
Endommagement de poutres en bois lamellé-collé soumises à un chargement de torsion cyclique

Zahreddine Nafa* — Myriam Chaplain**

* LGCH, Université 08 mai 45, BP 401, 24000 Guelma, Algérie

naf_zah@yahoo.fr

** LRBB, Université Bordeaux1, 69 route d'Arcachon 33612 Cestas Cedex, France

chaplain@us2b.pierroton.inra.fr

RÉSUMÉ. Se basant sur les résultats de plusieurs programmes d'essais, où nous faisons varier les paramètres de chargement, nous cherchons à modéliser le comportement, la durée de vie, de poutres en bois lamellé collé sous l'effet de torsion cyclique. Le temps de rupture expérimentale d'une poutre est présenté en fonction du niveau de charge maximum (SL) auquel elle est soumise en utilisant un diagramme semi logarithmique communément appelé courbe de Wöhler. La modélisation est basée sur la théorie de l'endommagement : le temps de rupture des poutres est prédit en utilisant un modèle de dommage basé sur celui développé par Barrett et Foschi auquel nous ajoutons une formulation basée sur la loi linéaire de Goodman pour permettre la prise en compte de la variation du moment moyen.

ABSTRACT. The aim of this paper is to study the behaviour and the lifetime of glued-laminated beams (GL) under cyclic torsion. Experimental programmes have been carried out: periodic triangular alternate torques with varying amplitude are applied to GL beams with rectangular cross section.

Experimental lifetime is presented by semi logarithmic SL-N curves (SL is the maximum torque stress level and N is failure cycles number). From angular distortion records, we propose a method to obtain the damage evolution versus time. Duration of load prediction of GL beams under cyclic torque is approached by a damage theory.

MOTS-CLÉS : Poutre, bois, lamellé-collé, torsion, cyclique, modélisation, endommagement.

KEYWORDS: Beams, wood, glued-laminated, torque, cyclic, modeling, damage.

1. Introduction

Malgré l'importance de la production mondiale de bois, la littérature récente concernant le comportement sous sollicitations cycliques du bois reste très limitée. La récente utilisation du bois lamellé-collé dans la fabrication de pales d'éoliennes a poussé les chercheurs dans l'investigation des propriétés de fatigue du lamellé-collé. Nous pouvons citer les travaux de Bond et Ansell (Bond *et al.*, 1998) qui exposent les résultats d'une large série d'essais de fatigue de poutre en lamellé-collé ou bien les travaux de Bonfield (Bonfield *et al.*, 1994) sur l'effet du fluage ainsi que de la fatigue sur des panneaux en bois aggloméré.

Dans les constructions en bois, les structures porteuses sont soumises à des sollicitations de service complexes dues à la combinaison d'efforts simples mais aussi à la géométrie des structures. C'est ainsi que de la torsion peut naître non seulement sous l'effet d'un simple couple de torsion mais aussi d'une instabilité géométrique comme le déversement latéral par exemple. D'autre part ces sollicitations peuvent être constantes ou variées dans le temps, comme celles dues au vent ou à des séismes, provoquant ainsi dans les structures des phénomènes liés aux cycles chargement-déchargement.

2. Expérimentation

Les éprouvettes utilisées sont des modèles réduits de poutres utilisées dans la construction. Ce sont des poutres de 900 mm de longueur obtenues par collage de six lamelles de 40 mm de largeur et 10 mm d'épaisseur (Figure 1). Le bois utilisé est l'épicéa. Avant la composition des éprouvettes (poutres), il est effectué pour chaque lamelle une mesure de la densité et des modules de Young et de Coulomb. Connaissant les modules de chaque lamelle, nous avons procédé à la composition des poutres. Une fois les poutres composées, le collage est effectué, l'adhésif utilisé est l'Enocol RLF 185 de la société Ceca (Paris).

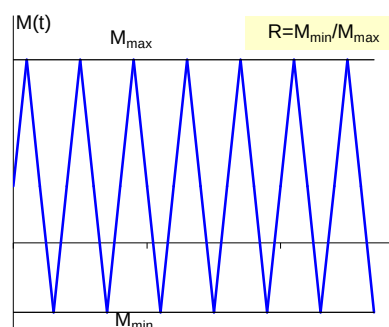
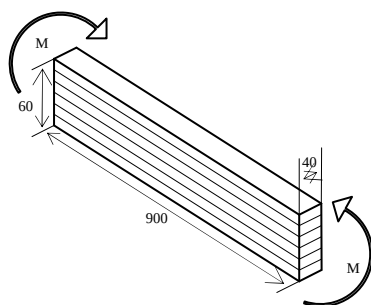


Figure 1. Dimensions des éprouvettes (mm)

Figure 2. Cycles de chargement.

