

Etude comparative de la fissuration des essences tropicales par la méthode de la grille

B. ODOUNGA^{1,2}, R. MOUTOU PITTI^{1,3}, E. TOUSSAINT¹, M. GREDIAC¹

1. Université Clermont Auvergne, Institut Pascal, BP 10448, 63000 Clermont Ferrand, France

2. Université des sciences et Techniques de Masuku, Gabon,

Bernard.Odounga@etudiant.univ-bpclermont.fr

3. CENAREST,IRT, BP.14070, Libreville, Gabon

Résumé :

La présente étude traite de la fissuration de deux essences tropicales issues de la forêt gabonaise. Il est question ici de faire une étude comparative entre deux essences tropicales, l'Aucoumea klaineana (Okoumé) et le Pterocarpus soyauxii (Padouk). Ces espèces sont largement utilisées dans de nombreux pays subtropicaux, dans la construction de bâtiments en bois, mais aussi dans les produits semi-finis et la fabrication du papier. Cependant, leur comportement à la rupture doit encore être étudié, les données étant à peine disponibles sur ce sujet. Le système Arcan permettant de tester l'éprouvette Compact Tension Shear (CTS) et l'éprouvette Mixed Mode Crack Growth (MMCG) a été fabriqué. Le dispositif expérimental est composé donc de ce système Arcan, d'une éprouvette CTS ou MMCG et d'une presse de traction. Les courbes force-ouverture de fissure et l'avancée de fissure, déduites des images enregistrées et traitées par la méthode de la grille, sont présentées. Les essais ont été conduits en mode d'ouverture de fissure (mode I). Les courbes de l'évolution du taux de restitution d'énergie estimées via la méthode dite de la complaisance sont présentées. La mise en évidence de l'effet de l'épaisseur et l'influence de la densité, sur la fissuration de ces essences, sont clairement établies.

Abstract :

The present study deals with the cracking of two tropical species from the Gabonese forest. It is a question here of making a comparative study between two tropical species, the Aucoumea klaineana (Okoumé) and the Pterocarpus soyauxii (Padouk). These species are widely used in many subtropical countries, in the construction of wooden buildings, but also in semi-finished products and paper making. However, their breaking behavior has yet to be studied, with data barely available on this subject. The Arcan system for testing the Compact Tension Shear (CTS) and Mixed Mode Crack Growth (MMCG) was manufactured. The experimental device is therefore composed of this Arcan system, a CTS or MMCG test piece and a traction press. The force - crack opening curves and the crack advance, deduced from the images recorded and processed by the grid method, are presented. The tests were carried out in crack opening mode (mode I). The curves of the evolution of the energy release rate of restitution estimated by the so-called method of compliance are presented. The detection of the effect of the thickness and the influence of the density on the cracking of these species are clearly established.

Mots clefs : Bois tropicaux , Analyse de la rupture , Eprouvettes CTS et MMCG , Méthode de la grille.

1 Introduction

Aujourd'hui, le bois est l'une des solutions qui limite durablement le réchauffement climatique de notre planète. En Afrique centrale et en particulier dans les régions équatoriales, la forêt joue un rôle clé dans le freinage du changement climatique. 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 utilisation plus répandues dans les bâtiments individuels et industriels locaux. 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 rupture soudaine pendant leur durée de vie. Étudier la fissuration des bois tropicaux est crucial pour connaître leur comportement et guider les populations locales dans leurs choix de matériaux de construction autres que le béton et l'acier. Cela contribuerait également au développement durable discuté lors de la réunion de la COP21 à Paris en 2015 [1]. Cet article est consacré à l'étude de l'initiation et de la propagation des fissures à température constante des espèces tropicales suivantes : l'Okoumé (*Aucoumea Klaineana*) et le Padouk (*Pterocarpus soyauxii*). Une courte revue de la littérature montre que peu d'études concernant ces essences sont disponibles et inexistantes les données relatives à la fissuration. Des études similaires portent sur des espèces tempérées comme le Douglas, le Pin maritime et le Hêtre, utilisant des éprouvettes de Compact Tension Shear (CTS) [2-3], des éprouvettes Double Cantilever Beam (DCB) [4], des éprouvettes Mixed Mode Crack Growth (MMCG) [5] et éprouvettes TDCB [6]. Dans le présent travail, les éprouvettes de bois tropicaux sont étudiés avec la méthode de grille [7]. La première partie de cet article présente les matériaux et les méthodes appliqués pour cette campagne expérimentale. La méthode de la grille pour enregistrer la position de la pointe de fissure et son ouverture au cours de l'essai est rappelée. 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 montre 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 Matériel et Méthodes

