



HAL
open science

Nouvelle approche expérimentale pour le découplage de modes mixtes de rupture en propagation de fissure dans le bois

Rostand Moutou Pitti, Frédéric Dubois, Octavian Pop

► To cite this version:

Rostand Moutou Pitti, Frédéric Dubois, Octavian Pop. Nouvelle approche expérimentale pour le découplage de modes mixtes de rupture en propagation de fissure dans le bois. Colloque Geodim'08, GeM,, Apr 2008, Saint Nazaire, France. hal-01616919

HAL Id: hal-01616919

<https://hal.science/hal-01616919>

Submitted on 15 Oct 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Nouvelle approche expérimentale pour le découplage de modes mixtes de rupture en propagation de fissure dans le bois

Rostand Moutou Pitti* — Frédéric Dubois* — Octavian Pop*

* Groupement d'Etudes des Matériaux Hétérogènes, axe Génie Civil et Durabilité
Université de Limoges, Centre Universitaire Génie Civil,
Boulevard Jacques Derche, 19300 Egletons
rostand.moutou-pitti@etu.unilim.fr

RÉSUMÉ. Il est présenté une nouvelle éprouvette 2MCG (Mixed Mode Crack Growth) assurant la stabilité de la fissure pendant le processus de propagation pour différents modes mixtes de rupture. Sa conception découle d'un couplage judicieux entre l'éprouvette DCB (Double Cantilever Beam) à propagation stable, et l'éprouvette CTS (Constant Tension Shear). La stabilité des résultats provient de l'évaluation par éléments finis du taux de restitution d'énergie élastique G via une nouvelle intégrale appelée $M\theta$, assurant le découplage des modes mixtes de rupture durant la propagation de fissure. En termes de résultats, la conception numérique de l'éprouvette est présentée. Grâce à une presse, munie d'un système d'acquisition, et à l'analyse d'images, G est évalué en mode I et en mode mixte.

ABSTRACT. A new 2MCG (Mixed Mode Crack Growth) specimen, ensures the crack stability during crack growth phases for different mixed modes fractures is presented. His design is due to a combination between stable Double Cantilever Beams (DCB) specimen, and Constant Tension Shear (CTS) specimen. With a finite element software, the stability results is given by the evaluation of elastic energy release rate with a new integral parameter, called $M\theta$, separating mixed modes fractures during crack growth process. As results, a numerical design of the 2MCG specimen is proposed. With hydraulic press, equipped with acquisition system, and analysis frames, elastic energy release rate G is computed in opening mode and mixed mode.

MOTS-CLÉS: Rupture, Eprouvette de propagation, Modes mixtes, Intégrales invariantes.

KEYWORDS: Fracture, Crack growth specimen, Mixed modes, Path independent integrals.

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 anisotrope, du caractère viscoélastique et la particularité orthotrope de ce matériau, rend son utilisation difficile ; complexité décuplée par l'apparition, lors de diverses sollicitations, des fissures de cinétiques mixtes exigeant une séparation des modes de rupture au cours de la propagation. Il est 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 en fluage est présentée. Ce travail consiste à montrer, dans un premier temps, que l'évolution numérique élastique du taux de restitution décroît en fonction de la longueur de fissure pour une plage donnée. Ce qui permettra ultérieurement, lors des essais en fluage, d'évaluer simultanément, les caractéristiques viscoélastiques du matériau et les paramètres de fissuration. La conception de l'éprouvette repose sur un croisement de l'éprouvette à propagation stable en mode I (DCB) développée par Dubois (Dubois *et al.*, 2002) avec l'éprouvette Constant Tension Shear (CTS) découplant les modes de rupture, proposée initialement par Richard (Richard, 1981) pour des matériaux composites, et étendu au bois par Valentin (Valentin *et al.*, 1989).