Une série d'essais à court terme est réalisée pour déterminer les moments de rupture statiques moyens M_s de chaque lot de poutres testées à long terme. Ces essais sont réalisés en déplacement contrôlé à une vitesse de $2^\circ/\text{s}$. Afin de mettre en évidence l'influence de l'amplitude, du moment moyen et du moment maximum sur le comportement des poutres, trois programmes d'essais ont été retenus pour les essais cycliques (Nafa et *al.*, 2003). La première série consiste en une série d'essais à moment moyen nul et à l'amplitude du chargement variable (Figure 2). Dans la deuxième série l'amplitude est maintenue constante, alors que le moment moyen varie ; l'amplitude est fixée à 30% du moment de rupture statique du lot. 33 éprouvettes ont été utilisées pour 11 moments moyens soit 3 éprouvettes par moment. Dans la troisième série c'est le moment maximum qui est maintenu constant, le moment moyen varie. Sept valeurs du moment maximum ont été retenues de 30% à 90% par pas de 10% du moment de rupture statique moyen estimé du lot. Pour chaque moment maximum, quatre moments moyens ont été utilisés 0, 25, 50 et 75% du moment maximum soit les rapports R (moment minimum/ moment maximum) : $R=-1$, $R=-0,5$, $R=0$ et $R=0,5$. Tous les essais de fatigues sont menés en moment contrôlé avec une vitesse constante de 110 N.m/s ; le signal appliqué est triangulaire (Figure 2). Compte tenu du nombre élevé d'éprouvettes et pour limiter le temps total d'exécution des essais, une limite conventionnelle a été fixée à 2000 cycles pour chaque essai. Dans cette étude, le niveau de charge (stress level, SL) est défini comme le rapport du moment maximum appliqué et le moment statique ultime estimé M_s de l'éprouvette.

3. Résultats et discussions

Pour les essais à moment moyen nul, la figure 3 schématise deux types de comportements de poutres à savoir l'accommodation pour les faibles valeurs de l'amplitude et l'endommagement pour les valeurs supérieures à 50% du moment de rupture statique moyen M_s .

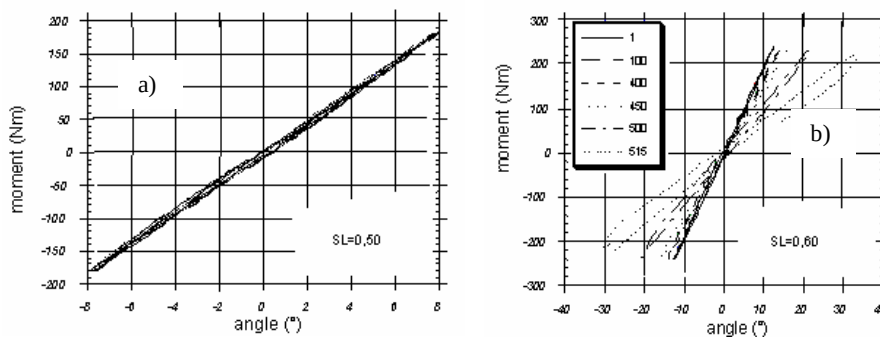


Figure 3. Evolution des courbes (déformation angulaire – moment):
(a) accommodation (b) rupture

Pour différentes valeurs de l'amplitude du moment de torsion, le moment moyen étant nul, l'évolution de la déformation angulaire en fonction du nombre de cycles montre une nette stabilisation pour les valeurs inférieures à 50% de SL (Figure 4a), au delà de cette valeur, le matériau s'endommage avant la limite fixée (Figure 4b). L'endommagement se traduit par une augmentation progressive de l'angle de torsion qui peut conduire à la rupture de la poutre. Comme l'illustre la figure 4a, après une première phase, l'évolution de la déformation angulaire en fonction du nombre de cycles devient quasi linéaire. Pour les amplitudes élevées, une troisième phase exponentielle est observée dès la fissuration de la poutre précurseur de la rupture (Figure 4b). Ces essais ont montré l'existence d'une valeur limite de niveau de charge voisine de l'ordre de 50% pour laquelle apparaît une fissure.

