
Modèle de rupture en mode mixte basé sur une analyse énergétique : application au bois

Cédric Perez¹, Stéphane Morel¹, Myriam Chaplain¹, Jean-Luc Coureau¹

¹ Université de Bordeaux, UMR 5295, Institut de Mécanique et d'Ingénieur (I2M), 351 cours de la Libération, 33400 Talence, France (cedric.perez@u-bordeaux.fr, stephane.morel@u-bordeaux.fr, myriam.chaplain@u-bordeaux.fr, jean-luc.coureau@bordeaux.fr)

RÉSUMÉ.

Un modèle énergétique est proposé pour décrire la propagation de fissure en mode mixte I+II à partir des propriétés de ruptures en modes purs (ouverture et cisaillement plan). Les paramètres de rupture en modes purs sont déterminés sur la base de courbes de résistance à la propagation de fissure dites Courbes-R, par la méthode de la Mécanique Linéaire Élastique de la Rupture équivalente (MLER). Les courbes-R sont estimées à partir d'essais de caractérisation sur du pin Maritime en mode pur I et II pour différents teneurs en eau. La confrontation en mode mixte des simulations à l'expérimental, essais Mixte Mode Bending (MMB), montre que le modèle décrit raisonnablement le comportement à rupture en mode mixte du bois.

ABSTRACT.

This study proposes a fracture model for quasi-brittle materials which can describe the crack growth in mixed mode conditions, based on pure mode I (opening) and mode II (plan shear) R-curves. Those curves are determined by fracture characterization tests on maritime pine (*Pinus pinaster*) under several moisture content. A comparison between the model and Mixed Mode Bending (MMB) tests shows that the mixed mode R-curve is well described by the proposed model.

MOTS-CLÉS : Modèle, Rupture, Mode mixte, Courbe-R, Bois, Teneur en eau.

KEY WORDS: Criterion, Fracture, Mixed-mode, R-curve, Wood, Moisture.

1. Introduction

Le bois est un matériau quasi-fragile pour lequel l'effet de l'hygrométrie sur le comportement à rupture est peu traité dans la littérature. Par ailleurs, le dimensionnement des structures bois basé sur l'Eurocode 5 considère uniquement le mode de rupture en mode d'ouverture de fissure (mode I) alors que bien souvent la rupture du bois se produit en mode mixte (mode I + mode II), par exemple dans le cas de poutres à épaulement ou présentant des singularités [JOC 15, SOR 18].

Afin de mieux comprendre le comportement à la rupture des éléments structuraux bois, il est nécessaire d'étudier la rupture sous différents teneurs en eau du bois. Un modèle de rupture en mode mixte basé sur une analyse énergétique est proposé pour décrire le comportement à rupture. Pour définir les paramètres du modèle, des essais de propagation de fissure en mode I (ouverture) et mode II (cisaillement plan) sont réalisés sur des éprouvettes de type MMB (*Mixed-Mode Bending*) en pin Maritime conditionnées pour différents teneurs en eau. Les réponses force-déplacement pour différents teneurs eau sont analysées sur la base de la Mécanique Linéaire Élastique de la Rupture équivalente (MLEReq) [BAZ 97, MOR 07] qui permet d'estimer les courbes de résistances à la propagation de fissure (courbes-R) [PHA 16a]. Ce modèle est ensuite confronté à des essais de rupture en mode mixte obtenue par le test MMB. L'avantage des essais MMB est de conserver un taux de mixité constant tout au long de la propagation de fissure [PHA 16b]

2. Modèle de rupture en mode mixte

La rupture en mode mixte dans le bois se produit dans différentes situations, dans des éléments d'assemblages (Goujouns) [LAR 13], dans des éléments structurels (poutres à épaulement) [SOR 18]. De plus, le bois est un matériau quasi fragile pour lequel la Mécanique Linéaire Élastique de la Rupture (MLER) n'est pas directement applicable (zone d'élaboration de la rupture de taille non négligeable). Toutefois une adaptation de la MLER, dite MLER équivalente permet d'estimer les courbes de résistance à la propagation de fissure élastique équivalente (Δa_i) [BAZ 97, MOR 07]. Ces courbes-R ($G_{R_i}(\Delta a)$), présentent une partie croissante associée au développement de la zone d'élaboration de fissure ou Fracture Process Zone (FPZ), suivie d'un plateau (résistance critique) associé à la propagation auto-similaire de la fissure ($G_{R_{c_i}}$) [LAR 13] telle que :

$$G_{R_i}(\Delta a) = \begin{cases} G_{R_{c_i}} \left(\frac{\Delta a_i}{\Delta a_{c_i}} \right)^{\beta_i} & \text{si } \Delta a_i < \Delta a_{c_i} \\ G_{R_{c_i}} & \text{si } \Delta a_i \geq \Delta a_{c_i} \end{cases} \quad [1]$$

avec $i = I, II, I+II$.

