

---

# Fissuration en mode mixte des bois tropicaux avec la méthode de la grille

Odounga Bernard<sup>1,2</sup>, Moutou Pitti Rostand<sup>1,3</sup>, Toussaint Evelyne<sup>1</sup>, Grédiac Michel<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Clermont Auvergne, CNRS, Institut Pascal, BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand, France

<sup>2</sup> Université des Sciences et techniques de Masuku, Ecole Polytechnique de Masuku, BP 901, Franceville, Gabon

<sup>3</sup> CENAREST, IRT, 10400, Libreville Gabon

---

**RÉSUMÉ.** L'objectif de ce papier est d'étudier la fissuration des essences tropicales gabonaises telles que le *Milicia excelsa* (iroko), l'*Aucoumea klaineana* (okoumé) et le *Pterocarpus soyauxii* (padouk) par une méthode de mesure sans contact. Le taux de restitution d'énergie critique est calculé avec une éprouvette modifiée Mixed Mode Crack Growth (MMCG). Les essais sont effectués en mode mixte pour des taux de mixité de 15° et 30°. Les courbes force-déplacement, le processus de croissance de la fissure ainsi que l'ouverture de fissure sont déduits des images enregistrées. Ces images sont traitées par la méthode de la grille. Le taux de restitution d'énergie est estimé par la méthode de la complaisance. Les résultats montrent une influence de la densité sur les taux de restitution d'énergie et le rapport GI/GII indique une évolution constante.

**ABSTRACT.** The objective of this paper is to study the cracking of tropical species of the Gabonese forest such as *Milicia excelsa* (iroko), *Aucoumea klaineana* (okume) and *Pterocarpus soyauxii* (padouk). The critical energy release rate is calculated using a modified Mixed Mode Crack Growth (MMCG) specimen. The tests are performed in mixed mode for 15° and 30° angles. An electromechanical testing machine and Arcan apparatus are used to apply the load to the specimen. The force-displacement curves, the crack growth process as well as the crack opening are deduced from the recorded images. These images are processed by the grid method. The critical energy release rate is estimated by the method of compliance. The results are given for the three species for an angle of 15° and for okume for an angle of 30°. All the test pieces tested are 15 mm thick. The results show an influence of the density on these species and the ratio GI/GII indicates a constant evolution.

**MOTS-CLÉS :** Bois tropicaux, éprouvette MMCG, grille.

**KEYWORDS:** Tropical woods, MMCG specimen, grid method.

---

## 1. Introduction

Aujourd'hui, le bois est l'une des solutions qui limite durablement le réchauffement planétaire de notre planète. En Afrique centrale et en particulier dans les régions équatoriales, la forêt joue un rôle clé dans ce règlement. Dans le cas du Gabon, la décision récente d'arrêter l'exportation d'espèces tropicales a ouvert la voie à leur extension locale et à leur plus large utilisation dans les bâtiments individuels et les industries locales. Cependant, le comportement mécanique des espèces locales dépend en grande partie des variations de température et d'humidité, qui peuvent altérer leur efficacité structurelle et conduire ainsi à une défaillance soudaine pendant leur durée de vie. Étudier les paramètres de rupture des bois tropicaux est crucial pour connaître leur comportement et guider les populations locales dans leur choix de matériaux de construction autres que le béton et l'acier. L'objectif du présent papier est d'étudier, en mode mixte, la fissuration des essences tropicales issues de la forêt gabonaise, qui sont : le *Milicia excelsa* (iroko), l'*Aucoumea klaineana* (okoumé) et le *Pterocarpus soyauxii* (padouk). La première partie de cet article présente les matériaux et les méthodes appliqués pour cette campagne expérimentale. Les éprouvettes MMCG modifiées [ODO 18] et la méthode de la technique de grille [GRE 16] pour enregistrer la position de la pointe de fissure au cours du test sont rappelées. Les caractéristiques des espèces de bois tropicaux sont également décrites. Les dispositifs expérimentaux sont détaillés. Les résultats expérimentaux sont donnés en termes de courbes force – ouverture de

fissure et emplacement de la pointe de fissure. La deuxième partie présente l'analyse de la fissuration en calculant le taux de restitution d'énergie critique au point occasionnant la propagation de fissure en utilisant la méthode de la complaisance.