2.1 Matériel

Les dimensions des éprouvettes CTS sont $105 \times 105 \times 12.5 \text{ mm}^3$ puis de $105 \times 105 \times 20 \text{ mm}^3$, voir Figure 1 (a). Une éprouvette typique de Padouk est représentée à la Figure 1 (a). Les deux matériaux bois sont de densité différente : l'Okoumé (densité = 0,44) est moins dense que le Padouk (densité = 0,79). Pour toutes les éprouvettes CTS testées, la longueur de fissure initiale $a_i = 25 \text{ mm}$ est à mi-hauteur et orientée le long de la direction des fibres. La fissure initiale est complétée par une encoche (longueur : 3 mm) avec un cutter pour amorcer correctement la propagation de la fissure. De même que pour les éprouvettes MMCG les dimensions sont de $105 \times 70 \times 15 \text{ mm}^3$, voir figure 1 (b). Ici la longueur de fissure au départ est de $a_i = 20 \text{ mm}$ complétée au cutter par une encoche de 2 mm. Une grille, de pas régulier de 200 microns, est transférée sur une face de l'éprouvette, voir Figure 1 (c). Toutes les éprouvettes ont été testées avec une humidité interne stabilisée et contrôlée (obtenue par calcul et vérifiée par un humidimètre) qui vaut : pour l'Okoumé 9.12 % et pour le Padouk elle est de 7.29 %. La température constante de la salle d'essais était de $(T) = 21^{\circ} \text{C} \pm 1^{\circ} \text{C}$ et l'humidité relative de $(HR) = 42 \% \pm 2 \%$.

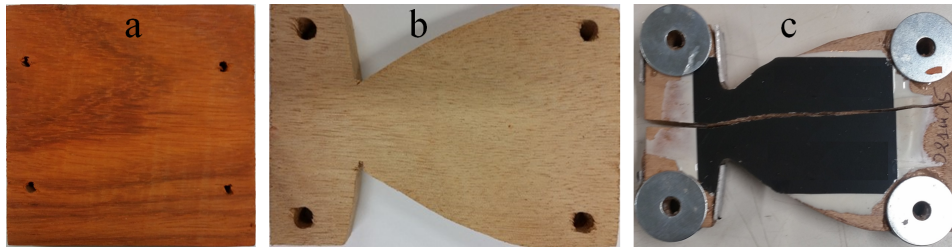


FIGURE 1 – éprouvette CTS (a), éprouvette MMCG (b), grille transférée sur une éprouvette MMCG (c)

Wood species	<i>Aucoumea klaineana</i> (Okoumé)	<i>Pterocarpus soyauxii</i> (Padouk)
Eprouvettes CTS testées	O12.5	P12.5
	O20	P20
Eprouvettes MMCG testées	O1M15	O2M15
	P1M15	P2M15

TABLE 1 – Notations utilisées dans cette étude : O = Okoumé ; P = Padouk ; 1,2 = Numéro d'essai pour les éprouvettes MMCG ; M = MMCG ; 12,5, 15 et 20 = épaisseur des éprouvettes testées.

2.2 Méthodes

Le dispositif expérimental est représenté sur la figure 2. Une machine de test Zwick / Roel de 200 kN a été utilisée pour les essais de traction. Une caméra a été fixée sur un trépied à une distance de 67.5 cm des éprouvettes afin d'enregistrer les images de la grille pendant les essais.