De Moura [DE M 10] propose un modèle de rupture en mode mixte basé uniquement sur les résistances critiques des composantes de Mode I ($I+II$) et de Mode II ($II+II$) de la résistance de Mode Mixte ($I+II$). Ainsi ce modèle prend seulement en compte la partie plateau de la courbe-R ($G_{R_{c_i}}$) et ne décrit pas la partie de la courbe-R associée au développement de la FPZ. Nous proposons dans cette étude une généralisation du modèle de [DE M 10] à tout incrément de longueur de fissure et notamment ceux associés à la phase de développement de la FPZ ($\Delta a_i < \Delta a_{c_i}$), *i.e.*, partie croissante de la courbe-R. Cette généralisation, inspirée du modèle proposé par Lartigau [LAR 13], permet de considérer des largeurs de FPZ différentes en modes purs I et II ($\Delta a_{cI} \neq \Delta a_{cII}$). En effet dans la littérature [PHA 16b], il est explicite que la taille de la FPZ évolue en fonction du taux de mixité ($\psi_G = G_{I+II}/G_{II+II}$). En effet, plus le taux de mixité est proche du mode de rupture en cisaillement plan plus la taille critique de la FPZ sera grande pour une teneur en eau fixée. Pour prendre en compte ce phénomène, le modèle présenté ne sera plus fonction de la longueur de la fissure mais fonction du taux de développement de la FPZ, noté ϕ_a :

$$\phi_a = \frac{\Delta a_i}{\Delta a_{c_i}} = \frac{\Delta a_I}{\Delta a_{cI}} = \frac{\Delta a_{II}}{\Delta a_{cII}} = \frac{\Delta a_{I+II}}{\Delta a_{cI+II}} \quad [2]$$

Ainsi l'expression de la courbe-R [1] devient :

$$G_{R_i}(\phi_a) = \begin{cases} G_{R_{c_i}}(\phi_a)^{\beta_i} & \text{si } \phi_a < 1 \\ G_{R_{c_i}} & \text{si } \phi_a \geq 1 \end{cases} \quad [3]$$

Enfin, en prenant en compte la contribution des modes pur dans le mode mixte, le modèle s'écrit :

$$\left(\frac{G_{R_{I+II}}(\phi_a)}{G_{R_I}(\phi_a)} \right)^p + \left(\frac{G_{R_{II+II}}(\phi_a)}{G_{R_{II}}(\phi_a)} \right)^q = 1 \quad [4]$$

avec en première approximation $p=q=1$.

Les paramètres à identifier pour le modèle de rupture en mode mixte sont les résistances critiques en mode pur I et II ($G_{R_{cI}}$ et $G_{R_{cII}}$), et les longueurs critiques de la FPZ (Δa_{cI} et Δa_{cII}).

3. Identifications des paramètres

Les paramètres sont identifiés par des essais de caractérisation en mode pur I et II. Les éprouvettes sont de même géométrie. Les deux types d'essais sont réalisés dans la configuration Tangentiel-Longitudinal (T-L) *i.e.*, conduisant à une propagation de fissure dans le plan Radial-Longitudinal (R-L). Les éprouvettes sont conditionnées pour 6 teneurs en eaux différentes allant de 6% à 21%. Les essais en mode I sont asservis en déplacement d'ouverture mesuré à proximité du fond de l'entaille initiale, tandis que les essais en mode II sont asservis en déplacement à partir de la flèche du spécimen. Les vitesses de déplacement ont été choisies afin d'avoir une durée d'essai comprise entre 180 s et 300 s et ainsi éviter les effets de la viscosité.

Les résultats obtenus à partir du traitement des données expérimentales (Figure 1) mettent en avant la dépendance de l'énergie de propagation de la fissure (Figure 1 (a) et (c)) et de la taille critique de la FPZ (Figure 1 (b) et (d)) en fonction de la teneur en eau (H) du bois. L'énergie G_{RCi} et la zone d'élaboration Δa_{Ci} augmentent avec l'humidité. Ainsi, un bois humide sera plus résistant à la propagation de fissure, en mode I et en mode II, qu'un bois sec. De plus, les résultats confirment le fait que les énergies de propagation et la taille critique de la FPZ évoluent entre le mode I et le mode II *i.e.*, G_{RCII} et Δa_{CII} sont supérieurs à G_{RCI} et Δa_{CI} pour une humidité fixée.