L'intégrale $M\theta$ développée par Moutou Pitti (Moutou Pitti *et al.* 2006 ; 2007_a), permettant la séparation des modes mixtes en propagation, est rappelée dans la première partie. Son développement s'appuie sur les théorèmes de conservation énergétique (Noether, 1918 ; Bui, 2007) et un jumelage des champs de déplacements virtuels et réels (Chen *et al.* 1977). Le second point rappelle les développements des éprouvettes DCB à propagation stabilisée et CTS. Simultanément, il sera présenté la conception de l'éprouvette à propagation stabilisée en mode mixte et sa forme finale optimisée. Le traitement par analyse d'images permet alors d'obtenir, avec précision, l'évolution de la force critique en fonction de l'avancée du front de fissure. Un traitement par la méthode de la complaisance peut enfin traduire ces résultats en terme de taux de restitution d'énergie.

2. L'intégrale $M\theta$

Afin de déterminer les modes d'ouverture et de cisaillement dans le bois au cours du processus de propagation instantanée de la fissure, Moutou Pitti (Moutou Pitti *et al.* 2006 ; 2007_a ; 2007_b) a proposé une adaptation de l'intégrale M , définie sur un contour curviligne. Celle-ci est développée à partir d'une approche

Noethérienne (Noether, 1971). Toutefois, cette intégrale étant définie sur un contour curviligne, nous lui préférons, pour des impératifs de modélisation numérique, une définition sur un contour surfacique introduit par un champ θ (Destuynder *et al.* 1983), Figure 1, continu dans le domaine Ω . On obtient par conséquent l'intégrale $M\theta$ suivante :

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

$$+ \frac{1}{2} \cdot \int_{\Omega} (\sigma_{ij}^{(v)} \cdot (u_{i,j})_{,k} - \sigma_{ij}^{(u)} \cdot (v_{i,j})_{,k}) - ((\sigma_{ij}^{(v)} \cdot u_{i,j})_{,k} + (\sigma_{ij}^{(u)} \cdot v_{i,j})_{,k}) \cdot \theta_k d\Omega$$

$\sigma_{ij}^{(u)}$ et $\sigma_{ij}^{(v)}$ représentent respectivement les contraintes réelles et virtuelles résultant des déplacements réels u et virtuels v définis par Chen (Chen *et al.* 1977). Ces derniers sont empruntés aux formes singulières proposées par Shi (Shi, 1974). 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 :

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

Les taux de restitution d'énergie pour chaque mode (G_1 et G_2 respectivement) en sont déduits par :

$$G_1 = C_1 \cdot \frac{({}^u K_I)^2}{8} \quad \text{et} \quad G_2 = C_2 \cdot \frac{({}^u K_{II})^2}{8} \quad [3]$$

C_1 et C_2 désignent les complaisances élastiques propres à chaque mode (Valentin et Morlier, 1982).

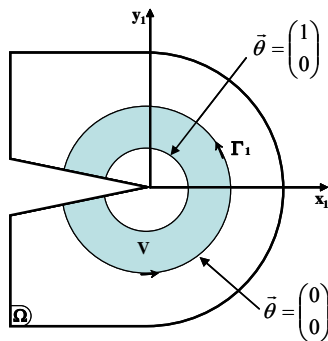


Figure 1. Domaine et contour d'intégration

3. Conception numérique de l'éprouvette

3.1. Eprouvette DCB et CTS

L'éprouvette DCB à propagation stable, Figure 2. (a), développée par Dubois (Dubois *et al.*, 2002) a été conçue pour assurer une propagation stabilisée en mode I. Elle permet de définir sur une même éprouvette, les propriétés viscoélastiques réduites ainsi que les propriétés de rupture en mode d'ouverture. La fissure est orientée dans le sens des fibres ; deux axes permettant l'application des efforts symétriques.

L'éprouvette CTS est destinée, quant à elle, à évaluer les modes I, II et mixtes de rupture, Figure 2. (b). Elle a été développée à l'origine par Richard (Richard, 1981) pour des sollicitations mixtes dans les matériaux composites. Valentin (Valentin *et al.*, 1989) l'a étendue au matériau bois. L'ensemble formé de deux bras en acier, encadrant une éprouvette bois, munis de perçages permettant un passage progressif d'une sollicitation en mode I vers le mode II en proposant des taux de mixité intermédiaires.