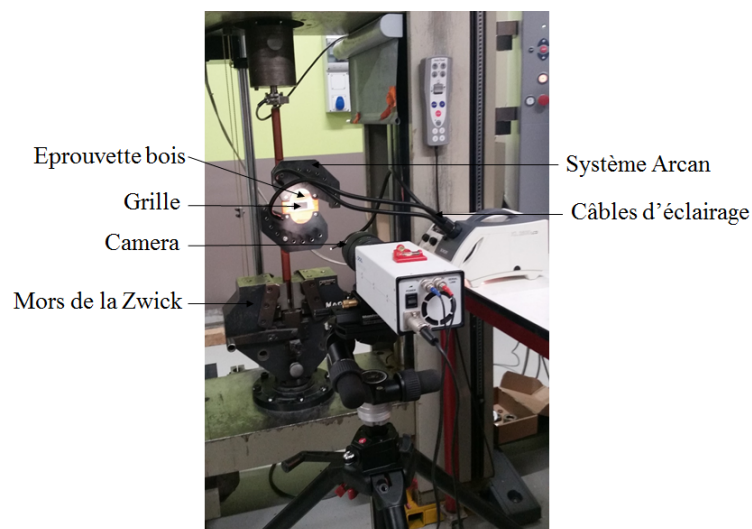


FIGURE 2 – Dispositif expérimental

Un système Arcan en acier miniature a été fabriqué et utilisé pour charger les éprouvettes. Les poignées étaient équipées d'un cadre inférieur fixe. Une partie supérieure mobile permet de solliciter le système Arcan dans diverses configurations et pour différents modes. La machine d'essai, entraînée avec des déplacements imposés, était équipée de capteurs de force et de déplacement pour obtenir des courbes force-déplacement et déduire ensuite les courbes force-ouverture de fissure. La vitesse de la tête transversale était de 0,005 mm/s, et la vitesse d'acquisition de la caméra était de 1,35 images/seconde. Pour minimiser le bruit un moyennage a été effectué sur 8 images. L'éprouvette était éclairée par trois bras op-

tiques flexibles alimentés par une source de lumière froide KL 2500 LCD. Un objectif SIGMA 105 mm a été monté sur la caméra.

3 Résultats

3.1 Courbes force-ouverture de fissure

Les figures 3a et 3b montrent l'évolution de la force appliquée en fonction de l'ouverture de fissure. La figure 3a montre clairement que cela nécessite plus d'énergie pour propager la fissure sur les éprouvettes d'épaisseurs 20 mm que celles d'épaisseurs 12.5 mm. La figure 3b quant à elle met en exergue l'influence de la densité sur les forces maximales à la rupture pour les éprouvettes MMCG testées avec une même épaisseur, mais pour deux essences différentes.

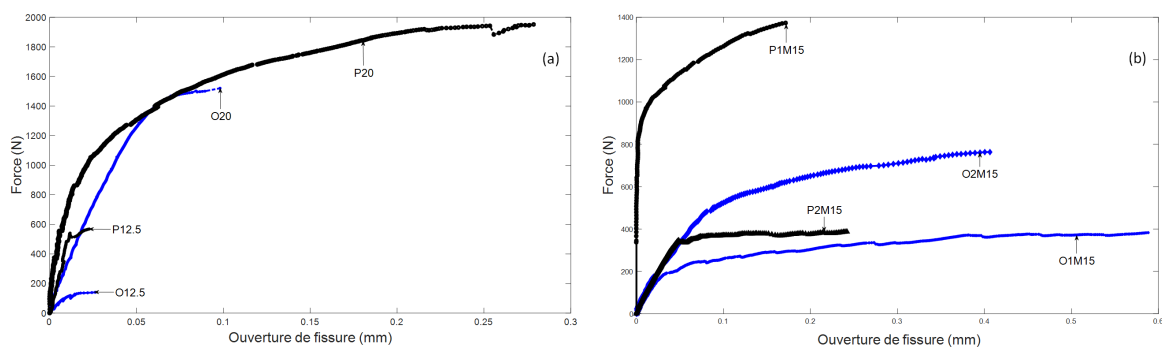


FIGURE 3 – Courbes force-ouverture de fissure : (a) CTS et (b) MMCG de : l'Okoumé et le Padouk.

Désignation	Force appliquée F (N)	Ouverture de fissure U (mm)
O12.5	141	0.03
P12.5	568	0.02
O20	1520	0.09
P20	1950	0.28

TABLE 2 – Forces appliquées avec les ouvertures de fissures correspondantes pour des éprouvettes CTS.

