

# Une nouvelle méthode de calcul des paramètres de fissuration 3D dans le bois vert par microtomographie à rayons X

GJ. MAMBILI LEBONGUI<sup>a</sup>, R. MOUTOU PITTI<sup>a,b</sup>, E. BADEL<sup>c</sup>, SE. HAMDI<sup>a</sup>, J. GRIL<sup>a</sup>, E. TOUSSAINT<sup>a</sup>,

a. Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont, Institut Pascal, Clermont-Ferrand, France + rostand.moutou\_pitti@uca.fr, germice\_jordy.mambili\_lebongui@etu.uca.fr

b. CENAREST, IRT, Libreville, Gabon + rostand.moutou\_pitti@uca.fr

c. Université Clermont Auvergne, INRA, PIAF, F-63000 Clermont-Ferrand, France + eric.badel@inra.fr

## Résumé :

*Ce travail présente une nouvelle méthode de calcul du taux de restitution d'énergie critique  $G$  dans le bois vert en utilisant l'observation par microtomographie à rayon X ( $\mu$ CT). L'étude a été menée sur du bois dit « normal » et sur le bois de « réaction », d'un feuillu (*Populus nigra*) d'un résineux (*Abies alba*). Des planches ont été débitées dans des arbres fraîchement abattus et usinées sous forme d'éprouvettes de fissuration de type Mixed-Mode Crack Growth. Chaque éprouvette est testée en fissuration en mode I avec une presse afin de contrôler l'avancée de la fissure surfacique. Un scan en  $\mu$ CT permet ensuite l'observation non destructive du front de fissure pour une analyse 3D.  $G$  est calculée pour différents fronts de fissure, sur les faces extérieures et perpendiculaires à la direction de propagation pour chaque type de bois. On observe que  $G$  est plus importante dans le bois normal que dans le bois de réaction au regard de la densité de chaque essence. Ce travail met en lumière le potentiel de l'observation non destructive de la zone d'élaboration par  $\mu$ CT dans le bois vert.*

## Abstract :

*A new method for the measurement of the critical energy release rate  $G$  in green wood using X-ray microtomography ( $\mu$ CT) is presented. The work was performed on “normal” and “reaction” wood for two species; a hardwood (*Populus nigra*) and a softwood (*Abies alba*). After cutting from fresh trees, samples were machined in the form of Mixed-Mode Crack Growth specimens. The specimen was placed in a press to control the advance of the crack tip in opening mode. Then a microtomographic scan allowed to observe and measure the crack front in 3D.  $G$  was obtained versus crack fronts, on the outer faces and perpendicular to the direction of propagation for each type of wood. Results enlightened that  $G$  is greater in normal wood than in reaction wood in relation to the density of each species. This work highlights the potential of non-destructive observation of the process zone by  $\mu$ CT in the green wood.*

## Mots clefs : bois vert, Bois de réaction, fissuration en mode I, taux de restitution d'énergie, analyse d'images 3D

### 1 Introduction

Dans le secteur de la construction bois, la réduction des coûts énergétiques passe par l'utilisation des méthodes alternatives au séchage naturel comme l'utilisation du bois vert obtenu immédiatement après la coupe de l'arbre. Cependant, la forte hygrométrie couplée au comportement différé et au caractère orthotrope/hétérogène du bois peut engendrer des fissures qui fragilisent à terme les structures notamment lorsqu'elles sont de plus en plus massives [1]. Ce travail présente une étude comparative du taux de restitution d'énergie critique dans le bois de réaction et le bois normal pour un feuillu (*Populus nigra*) et un résineux (*Abies alba*) dit « verts » par microtomographie à rayon X ( $\mu$ CT) [2]. Des planches ont été débitées dans des arbres fraîchement abattus puis usinées sous forme d'éprouvettes de fissuration de type Mixed-Mode Crack Growth (MMCG) [3]. L'ensemble est placé dans une presse électromécanique afin de contrôler l'avancée de la fissure surfacique en mode d'ouverture et de prélever un échantillon parallélépipédique autour du front de fissure. Afin de suivre le processus de propagation de la fissure dans l'échantillon de bois vert, nous utilisons une méthode d'observation non destructive, la  $\mu$ CT, qui permet de suivre aisément des modifications de structure au sein des échantillons [4, 5], et d'obtenir des images 3D du bois autour du front de la fissure et donc de mesurer sa forme et ses longueurs réelles. Le calcul expérimental des taux de restitution d'énergie pour différents fronts de fissure, sur les faces extérieures et perpendiculaires à la direction de propagation de la fissure est effectué pour chaque type de bois. On observe globalement que la résistance à la fissuration est plus importante dans le bois normal que dans le bois de réaction au regard de la densité de chaque essence. Ce travail met en lumière le potentiel de l'observation non destructive des fissures par micro-tomographie.

