

Sur une éprouvette assurant la stabilité de la propagation de fissure en mode mixte dans le matériau bois

Rostand Moutou Pitti *, Frédéric Dubois, Octavian Pop

Groupe d'étude des matériaux hétérogènes, axe génie civil et durabilité (GEMH-GCD), Université de Limoges, Centre universitaire d'Egletons, 19300 Egletons, France

Reçu le 16 mai 2008 ; accepté après révision le 11 juillet 2008

Disponible sur Internet le 15 août 2008

Présenté par Huy Duong Bui

Résumé

Une nouvelle géométrie appelée 2MCG (Mixed Mode Crack Growth), responsable d'une propagation stabilisée de la fissure en mode mixte dans le matériau bois, est proposée. L'éprouvette citée provient d'une part, d'un harmonieux compromis entre les éprouvettes DCB (Double Cantilever Beam) à inertie variable et CTS (Compact Tension Shear) ; et d'autre part, de l'observation d'une plage de stabilité du taux de restitution d'énergie calculé numériquement via l'intégrale M . **Pour citer cet article : R. Moutou Pitti et al., C. R. Mecanique 336 (2008).**

© 2008 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Abstract

On a specimen providing stable mixed mode crack growth in wooden material. A new Mixed Mode Crack Growth (2MCG) specimen providing stable crack growth propagation in wooden material is presented. The numerical design is the result, on the one hand, of a judicious combination between stable DCB (Double Cantilever Beam) and CTS (Compact Tension Shear) specimens, and on the other hand, of the observation of the elastic energy release rate stability range computed according to M integral. **To cite this article : R. Moutou Pitti et al., C. R. Mecanique 336 (2008).**

© 2008 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Rupture ; Éprouvette bois ; Mode mixte ; Intégrales indépendantes

Keywords: Rupture; Wooden specimen; Mixed mode; Path independent integral

Abridged English version

Today, the environmental problems, such as global warming or the greenhouse effect, are caused by the important appearance rate of carbon dioxide in the atmosphere. One answer of this question is to maintain timber structures. However, according to its anisotropic and viscoelastic behaviour, combining with its orthotropic character, the wood study remains difficult for researchers and engineers community. Due to complex loading modes, this difficulty is

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : rostand.moutou_pitti@yahoo.fr (R. Moutou Pitti).

increased greatly by the action of small's cracks leading to crack growth process, and finally, the collapse of structure. In this context, a new 2MCG (Mixed Mode Crack Growth) timber specimen providing a stability range during the crack growth process is proposed. In the course of creep loading, this stability allows us to evaluate, on the same geometry, viscoelastic characteristics and fractures parameters. The separated method is generated by M integral (defined on curvilinear contour Γ_1), proposed by Chen and Shield [6] on the basis of J integral [5] and the combination of real and virtual [8] displacement fields. Due to numerical modeling reasons, a surface integral $M\theta$ [1] is preferred by introducing θ field [7], Fig. 1(a). Then, according to Eqs. (2) and (3), stress intensity factors [9] and elastic energy release rate are evaluated in opening and shear mode, respectively. This new specimen is the result of a harmonious mixture of stable DCB (Double Cantilever Beam) specimen, Fig. 2, developed by Dubois [2] for opening mode, and CTS (Compact Tension Shear) specimen proposed initially by Richard [3] for mixed mode in isotropic materials, and applied to wood by Valentin [4], Fig. 1(b). According to the analytical formulation (3), implemented in finite element software, the design and the final form of 2MCG specimen, Fig. 3, is proposed. In order to validate the domain stability of this new geometry, different evolutions of elastic energy release rate versus crack length are shown, in mixed mode $\beta = 45^\circ$, see Figs. 4 and 5.