Désignation	Force appliquée F (N)	Ouverture de fissure U (mm)
O1M15	383	0.59
O2M15	763	0.41
P1M15	1373	0.17
P2M15	383	0.25

TABLE 3 – Forces appliquées avec les ouvertures de fissures correspondantes pour des éprouvettes MMCG.

3.2 Calcul des différents taux de restitution d'énergie

Dans cette étude, les valeurs du taux de restitution d'énergie critique des trois espèces ont été calculées en utilisant la méthode de la complaisance à déplacement imposé. L'équation suivante a été utilisée pour ce calcul :

$$G_C = \frac{F_c^2}{2b} \times \left(\frac{\Delta C}{\Delta a} \right)_d \quad (1)$$

où F_c est la force dite critique qui induit une augmentation Δa de la longueur de fissure a et b est l'épaisseur de l'éprouvette. $C = U/F_c$ est la complaisance, U est l'ouverture de fissure, et ΔC est l'augmentation de la complaisance correspondant à l'augmentation observée de la longueur de fissure Δa .

La figure 4 (a) présente les résultats des éprouvettes CTS (fissuration instantané) de l'Okoumé et du Padouk testées avec deux épaisseurs différentes. Une éprouvette de chaque essence à 12.5 mm et 20 mm d'épaisseur. Dans le cas des éprouvettes à 12.5 mm d'épaisseurs nous obtenons une rupture instantanée, donc pas de propagation de fissure. Lorsque l'épaisseur des éprouvettes est augmentée à 20 mm, le résultat n'est plus le même. En effet, nous avons constaté qu'avec l'augmentation de l'épaisseur nous sommes passé d'une rupture brusque à une propagation de fissure pour les éprouvettes CTS. La table 4, donne les valeurs à la rupture des éprouvettes d'épaisseurs 12.5 mm des deux essences. Pour l'Okoumé $G = 5 \text{ J/m}^2$ et pour le Padouk $G = 18 \text{ J/m}^2$. Les valeurs minimales et maximales du taux de restitution d'énergie des éprouvettes d'épaisseurs 20 mm qui ont propagées sont données. La comparaison de ces valeurs montre clairement que celles du Padouk sont plus élevées que celles de l'Okoumé.

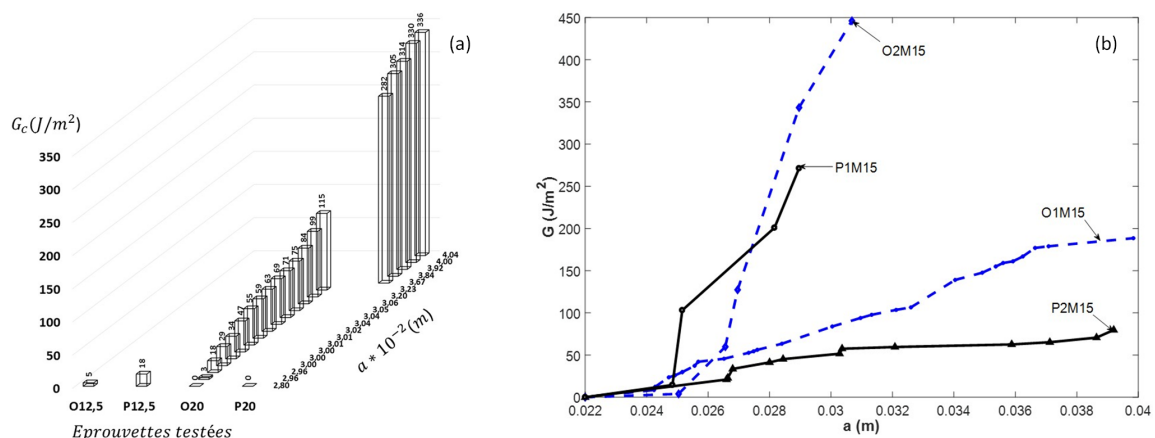


FIGURE 4 – Courbes taux de restitution d'énergie - longueur de fissure : (a) CTS et (b) MMCG de : l'Okoumé et du Padouk.

	O12.5	P12.5	O20	P20	O1M15	O2M15	P1M15	P2M15
G Initial (J/m ²)	5	18	3	282	9	4	15	21
G Maximal (J/m ²)			115	336	188	446	271	80

TABLE 4 – Valeurs de G pour des éprouvettes testées CTS et MMCG des essences d'Okoumé et du Padouk.