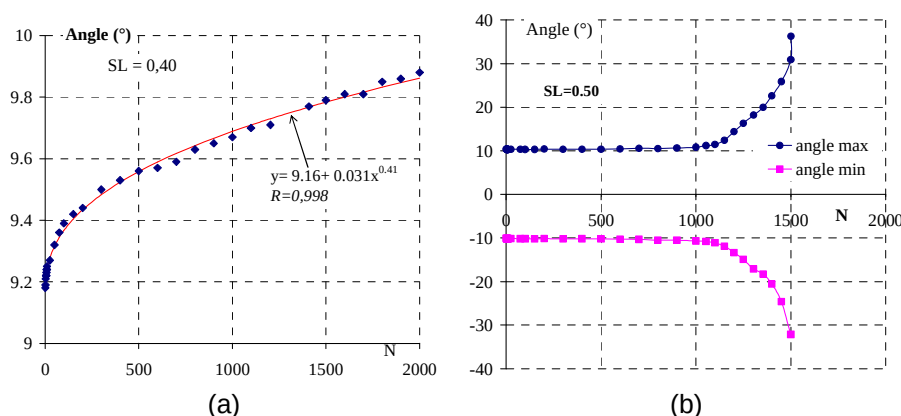


Figure 4. Evolution de la déformation angulaire de torsion en fonction du nombre de cycles N (essais à alterné, $R=-1$).

Pour les deux autres programmes de chargement cyclique, la constatation générale est qu'à moment maximum constant, la déformation angulaire maximale augmente avec le moment moyen. Ceci laisserait à penser que les ruptures interviendraient, pour un moment maximum donné, d'abord pour le moment moyen le plus élevé ($R=0,5$), ceci n'est pas le cas. L'amplitude du chargement intervient considérablement dans le phénomène de rupture. En effet, pour un moment maximum donné la rupture survient d'abord pour le plus faible moment moyen ($R=0$) donc pour l'amplitude la plus élevée. Ce phénomène peut être expliqué par le fait que, en torsion, il n'y a pas de contrainte positive et négative comme dans un chargement en traction-compression, un cycle de chargement alterné ($R=-1$) est équivalent à deux cycles de chargement répété ($R=0$), aussi le chargement alterné cause plus d'endommagement qu'un chargement répété.

4. Modélisation

La prédiction du nombre de cycles à rupture est étudiée en utilisant la théorie de l'endommagement. Le dommage est caractérisé par un paramètre D qui varie entre la valeur 0 quand le matériau est vierge et la valeur 1 lorsque la rupture apparaît.

4.1. Expression du modèle d'endommagement

Les résultats expérimentaux ont montré l'influence du niveau de charge et de l'amplitude de chargement sur la durée de vie des poutres aussi, seul l'évolution non linéaire du dommage ainsi que le cumul non linéaire du dommage ont été retenus. Les modèles usuels d'endommagement ne prennent pas en compte l'influence de la fréquence. Pour combler ce manque, Chaplain (Chaplain, 1996) a proposé de coupler le modèle rhéologique de Kelvin-Voigt (Figure 5) avec le deuxième modèle de Barrett Foschi (Barrett *et al.*, 1978).

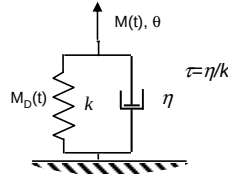


Figure 5. Modèle rhéologique de Kelvin Voigt et notations

L'expression du nouveau modèle obtenu, appelé CF1 (Clermont-Ferrand 1), est :

$$\begin{cases} \frac{dD}{dt} = a \cdot \left(\frac{|M_D(t)| - M_0}{M_s} \right)^b + \lambda D(t) & \text{si } |M_D(t)| > M_0 \\ \frac{dD}{dt} = 0 & \text{si } |M_D(t)| < M_0 \end{cases} \quad [1]$$

Où M_D est la part de l'effort repris par le ressort, elle dépend seulement du rapport $\tau = k / \eta$. M_s est la résistance ultime en statique et M_0 le seuil de dommage. a , b et λ sont des paramètres de calage. L'application du modèle CF1 aux essais à moment moyen non nul donne des prédictions non satisfaisantes, nous avons donc cherché à introduire dans la formulation du modèle le moment moyen. Pour ce faire nous nous sommes inspirés de la relation linéaire de Goodman (Lemaitre *et al.*, 1988) :

$$\sigma_1(\bar{\sigma}) = \bar{\sigma} + \sigma_{l_0} \left(1 - \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_u} \right) \text{ soit } \sigma_1(\bar{\sigma}) = \bar{\sigma} + \sigma_{l_0} (1 - b\bar{\sigma}) \quad [2]$$

où σ_1 est la limite de fatigue pour une contrainte moyenne donnée, σ_{l_0} est la limite de fatigue alternée ($\bar{\sigma} = 0$), σ_u est la contrainte de rupture statique, $b = 1 / \sigma_u$.