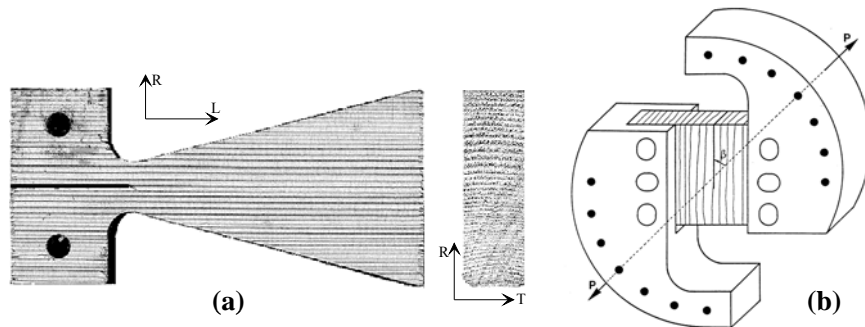


Figure 2. a : Eprouvette DCB (Dubois *et al.*, 2002); b : Eprouvette CTS (Valentin *et al.*, 1989)

3.2. Eprouvette à propagation stable en mode mixte (2MMCG)

La conception de l'éprouvette 2MCG (Mixed Mode Crack Growth) découle d'une combinaison des deux solutions géométriques définies précédemment. L'éprouvette, Figure 3, a été modifiée par l'ajout d'un talon inférieur pour fixer le dispositif de sollicitation. Le talon supérieur a été légèrement incliné afin d'assurer la rigidité au niveau 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. Des perçages permettent des sollicitations caractérisées par un taux de mixité variable. La géométrie optimisée est

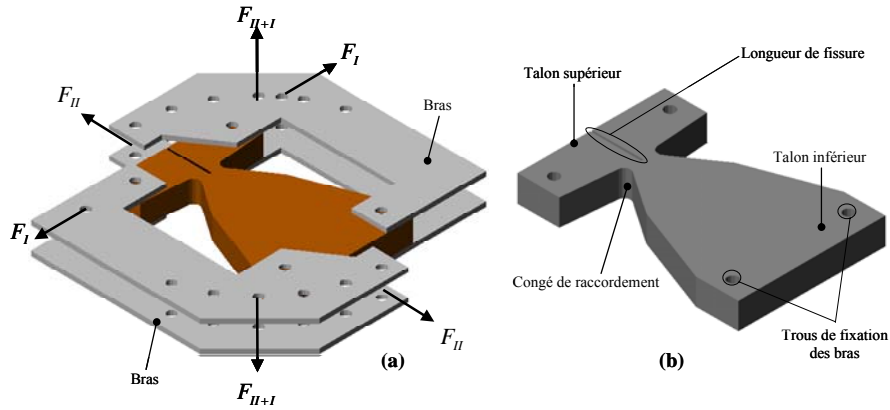


Figure 3. a : Eprouvette stable en mode mixte; b : éprouvette bois.

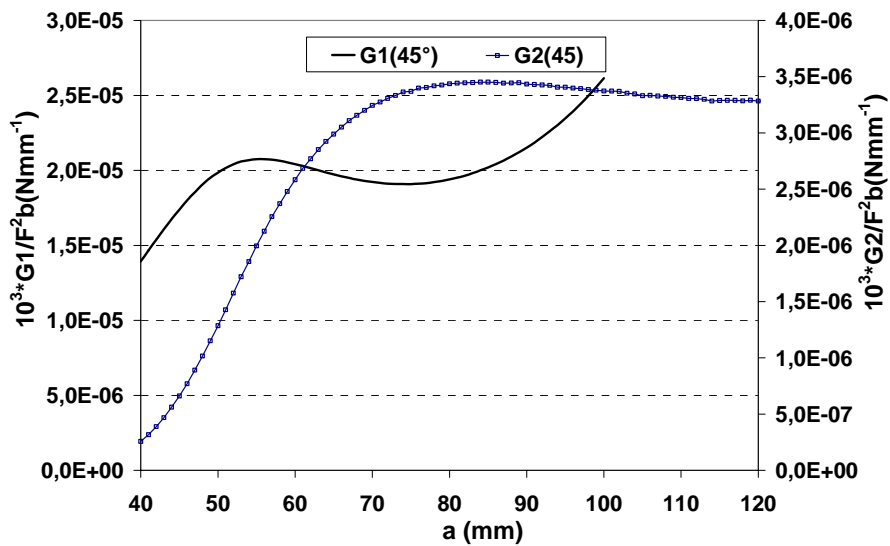


Figure 4. G_1 et G_2 en mode mixte 45° .

obtenue par un calcul aux éléments finis en traduisant l'évolution du taux de restitution d'énergie élastique G définie par l'équation [3].