## 2. Matériaux et méthodes

Les dimensions des éprouvettes en bois sont données sur la figure 1 (a). Pour pouvoir localiser le début de propagation, une fissure initiale, de longueur  $a_i = 24$  mm, est usinée le long de la direction longitudinale (L) (voir Fig. 1 (a) et (b)). Sur une face de l'éprouvette, une grille de pas de  $200 \mu\text{m}$  est déposée, voir Fig. 1 (b). Les valeurs des densités relatives de bois, à savoir, l'iroko, l'okoumé et le padouk sont respectivement de 0,64, 0,44 et 0,79. La température ambiante (T) est de  $21^\circ\text{C}$  et l'humidité relative (HR) est de 42%. Quatre rondelles en acier galvanisé d'un diamètre de 6 mm ont été utilisées pour renforcer les trous de sollicitations, à travers lesquels la charge a été appliquée, comme indiqué sur la Fig. 1 (b). Les parties inférieure et supérieure de l'éprouvette ont également été renforcées par de fines plaques d'aluminium. Une PCO-2000, dotée d'un capteur CCD 14 bits/2048x2048-pixels est utilisée. Les champs de déplacement et de déformation ont été déduits des images en utilisant la méthode de grille. Les éprouvettes sont montées dans un système Arcan et placées dans une machine d'essai électromécanique. Les éprouvettes MMCG et le dispositif expérimental sont présentés sur la figure 1 (c). La méthode de la complaisance à déplacement imposé a été utilisée pour un calcul du taux de restitution d'énergie, (équation [1]) :

$$G_c = \frac{F_c^2}{2b} x \left( \frac{\Delta C}{\Delta a} \right)_d \quad [1]$$

Où  $F_c$  est la force critique à l'origine d'une propagation de fissure de longueur  $\Delta a$ ,  $b$  est l'épaisseur de l'éprouvette. La complaisance est définie par  $\Delta C = U/F_c$ , où  $U$  est l'ouverture de fissure induite par chaque force critique  $F_c$ . L'indice  $d$  signifie que nous sommes en déplacement imposé.

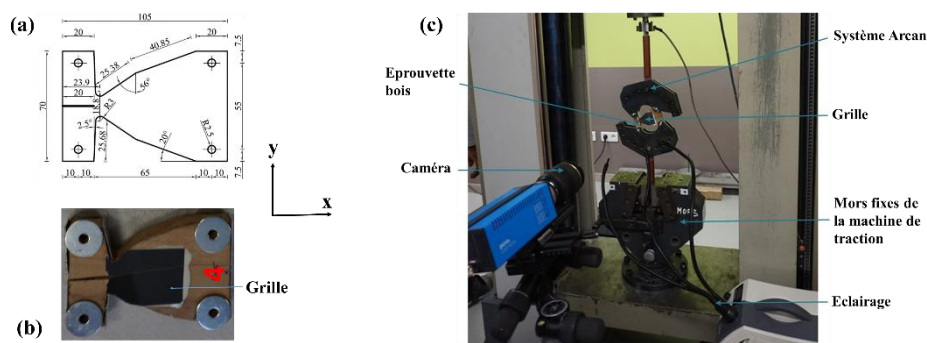
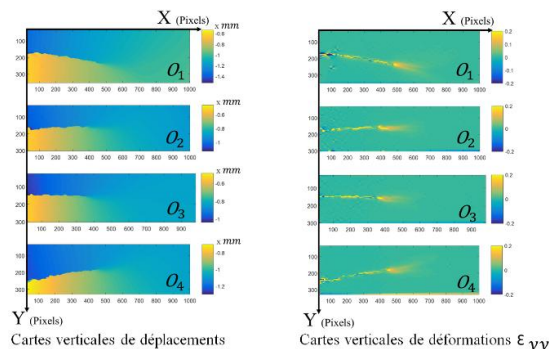


Figure 1. Dimensions de l'éprouvette MMCG (a), une grille transférée (b) et dispositif expérimental (c)

## 3. Résultats

### 3.1. Cartes déplacements et de déformations

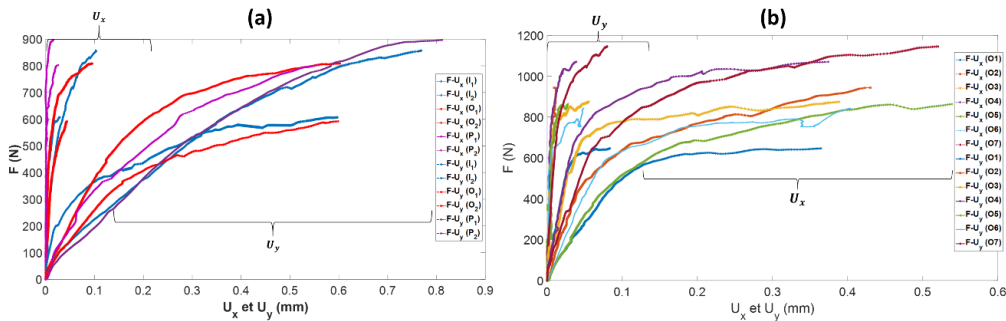
La figure 2 présente un exemple des cartes de déplacements et de déformations issues de quatre éprouvettes d'okoumé. Nous pouvons voir clairement l'avancée de la fissure sur chacune des cartes présentées ici. Nous remarquons aussi que pour les éprouvettes  $O_1$  et  $O_4$  les fissures présentent un certain angle de bifurcation. Cette orientation de fissure est typique du matériau bois tropical qui a la spécificité d'avoir une orientation des cernes annuels de croissance moins marquée rendant aléatoire la propagation de fissure.