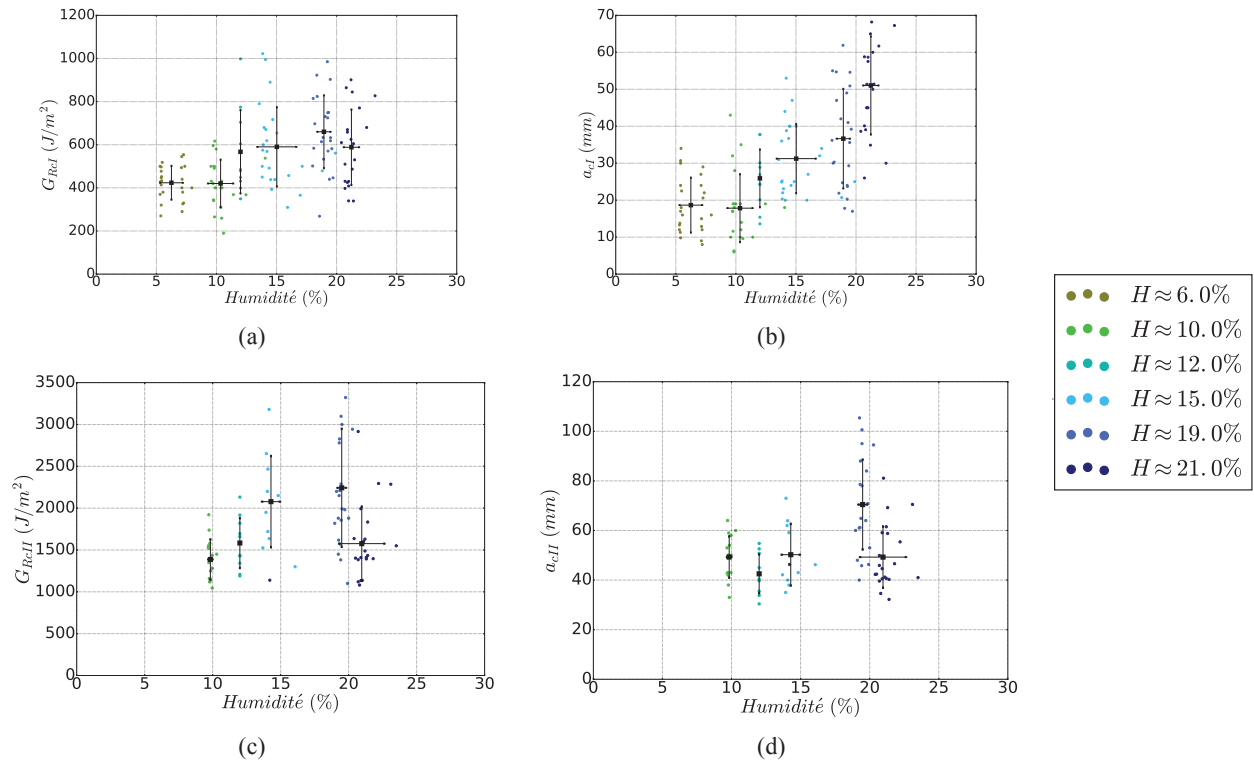


Figure 1. Energie de résistance à la propagation de fissure en fonction de l'humidité : (a) en mode I et (c) en mode II et taille critique de la FPZ en fonction de l'humidité dans le bois : (b) en mode I et (d) en mode II.

4. Confrontation du modèle à l'expérimentale

Des essais de rupture en mode mixte (mode I+II), Mixed Mode Bending (MMB), sont réalisés afin de vérifier la cohérence du modèle de rupture en mode I+II. Ces essais vont permettre d'obtenir des courbes-R et ainsi les trois paramètres qui caractérisent ces courbes (G_{RCI+II} , Δa_{CI+II} et β_{I+II}). Les essais MMB sont réalisés sur des éprouvettes de pin Maritime avec la même géométrie que les essais de mode pur et suivant la même configuration TL. Actuellement, les essais ont été réalisés pour une seule teneur en eau de 12%. Trois ratios de mixité ($\psi_G = G_{II+II}/G_{I+II}$) ont été choisis 2,7, 1 et 0,3. Les essais de mode I+II sont asservis en déplacement d'ouverture mesuré à proximité du fond de l'entaille initiale pour les taux de mixité (ψ_G) de 2,7 et 1. Pour les essais où le taux de mixité est de 0,3, l'asservissement en déplacement est une combinaison du déplacement à proximité de l'ouverture et de la flèche du spécimen. Les vitesses de déplacement sont déterminées de telle sorte que le temps d'un essai n'excède pas 300 s.