Ainsi, la Figure 4 présente les évolutions de G_1 et G_2 en fonction de la longueur de fissure conformément à l'équation [3]. Les stabilités en mode mixte (part de mode I et II) sont observées respectivement pour des plages de 25mm ($55\text{mm} \leq a \leq 80\text{mm}$) et 30mm ($85\text{mm} \leq a \leq 110\text{mm}$). Dans les deux cas, on

observe, dans une première phase, une plage 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 effets viscoélastiques (en fluage) vont participer à l'avancée du front de fissure.

4. Résultats expérimentaux

Le Hêtre a été retenu pour les essais de fissuration avec une entaille initiale d'une longueur de 30mm orientée suivant la direction des fibres et affinée au Cutter. Les différentes sollicitations sont assurées par une presse pilotée en déplacement ($v = 0,01\text{mm/s}$) munie d'un capteur LVDT permettant d'enregistrer le déplacement des points d'application de l'effort. L'évolution de la fissure au cours de l'essai est suivie par un système d'acquisition d'images, Figure 5. L'ensemble des mesures étant au final synchronisé.

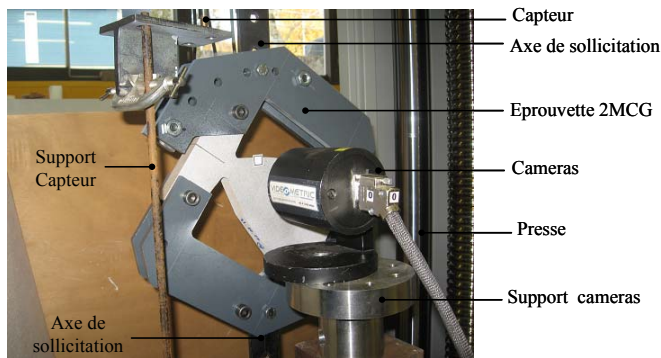


Figure 5. Dispositif expérimental en mode mixte 45° .

La Figure 6 traduit les évolutions des forces en fonction de la longueur de fissure, respectivement pour le mode I et le mode mixte. On notera que le mode mixte présenté est une combinaison du mode I et du mode II. Ces points sont obtenus par synchronisation en relevant les forces induisant une propagation de fissure sur la courbe force-déplacement, et en identifiant les images correspondantes. On constate que la force de rupture en mode I est de 839 N pour une longueur de fissure de 87 mm et de 2950 N pour 80 mm environ en mode mixte. On remarque en outre, que la longueur de fissure à la rupture correspond bien au début des plages d'instabilité observées à la Figure 4.

La Figure 7 présente les variations des taux de restitution d'énergie G en mode I et en mode mixte global en fonction de la longueur de fissure. G est obtenu par la méthode de la complaisance de la manière suivante : $G = (F^2 / 2 \cdot b) \cdot (\partial C / \partial a)$. Avec F la force de rupture, b l'épaisseur de l'éprouvette ($b = 25\text{ mm}$), C la complaisance, et

a la longueur de la fissure. Les valeurs observées représentent les valeurs critiques de G lors de la propagation.

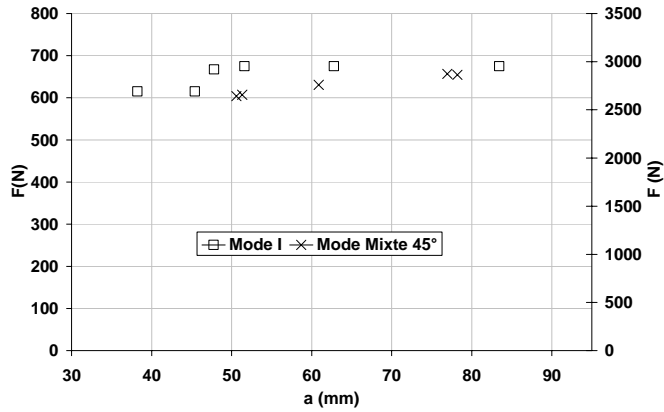


Figure 6. Forces/longueur de fissure en mode I et en mode mixte.