**Figure 2.** Cartes de déplacements et de déformations.

### 3.2. Courbes force-ouverture de fissure

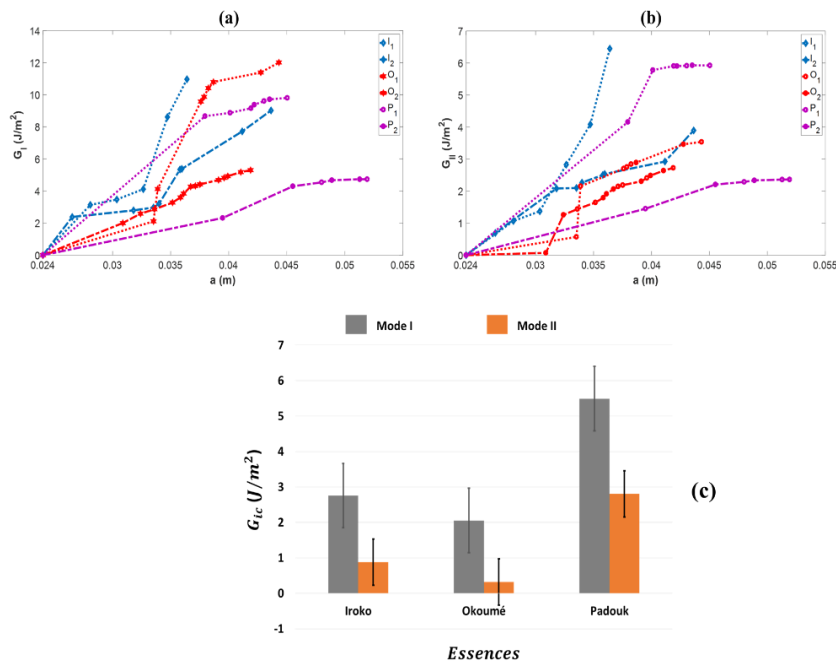
La figure 3 représente les courbes de force en fonction de l'ouverture de la fissure dans les deux directions x et y. Sur la figure 3 (a) sont présentés les résultats des trois essences obtenues avec des éprouvettes de 15 mm d'épaisseur testées pour un angle de 15°. La figure 3 (b) quant à elle montre les éprouvettes d'okoumé d'épaisseur 15 mm et testées avec un angle de mixité 30°. Sur la figure 3 (a) et 3 (b) les valeurs de l'ouverture de fissure le long de l'axe des x ( $U_x$ ) sont négligeables par rapport aux valeurs de l'ouverture le long de l'axe y ( $U_y$ ). Sur la figure 3 (a), les valeurs de l'ouverture de fissure selon x sont toutes inférieures à 0,1 mm et sont de l'ordre de 0,6 à 0,8 mm selon l'axe y. Ces résultats sont cohérents puisque nous sommes en présence d'un angle proche de 0° pour lequel les valeurs de l'ouverture suivant x sont presque nulles. Sur la figure 3 (b) pour les éprouvettes d'okoumé le constat est le même. Les valeurs suivant x ( $U_x$ ) sont aussi inférieures à 0,08 mm et suivant y ( $U_y$ ), elles sont de l'ordre de 0,3 à 0,5 mm. Ici nous voyons que l'écart entre  $U_x$  et  $U_y$  commence à se réduire.