Les courbes de résistance du modèle de rupture en mode I+II (Figure 2(a)) montrent une évolution de la valeur plateau G_{RCI+II} et de la taille critique de la FPZ Δa_{CI+II} en fonction du taux de mixité. La comparaison entre les courbes-R expérimentales et la courbe-R du modèle donne une approximation correcte de l'énergie de fissuration tout au long de la propagation de fissure. En effet, la courbe-R du modèle en mode I+II passe dans le fuseau des courbes-R expérimentales comme sur la Figure 2 (b) pour un taux de mixité $\psi_G = 1$.

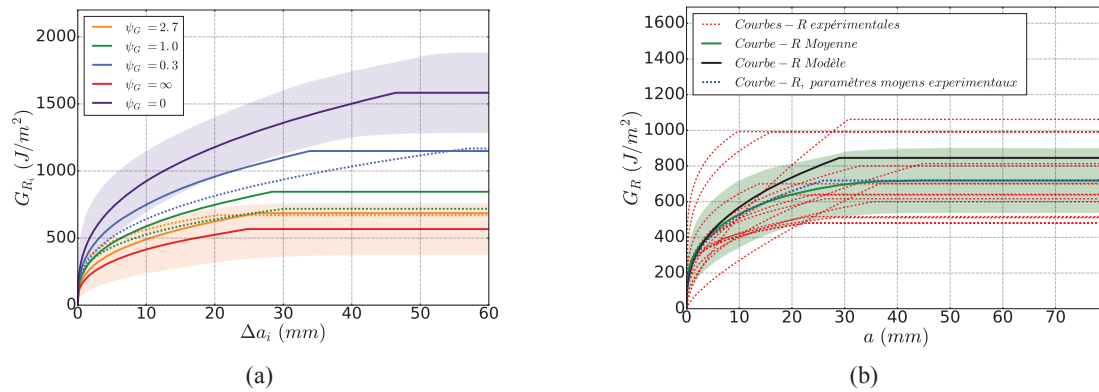


Figure 2. (a) Comparaison des courbes-R du modèle (trait continu) avec celles expérimentales (trait pointillé) (b) Exemple pour un taux de mixité $\psi_G = 1$.

5. Conclusion

Le comportement à la rupture en mode mixte de matériau quasi-fragile tel que le bois est difficile à exprimer sans utiliser des modèles à multiples paramètres. Au niveau réglementaire, l'Eurocode 5 ne prend pas en compte le comportement à rupture en mode mixte, les calculs sont simplifiés en ne considérant que l'énergie à la propagation en mode I. Ceci sous-estime les capacités du bois à la résistance à la fissuration et donc conduit à un surdimensionnement des structures. Un des objectifs de notre modèle est de pouvoir s'adapter aux problématiques de l'ingénieur. C'est pourquoi le nombre de ses paramètres est réduit : il suffit de réaliser deux essais de caractérisation, en mode pur I et II, afin d'obtenir les six paramètres nécessaires à notre modélisation. La connaissance de ces six paramètres permet de déterminer l'ensemble des courbes de résistances en mode mixte I-II et ce du mode I au mode II. Le modèle a été validé pour une humidité donnée à 12%, et d'autres campagnes sont prévues pour valider le modèle sur toutes les classes de services.

6. Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) via l'Equipex XYLOFOREST (ANR-10-EQPX-16), la Région Nouvelle Aquitaine pour leurs supports techniques et financiers ainsi que Gascogne bois pour la fourniture de matériau (pin Maritime).

7. Bibliographie

- [BAZ 97] BAŽANT Z. P., PLANAS J. « Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials. », *New Directions in Civil Engineering*, 1997.
- [DE M 10] DE MOURA M.F.S.F., OLIVEIRA J.M.Q., MORAIS J.J.L., XAVIER J., « Mixed mode I/II wood fracture characterization using the mixed-mode bending test. », *Engineering fracture Mechanics*, 77 : p 144-152, 2010
- [JOC 15] JOCKWER R., « Structural behaviour of glued laminated timber beams with unreinforced and reinforced notches. », Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich, 2015.
- [LAR 13] LARTIGAU J., Caractérisation du comportement des assemblages par goujons collés dans les structures bois, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, 2013.
- [MOR 07] MOREL S., « R-curve and size effect in quasibrittle fractures: Case of notched structures. », *Int. J. Solids Struct.*, vol. 44, no. 13, p. 4272-4290, 2007.
- [PHA 16a] PHAN N.A., Simulation of time-dependent crack propagation in a quasi-brittle material under relative humidity variations based on cohesive zone approach: application to wood., Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, 2016.
- [PHA 16b] PHAN N.A., MOREL S., CHAPLAIN M., « Mixed-mode fracture in a quasi-brittle material: R-curve and fracture criterion – Application to wood » *Engineering Fracture Mechanics*, 156 : p 96-113, 2016.
- [SOR 18] SORIN E., Fissuration en mode mixte dans le bois : diagnostic et évaluation des méthodes de renforcement local., Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, 2018.