1. Introduction

Les problèmes environnementaux engendrés par l'augmentation de l'effet de serre incitent, aujourd'hui, à pérenniser les possibilités de fixation du gaz carbonique. De ce fait, l'utilisation judicieuse des structures en bois apparaît comme une solution alternative. Cependant, la conjugaison du comportement anisotropique, du caractère viscoélastique et de la particularité orthotropique de ce matériau, rend son utilisation fastidieuse ; complexité décuplée par l'apparition, lors de diverses sollicitations, des fissures de cinétiques mixtes exigeant une séparation des modes de rupture pendant l'évolution du front de fissure. Il apparaît alors nécessaire de proposer de nouvelles méthodes d'appréciation et de différenciation du comportement différé et des processus de fissuration. Dans cette optique, une nouvelle éprouvette séparant les modes mixtes en propagation de fissure suite à un chargement en fluage est présentée. Ce travail consistera à montrer, dans un premier temps, que l'évolution numérique élastique du taux de restitution d'énergie G , calculé via l'intégrale $M\theta$ [1], décroît en fonction de la longueur de fissure pour une plage donnée. Ce qui permettra ultérieurement, lors des essais en fluage, d'évaluer et d'isoler, sur le même support géométrique, les caractéristiques viscoélastiques du matériau et les paramètres de fissuration. La conception de la géométrie résulte d'un croisement entre l'éprouvette DCB (Double Cantilever Beam) à propagation stabilisée en mode I, développée par Dubois [2], et l'éprouvette CTS (Compact Tension Shear) évaluant les modes mixtes de rupture, proposée initialement par Richard [3] pour des matériaux isotropes, et étendu au bois par Valentin [4]. Comme résultats numériques, les évolutions de G sont proposées en fonction de la longueur de fissure pour un taux de mixité $\beta = 45^\circ$.

2. Intégrale $M\theta$

Sur la base de l'intégrale J [5], Chen et Shield [6] ont proposé l'intégrale M , définie sur le contour curviligne Γ_1 , afin d'opérer une séparation des modes mixtes de rupture au cours du processus de propagation élastique de la fissure. Toutefois, pour des impératifs de modélisation numérique, nous lui préférons une définition sur un contour surfacique introduit par un champ θ [7], Fig. 1(a), continu et dérivable sur le domaine Ω . On obtient par conséquent l'intégrale $M\theta$ suivante [1] :

$$M\theta = \frac{1}{2} \int_{\Omega} (\sigma_{ij}^{(u)} \cdot v_{i,j} - \sigma_{ij,k}^{(v)} \cdot u_i) \theta_{k,j} \, d\Omega \tag{1}$$

$\sigma_{ij}^{(u)}$ et $\sigma_{ij}^{(v)}$ représentent respectivement les contraintes réelles et virtuelles résultant des déplacements réels u et virtuels v . Les déplacements virtuels sont empruntés aux formes singulières proposées par Sih [8]. Finalement, les facteurs d'intensité de contrainte réels ${}^u K_I$ et ${}^u K_{II}$ (respectivement en mode I et mode II), sont évalués en choisissant des valeurs adéquates des facteurs d'intensité de contrainte virtuels ${}^v K_I$ et ${}^v K_{II}$ telles que [1,9] :

$${}^u K_I = 8 \frac{M\theta({}^v K_I = 1; {}^v K_{II} = 0)}{C_1} ; \quad {}^u K_{II} = 8 \frac{M\theta({}^v K_I = 0 ; {}^v K_{II} = 1)}{C_2} \tag{2}$$

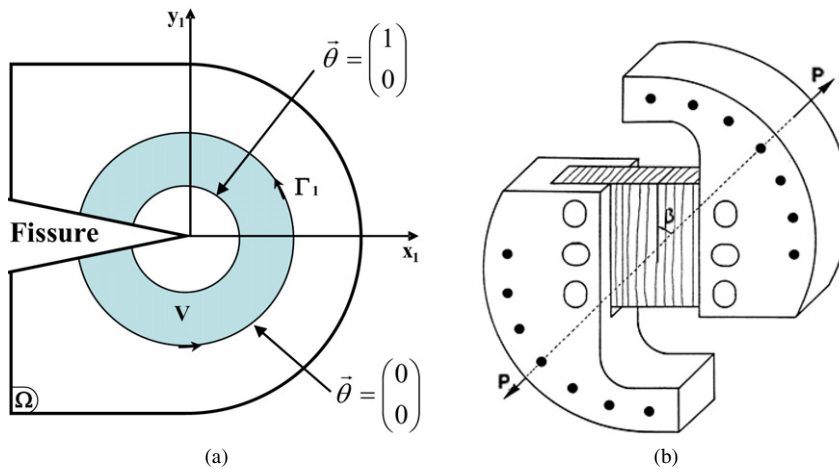


Fig. 1. (a) Domaines d'intégration [1]. (b) Éprouvette CTS [4].