Dans l'expression [1], en s'inspirant de la relation [2], le seuil d'endommagement M_0 n'est plus une constante mais une fonction du moment moyen $\bar{M}$:

$$M_0 = \bar{M} + M_{i0} (1 + \alpha \bar{M}) \quad [3]$$

4.1. Mesure de l'endommagement

La détermination de l'évolution de l'endommagement est obtenue en considérant les courbes déformation angulaire - nombre de cycles, ces courbes présentent des similitudes qui nous permettent de définir trois phases de fonctionnement : un écoulement primaire à vitesse d'écoulement décroissante, un écoulement secondaire à vitesse constante et enfin un écoulement tertiaire à vitesse croissante. Cette dernière phase peut être assimilée à l'apparition et au développement de l'endommagement conduisant à la ruine. Nous pouvons ainsi définir un paramètre p représentatif de la dégradation des préférences mécaniques des poutres comme présenter figure 6a. Ce paramètre p correspond à la différence entre le fluage tertiaire et le fluage secondaire, p est ensuite normé à 1 à la rupture pour obtenir le paramètre de dommage D (Figure 6.b).

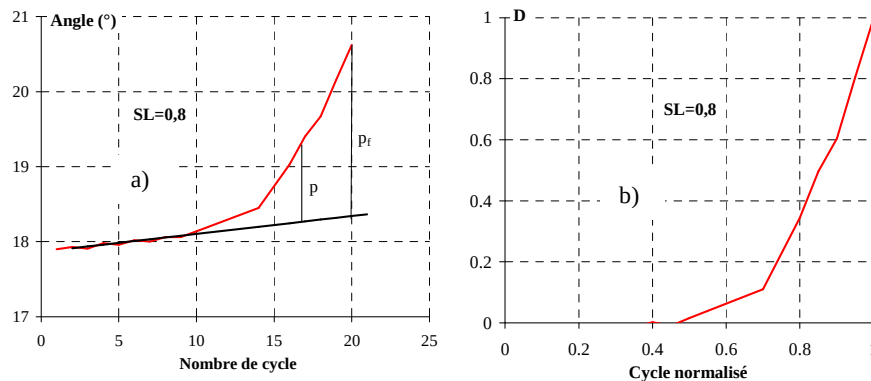


Figure 6 . Détermination du paramètre d'endommagement D : (a) Déformation angulaire maximale / nombre de cycles : détermination de l'indice d'endommagement p (p_f à la rupture) – (b) Evolution de l'endommagement: $D=p/p_f$.

4.2. Prédiction du modèle

Les paramètres du modèle sont déterminés à partir des résultats sous chargements cycliques alternés. Dans ce cas de chargement alterné, le moment moyen est nul ce qui conduit à un seuil d'endommagement M_0 constant et égale à M_{i0} . En se basant sur les résultats expérimentaux, le seuil de niveau de charge (M_{i0}/M_s) est pris égal à 0,47, c'est une valeur en accord avec les valeurs du seuil d'endommagement trouvées dans la littérature. Les valeurs numériques de a , b et λ sont déterminées de telle façon à obtenir les meilleures prévisions tant en nombre de cycles à rupture

quand évolution de D durant les essais cycliques alternés. Les valeurs retenues sont les suivantes : $a=1E14 \text{ s}^{-1}$, $b=30$, $\lambda=0,05 \text{ s}^{-1}$. La valeur de $\alpha=1,26$ a été retenue afin d'obtenir des durées de vie et des évolutions de dommage en accord avec les résultats des essais ondulés. La viscosité η n'ayant pas été mesurée, la valeur $\tau=0,03 \text{ s}$, trouvée par Chaplain (Chaplain, 1996), a été choisie.

La figure 7 représente l'évolution de l'endommagement théorique et expérimentale pour un chargement cyclique alterné ($R=0$). La figure 8 représente l'évolution du nombre de cycles à rupture en fonction du niveau de charge pour quatre valeurs du moment moyen. Sur cette figure sont portés les valeurs expérimentales ainsi que les prévisions du modèle. Compte tenu des incertitudes sur les valeurs des niveaux de charge (estimation des moments ultimes monotones M_s des poutres testées sous chargement cyclique) et malgré la dispersion des résultats et le manque de points expérimentaux, les prévisions du modèle sont acceptables.