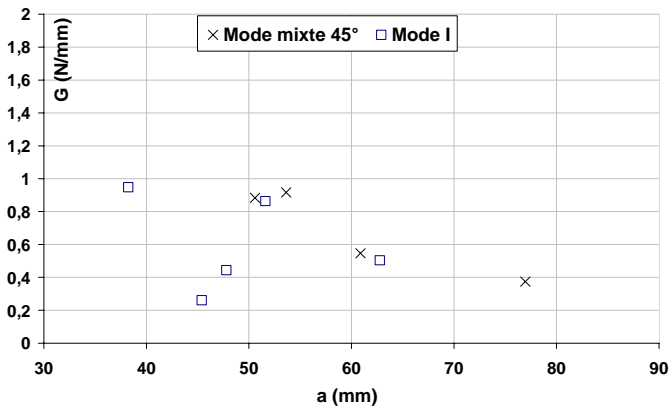


Figure 7. G / longueur de fissure en mode I et mode mixte global.

5. Conclusion

Une nouvelle éprouvette découplant les modes mixtes de rupture en propagation 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, une évolution numérique du taux de restitution d'énergie élastique G présente une plage de stabilité pour l'ensemble des modes de

sollicitation. Ce qui certifie que cette éprouvette peut être retenue pour des essais en fluage. Grâce à une presse, et aux méthodes par analyse d'images, la force et la longueur de fissure sont exploitées pour évaluer la complaisance et G . Il reste dans dorénavant, à effectuer des essais à long terme pour apprécier simultanément le comportement viscoélastique du matériau et les paramètres de fissuration.

6. Bibliographie

- Bui H.D., « Conservation laws, duality and symmetry loss in solid mechanics », *International Journal of Fracture*, DOI 10.1007/s10704-007-9145-7.2007.
- Destuynder P., Djaoua M., Lescure S., « Quelques remarques sur la mécanique de la rupture élastique », *Journal de Mécanique Théorique et Appliquée*, vol. 2, n° 1, 1983, p. 113-115.
- Dubois F., Chazal C., Petit C., « Viscoelastic crack growth process in wood timber: an approach by the finite element method for mode I fracture. », *International Journal of Fracture*, vol. 113, n° 4, 2002, p. 367-388.
- Moutou Pitti R., Dubois F., Petit C., Sauvat N., « Fracture of wood under mixed mode loading: numerical approach by the $M\theta$ -integral », *International 9th World Conference Timber Engineering (WCTE)*, Portland, OR, USA, August 6-10, 2006.
- Moutou Pitti R., Dubois F., Octavian P., Sauvat N., Petit C., « Intégrale Mv pour la propagation de fissure dans un milieu viscoélastique », *Comptes Rendus Mécaniques*, vol. 335, n° 11, 2007_a, p. 727-731.
- Moutou Pitti R., Dubois F., Petit C., Sauvat N., « Mixed mode fracture separation in viscoelastic orthotropic media : numerical approach by the $M\theta$ -integral », *International Journal of Fracture*, vol. 125, n°3, 2007_b, p. 181-193.
- Noether E., « Invariant variations problem », *Transport Theory and Statistical Physics*, vol. 1, n° 3, 1971, p. 183-207.
- Richard HA., « A new compact shear specimen », *International Journal of Fracture*, vol. 17, n° 5, 1981, p. R105-R107.
- Sih GC., « Strain energy density factor applied to mixed mode crack problems », *International Journal of Fracture*, vol. 17, 1974, p. 305-321.
- Valentin G., Caumes P., « Crack propagation in mixed mode in wood: a new specimen », *Wood Science and Technology*, vol. 23, n° 1, 1989, p. 43-53.
- Valentin G., Morlier P., « A criterion of crack propagation in timber », *Matériaux et constructions*, vol. 88, 1982, p. 291-298.