Fig. 1. (a) Integration domain [1]. (b) CTS specimen [4].

C_1 et C_2 désignent les complaisances élastiques propres au mode I et au mode II. Ainsi, les taux de restitution d'énergie respectifs G_1 et G_2 , respectifs à chaque mode, sont donnés par :

$$G = G_1 + G_2 = C_1 \frac{({}^u K_I)^2}{8} + C_2 \frac{({}^u K_{II})^2}{8} \quad (3)$$

3. Conception de l'éprouvette 2MCG

3.1. Éprouvettes DCB et CTS

L'éprouvette DCB (Double Cantilever Beam) à inertie variable, Fig. 2(a), développée par Dubois [2], a été conçue pour assurer une propagation stabilisée en mode I. Ainsi, après la zone d'initiation de la fissure, on observe, sur une plage de propagation donnée, une diminution du taux de restitution d'énergie élastique G , Fig. 2(b). Pendant cette phase, seuls les effets viscoélastiques vont participer à la progression du front de fissure lorsque l'éprouvette sera sollicitée en fluage. Les caractéristiques viscoélastiques seront ainsi clairement découplées des paramètres de fissuration.

L'éprouvette CTS (Compact Tension Shear) est, quant à elle, conçue pour évaluer l'ensemble des modes mixtes dans différents matériaux, Fig. 1(b). Elle a été développée à l'origine par Richard [3] pour des sollicitations mixtes dans les matériaux isotropes. Valentin [4] l'a étendue au matériau bois. Deux bras en acier sont parsemés de perçages où s'appliquent des forces symétriques P orientées par des angles β de mixités. Sur les deux éprouvettes, la fissure reste orientée dans la direction de forte orthotropie.

3.2. Éprouvette 2MCG

La conception de l'éprouvette 2MCG (Mixed Mode Crack Growth) découle d'une combinaison des deux solutions géométriques rappelées précédemment. Conformément à la Fig. 3(b), l'éprouvette DCB initiale a été modifiée par l'ajout d'un talon inférieur pour fixer le dispositif de sollicitation en mode mixte. Le talon supérieur a été légèrement incliné afin d'assurer la rigidité au voisinage des deux congés de raccordement. Le corps de l'éprouvette présente une inertie croissante vis-à-vis de la pointe de fissure afin de garantir la stabilité du taux de restitution d'énergie. Quatre bras en PVC, disposés symétriquement, sont solidaires de l'éprouvette bois, Fig. 3(a). Des perçages permettent des sollicitations caractérisées par un taux de mixité variable β identiquement à l'éprouvette CTS. La géométrie optimisée, Fig. 3(a), est obtenue grâce à un calcul aux éléments finis en traduisant l'évolution du taux de restitution d'énergie élastique G définie par l'équation (3).

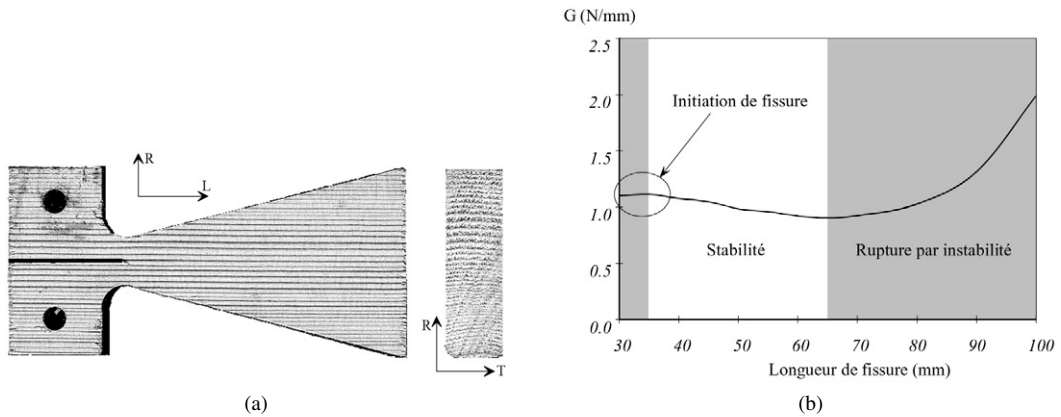


Fig. 2. (a) Epreuve DCB [2]. (b) Taux de restitution d'énergie G [2].