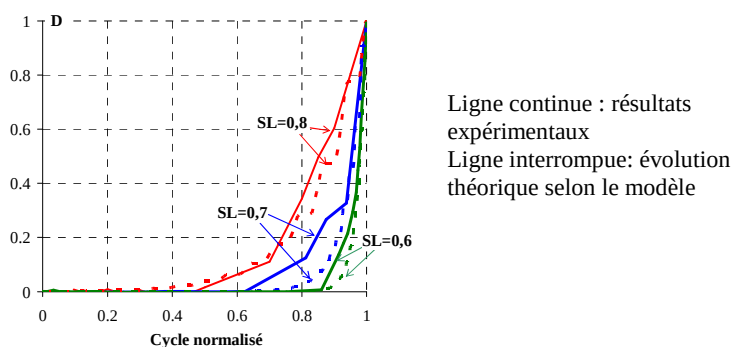


Figure 7. Evolution de l'endommagement sous chargement alterné ($R=0$)

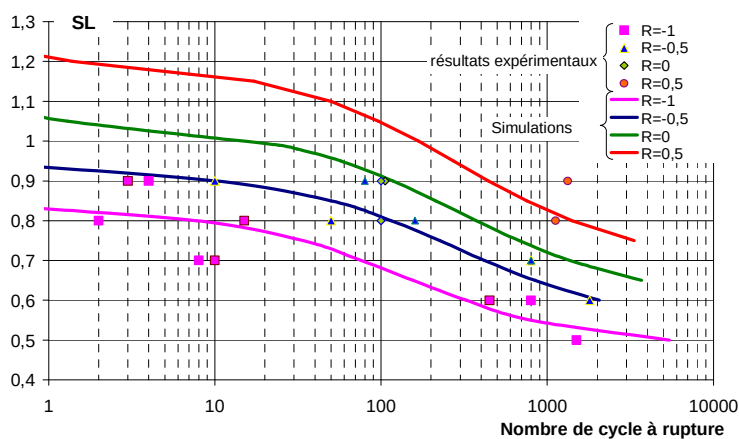


Figure 8. Comparaison entre les prévisions du modèle et les résultats expérimentaux pour quatre valeurs du rapport R (moment mini/ moment maxi)

5. Conclusion

Les essais de torsion cyclique alternée ont montré l'influence du niveau de charge (SL), rapport du moment maximum et du moment de rupture statique, sur le comportement et la durée de vie des poutres en lamellé-collé. Evidemment, les durées de vie les plus courtes sont obtenues pour les plus hauts niveaux de charge. Les ruptures apparaissent avant 2000 cycles (limites des essais) seulement pour les valeurs de SL supérieur à 50%. Les autres programmes de chargement cyclique ondulés ont montré l'influence du moment moyen sur le temps à rupture. Pour un niveau de charge SL donné, un chargement alterné (amplitude = 2SL) donne des durées de vie plus courtes comparées à celles obtenues lors d'un chargement ondulé (amplitude < 2SL). Le modèle de dommage établi est basé sur le modèle de Barrett-Foschi auquel on a greffé un modèle rhéologique de type Kelvin-Voigt pour permettre d'introduire la notion de seuil physique d'endommagement. La prise en compte du moment moyen est faite par l'introduction d'une fonction entre le moment seuil d'endommagement et le moment moyen, fonction inspirée de la relation linéaire de Goodman. Le modèle ainsi obtenu a été calé sur les résultats cycliques alternés en respectant au mieux les durées de vie et les évolutions de dommage expérimentales. Ce modèle donne des prévisions satisfaisantes eu égard au manque de données et à la dispersion des résultats. Pour améliorer cette modélisation il faudrait prévoir d'autres séries d'essais afin d'augmenter le nombre de points de calage et d'atténuer l'effet de la dispersion.

12. Bibliographie

- Barrett J.D., Foschi R.O., «Duration of load and probability of failure in wood. Part I. Modelling creep rupture », *Can. J. Eng.*, vol. 5, 1978, p. 505-514.
- Bond I.P., Ansell M.P., « Fatigue properties of jointed wood composites Part I Statistical analysis, fatigue master curves and constant life diagrams », *J. Mater. Sci.*, vol. 33, 1998, p. 2751-2762.
- Bond I.P., Ansell M.P., « Fatigue properties of jointed wood composites Part II Life prediction analysis for variable amplitude loading », *J. Mater. Sci.*, vol. 33, 1998, p. 4121-4129.
- 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 Sci. Technol.*, vol. 28, 1994, p. 423-436.
- Chaplain M., Comportement sous sollicitations sévères des assemblages de structures en bois : modélisation de l'endommagement, Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand II, 1996.
- Lemaitre J, Chaboche J. L., *Mécanique des matériaux solides*, Dunod, Paris, 1988.
- Nafa Z., Araar M., « Applied data for modeling the behavior in cyclic torsion of beams in glued-laminated wood: influence of amplitude », *J. Wood Sci.*, vol. 49, 2003, p.36-41.