**Figure 3.** Courbes force vs ouverture de fissure : (a) des trois essences à 15° et (b) de l'okoumé à 30°.

### 3.3. Taux de restitution d'énergie

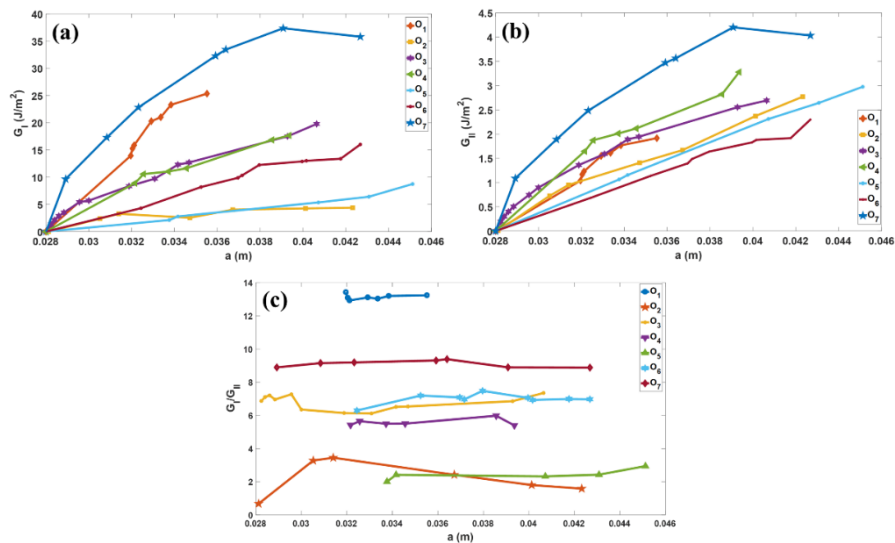
La figure 4 présente les résultats de différents taux de restitution d'énergie critique des trois essences. Les figures 4 (a) et 4 (b) montrent respectivement la part du mode 1 et celle du mode 2 pour un angle de 15°. Sur la figure 4 (c) sont présentées les valeurs moyennes minimales du taux de restitution d'énergie  $G_{ic}$ , avec la part du mode 1 et celle du mode 2. Les résultats montrent que la part du mode 1 est largement supérieure à la part du mode 2. Les calculs ont montré aussi une certaine proportionnalité par rapport à la densité. En effet, les valeurs minimales moyennes du taux de restitution d'énergie sont plus grandes pour le padouk que pour l'iroko et d'avantage que pour l'okoumé comme illustré sur la figure 4 (c).



**Figure 4.** Taux de restitution d'énergie: (a) part du mode 1, (b) part du mode 2 et valeurs moyennes  $G_{ic}$  ( $15^\circ$ ).

Nous pouvons aussi voir sur les figures 4 (a) et 4 (b) des sauts brusques de  $G$  entre deux points consécutifs pour l'essence d'okoumé, ce qui se présente sur les cartes de déplacements et de déformations issues de la grille par une inclinaison de fissure lors de sa propagation (l'illustration est donnée par les éprouvettes  $O_1$  et  $O_4$  de la figure 2). En termes de valeurs cela se matérialise par une augmentation de  $G_c$ . C'est une constatation spécifique aux essences tropicales qui présentent un fil de grain avec changement de direction et parfois un fil ondulé nécessitant dans ce cas plus d'énergie pour propager la fissure.

La figure 5 présente les résultats du taux de restitution d'énergie critique de l'okoumé. Les figures 5 (a) et 5 (b) montrent respectivement la part du mode 1 et celle du mode 2. La figure 5 (c) présente les rapports de la part du mode 1 sur le mode 2 ( $G_I/G_{II}$ ). Nous observons que pour toutes les courbes ce rapport a une évolution constante, ce qui est en accord avec les résultats trouvés par [PHA 14]. Ce résultat peut indiquer que les valeurs caractérisant la fissuration obtenue sont des valeurs intrinsèques au matériau étudié.



**Figure 5.** Taux de restitution d'énergie de l'okoumé : (a) mode 1, (b) mode 2 et rapport  $G_I/G_{II}$  (c) (angle  $30^\circ$ ).

#### 4. Conclusion

Dans le présent papier, il a été question d'étudier la fissuration des bois tropicaux issus de la forêt gabonaise : l'iroko, l'okoumé et le padouk. Des essais ont été effectués en mode mixte sur des éprouvettes bois MMCG d'épaisseur 15 mm pour des taux de mixité de  $15^\circ$  et  $30^\circ$ . Un système Arcan usiné pour fixer les éprouvettes a été conçu, le tout monté sur une presse électromécanique. La méthode de la grille a été utilisée pour suivre l'ouverture et l'avancée de fissure. Les résultats ont été présentés sous forme de cartes de déplacements, de force en fonction de la longueur de fissure. Le découplage des modes a permis de déterminer la part du mode 1 et celle du mode 2. La méthode de la complaisance a été utilisée pour calculer les différents taux de restitution d'énergie critique. Les résultats obtenus montrent une certaine proportionnalité par rapport à la densité relative de ces essences. Le rapport  $G_I/G_{II}$  calculé sur les éprouvettes d'okoumé s'est avéré constant, ce qui semble indiquer que les valeurs caractérisant la fissuration sont intrinsèques au matériau.

#### 5. Bibliographie

- [GRE 16] GREDIAC M., SUR F., BLAYSAT B., « The grid method for in-plane displacement and strain measurement », *A review and analysis. Strain*, vol. 52, n° 3, 2016, p. 205-243.
- [ODO 18] ODOUNGA B., MOUTOU PITTI R., TOUSSAINT E., GREDIAC M., « Mode I fracture of tropical woods using grid method », *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 95, 2018, p. 1-17.
- [PHA 14] PHAN N.A., MOREL S., CHAPLAIN M., COUREAU J. L., « R-curve on fracture criteria for mixed-mode in crack propagation in quasi-brittle material: Application for wood », *Procedia materials science*, vol. 3, 2014, p. 973-978.