Fig. 2. (a) DCB specimen [2]. (b) Energy release rate G [2].

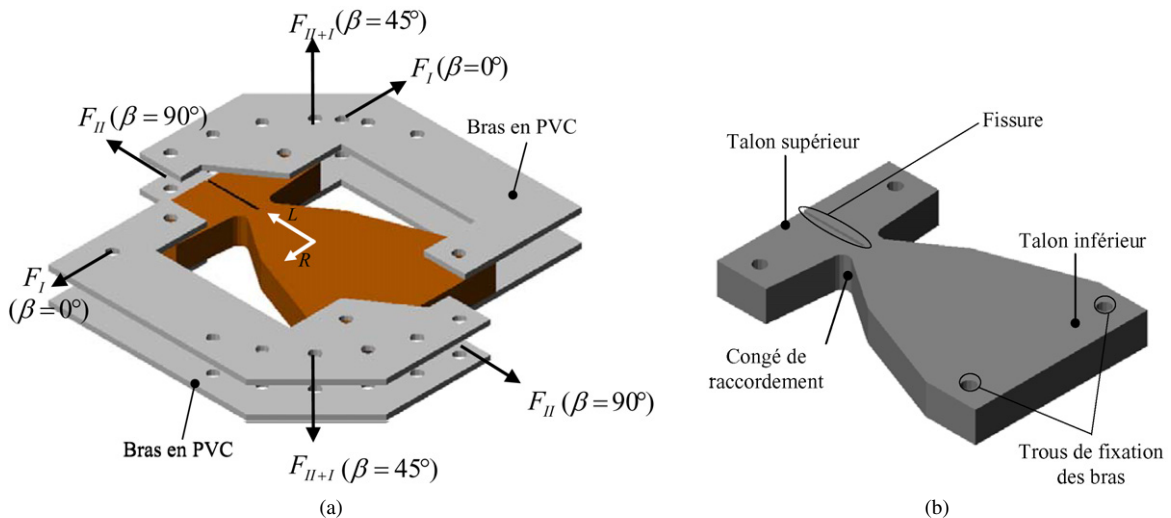


Fig. 3. Épreuve 2MCG.

Fig. 3. 2MCG specimen.

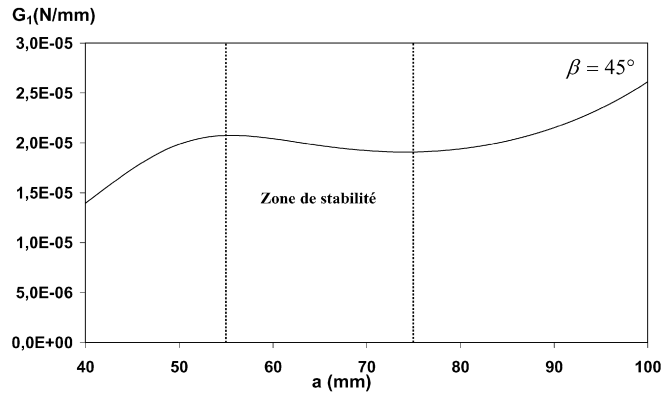
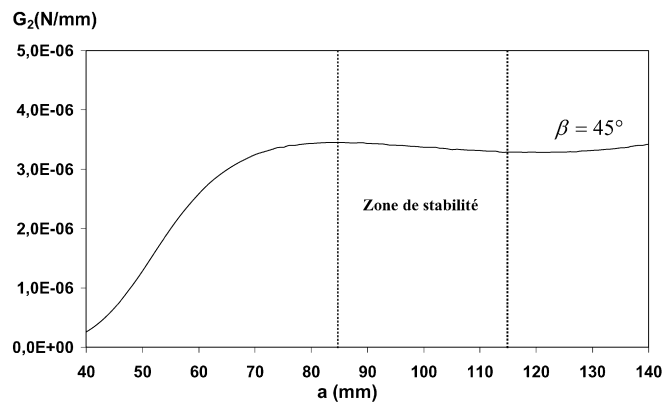
4. Résultats numériques

