolidation et/ou une élimination de défauts de linéarité des éprouvettes.

- ✓ Pour les deux essences, nous avons constaté force d'instabilité plus élevée sous chargement cyclique que sous chargement monotone.
- ✓ Le bois massif et le LVL présentent un comportement visco-élastique avec une capacité de dissipation d'énergie non négligeable (boucle d'hystérésis prononcée).
- ✓ Sous chargement cyclique rapide le bois massif présente un comportement plus fragile (rupture de certaines éprouvettes en atteignant l'instabilité) que le LVL.
- ✓ Le LVL et le bois massif ont des courbes de durée de vie similaires pour les grandes valeurs du seuil de charge ( $F_{e50}/F_e$ ) mais différentes pour les faibles valeurs ce seuil. Néanmoins, à cause de la grande dispersion des résultats, il est délicat d'être catégorique dans les interprétations.
- ✓ La dispersion des résultats peuvent s'expliquer par la structure du matériau bois et au fait qu'il est très difficile de réaliser un dispositif parfaitement articulé.

### **Bibliographie**

- Agarwal S. K., Kaushik, S. K. « Investigation on solid timber columns », Journal of the Institution of Engineers, vol. 70, no 3, 1989, p. 103-107.
- 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, EPJ Web of Conferences, Volume 6, 2010, 7p.
- Broderick B.M., Goggins J.M., Elghazouli A.Y., « Cyclic performance of steel and composite bracing members », Journal of Constructional Steel Research 61, 2005, p. 493–514.
- Chaplain M., Nafa Z., Guenfoud M., « Damage of Glulam Beams under cyclic torsion: experiments and modelling », Damage and Fracture Mechanics: Failure Analysis of Bro 05 Gom 97 Engineering: Materials and Structures, éditeur Boukharouba et al., Springer, 2009, pp. 349–356.
- Ceccotti A., « Les assemblages bois sous l'action sismique, Structures en bois aux états limites chapitre VIII-2 », STEP C17, 1997, p. VIII-2-1 –VIII-2-11.
- Fairker J. E., « a study of the strength of short and intermediate wood columns by experimental and analytical methods », rapport interne EPL-RN-28, 1964.
- Gomes A., Appleton J. « Nonlinear cyclic stress-strain relationship of reinforcing bars including buckling », Engineering Structures, Vol. 19, No. 10, 1997, p. 822 826.
- Kyungsoo Chung K., Chung J., Choi S., « Prediction of pre- and post-peak behavior of concrete-filled square steel tube columns under cyclic loads using fiber element method », Thin-Walled Structures 45, 2007, p. 747–758.