Pour les éprouvettes MMCG (Propagation de fissure), figure 4 (b), quatre résultats de l'évolution de G sont présentés. La table 4 donne les valeurs de G minimales et maximales. Une moyenne des valeurs minimales des deux éprouvettes testées à 15 mm d'épaisseurs donne pour l'Okoumé $G = 6.5 \text{ J/m}^2$ et pour le Padouk $G = 18 \text{ J/m}^2$. Ces valeurs correspondent à l'énergie initiant la propagation de fissure dans le matériau pour une longueur de fissure a . La même comparaison a été faite avec les valeurs maximales, mais n'a rien donné de concret. Le caractère aléatoire, la dispersion des résultats ne permet pas de faire un raisonnement similaire que celui avec les valeurs minimales. Cela est dû tout de même à

l'hétérogénéité du matériau lui-même.

Le passage de l'épaisseur 12.5 mm à 20 mm met ici en évidence l'effet de l'épaisseur sur la fissuration des essences testées. L'écart obtenu en comparant les résultats minimaux de G entre l'Okoumé et le Padouk permet aussi de noter une influence de densité sur la rupture de ces deux essences tropicales.

4 Conclusion

Les essais ont été menés en mode d'ouverture (mode 1) sur deux essences tropicales l'Okoumé et le Padouk. Les éprouvettes CTS et MMCG couplées à un système Arcan ont été utilisées. L'ensemble a été monté sur une presse de traction électromagnétique. La méthode de la grille a été utilisée pour suivre l'ouverture et l'avancée de fissure dans les deux matériaux étudiés. La méthode de la complaisance à déplacement imposé a été utilisée pour calculer les différents taux de restitution d'énergie. Les résultats obtenus ont montré l'effet de l'épaisseur d'une part et d'autre part l'influence de la densité sur la fissuration de ces deux essences. En effet, nous avons noté qu'à partir d'une certaine épaisseur donnée, des éprouvettes CTS, il y a une propagation de fissure, ce qui augmente sensiblement la résistance à la fissuration. Nous avons aussi remarqué une proportionnalité, c'est-à-dire une augmentation de G en fonction de la densité des essences pour une épaisseur donnée et une essence donnée. Les essais complémentaires envisagés permettront sans doute de confirmer les résultats obtenus et présentés dans ce papier.

Références

- [1] Hourcade, Jean-Charles and Shukla, P-R, Cancun's paradigm shift and COP 21 : to go beyond rhetoric. Int Environ Agreements Paris, France, 1995, pp. 343-351.
- [2] Angellier, Nicolas and Pitti, Rostand Moutou and Dubois, Frédéric. Crack analysis of wood under climate variations. Fracture, Fatigue, Failure and Damage Evolution, Vol. 8, pp. 235-242, 2016.
- [3] Valentin, G and Caumes, P. Crack propagation in mixed mode in wood : a new specimen. Wood Science and Technology, Vol. 23, pp. 43-53, 1989.
- [4] Anh, Phan Ngoc and Stéphane, Morel and Myriam, Chaplain and Jean-Luc, Coureau. R-curve on fracture criteria for mixed-mode in crack propagation in quasi-brittle material : application for wood. Procedia Materials Science, Vol. 3, pp. 973-978, 2014.
- [5] Pitti, Rostand Moutou and Dubois, Frédéric and Pop, Octavian. On a specimen providing stable mixed mode crack growth in wooden material] : Sur une éprouvette assurant la stabilité de la propagation de fissure en mode mixte dans le matériau bois. Comptes Rendus Mécanique, Vol. 336, pp. 744-749, 2008.
- [6] Coureau, Jean-Luc and Morel, Stéphane and Dourado, Nuno. Cohesive zone model and quasibrittle failure of wood : a new light on the adapted specimen geometries for fracture tests. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 109, pp. 328-340, 2013.
- [7] Grediac, Michel and Sur, Frédéric and Blaysat, Benoît. The Grid Method for In-plane Displacement and Strain Measurement : A Review and Analysis. Strain : An International Journal for Experimental Mechanics, number 3, Vol. 52, pp. 205-243, 2016.