Les caractéristiques mécaniques du matériau (Pin maritime) utilisées pour la modélisation numérique, sont les suivantes : $E_X = 15\,000$ MPa, $E_Y = 600$ MPa, $G_{XY} = 700$ MPa, avec un chargement unitaire et un coefficient de poisson de $\nu = 0,4$ pris en compte dans la matrice de rigidité élastique suivante :

$$C = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_X} & -\frac{\nu}{E_X} & 0 \\ -\frac{\nu}{E_X} & \frac{1}{E_Y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{XY}} \end{bmatrix} \tag{4}$$

Les Figs. 4 et 5 présentent les évolutions des taux de restitution d'énergie élastique G_1 et G_2 , en mode mixte $\beta = 45^\circ$ (respectivement part du mode I et part du mode II), en fonction de la longueur de fissure conformément à l'équation [3].

Les stabilités en mode mixte (part de mode I et de mode II) sont observées respectivement pour des plages de longueurs de fissure a de 20 mm ($55 \text{ mm} \leq a \leq 75 \text{ mm}$) et 30 mm ($85 \text{ mm} \leq a \leq 115 \text{ mm}$). Dans les deux cas, on observe, dans une première phase, une zone d'instabilité afin d'amorcer le processus de fissuration et d'en mesurer les valeurs critiques de G_1 et G_2 , dans une seconde phase, une plage de propagation stabilisée durant laquelle seules les

Fig. 4. Taux de restitution d'énergie en mode mixte $\beta = 45^\circ$ (part du mode I).Fig. 4. Energy release rate in mixed mode $\beta = 45^\circ$ (part of opening mode).Fig. 5. Taux de restitution d'énergie en mode mixte $\beta = 45^\circ$ (part du mode II).Fig. 5. Energy release rate in mixed mode $\beta = 45^\circ$ (part of shear mode).

effets viscoélastiques (en fluage) vont participer à l'avancée du front de fissure. Enfin une dernière phase qui symbolise la ruine du matériau.

5. Conclusions

Une nouvelle éprouvette découplant les modes mixtes de rupture en propagation de fissure a été présentée. Sa conception découle d'un compromis entre les éprouvettes DCB à propagation stabilisée et CTS. L'intégrale $M\theta$ a été utilisée pour évaluer le découplage des modes. Ainsi, les évolutions numériques du taux de restitution d'énergie élastique G , en fonction de la longueur de fissure, présente une plage de stabilité pour une sollicitation mixte de 45° . Ce fait justifie la capacité de l'éprouvette 2MCG à distinguer l'action des propriétés viscoélastiques dans le processus de fissuration, lors des essais en fluage. Il reste dorénavant, à effectuer des campagnes expérimentales afin de conforter les résultats obtenus.

Références

- [1] R. Moutou Pitti, F. Dubois, C. Petit, N. Sauvat, Mixed mode fracture separation in viscoelastic orthotropic media: numerical and analytical approach by the $M\theta$, *Int. J. Fracture* 145 (2007) 181–193.
- [2] F. Dubois, C. Chazal, C. Petit, Viscoelastic crack growth process in wood timbers: An approach by the finite element method for mode I fracture, *Int. J. Fracture* 113 (2002) 367–388.
- [3] H.A. Richard, A new compact shear specimen, *Int. J. Fracture* 17 (1981) R105–R107.
- [4] G. Valentin, P. Caumes, Crack propagation in mixed mode in wood: a new specimen, *Wood Sci. Technol.* 23 (1989) 43–54.

- [5] J.R. Rice, A path independent integral and the approximate analysis of strain conservations by notches and cracks, *J. Appl. Mech.* 35 (1968) 379–385.
- [6] F.M.K. Chen, R.T. Shield, Conservation laws in elasticity of J-integral type, *J. Appl. Mech. Phys.* 28 (1977) 1–22.
- [7] P. Destuynder, M. Djaoua, S. Lescure, Quelques remarques sur la mécanique de la rupture élastique, *J. Méc. Théor. Appl.* 2 (1983) 113–135.
- [8] G.C. Sih, Strain energy density factor applied to mixed mode crack problems, *Int. J. Fracture* 17 (1974) 305–321.
- [9] R. Moutou Pitti, F. Dubois, O. Pop, N. Sauvat, C. Petit, Intégrale M_V pour la propagation de fissure dans un milieu viscoélastique, *C. R. Mecanique* 335 (2007) 727–731.