## 2 Matériaux et méthodes

### 2.1 Matériaux bois

Un feuillu (peuplier) et un résineux (sapin blanc) de la région Auvergne-Rhône-Alpes (France), renfermant du bois normal et du bois de réaction ont été choisis pour les essais. Après abatage des arbres, des billons (Figure 1 (a)), puis des planches de dimensions 600x80x20 mm<sup>3</sup> (Figure 1 (b)) ont été débités. Afin de conserver le bois le plus humide possible, les planches sont emballées dans des films plastiques et sont conservées dans un réfrigérateur à basse température afin de confectionner par la suite les éprouvettes MMCG (Figure 1 (c)).

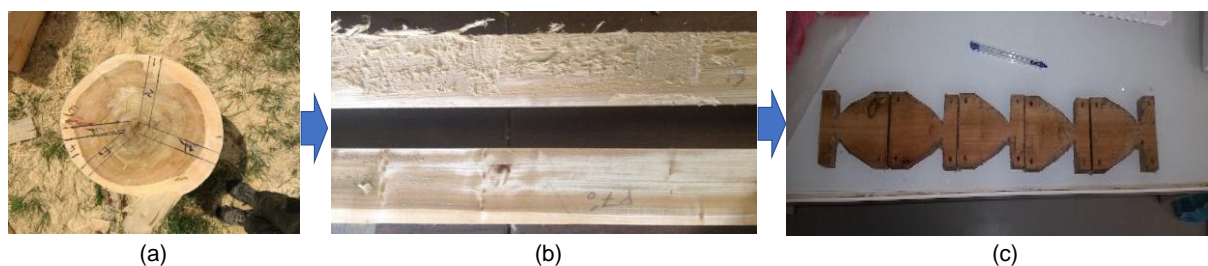


Figure 1 : (a) troncs haut du peuplier, (b) planches débitées, (c) éprouvettes MMCG

## 2.2 Protocole et dispositif expérimental

Les essais de fissuration ont été effectués en traction perpendiculaire au sens des fils du bois (mode I) qui correspond à l'ouverture normale de la fissure. Les éprouvettes ont été pré-fissurées à l'aide d'une scie de 1 mm d'épaisseur environ, sur une longueur de 2 cm afin d'initier la fissure. L'essai est stoppé dès que la propagation de la fissure est estimée entre 2,5 et 3 cm, cela afin d'effectuer une observation au  $\mu CT$  de l'échantillon entier. Le dispositif était principalement constitué d'une presse Zwick / Roel de capacité 200 kN, d'une éprouvette MMCG, d'une caméra CCD refroidie pour le suivi de la fissuration et de différents accessoires de mesures. Notons que les éprouvettes après essai ont été conservées emballées dans des tissus humides au réfrigérateur afin de garder un taux d'humidité maximum.

## 2.3 Analyse de fissure par microtomographie à rayons X

Les échantillons (Figure 2 (a)) ont été débités à partir des éprouvettes MMCG (Figure 1 (c)) après les essais de fissuration en mode I. Ces échantillons ont été analysés au  $\mu CT$  (Figure 2 (b)), afin d'obtenir des scans 3D. Afin de réduire le champ d'observation permettant d'améliorer la résolution spatiale, les parties latérales de l'échantillon ont été éliminées pour ne garder que la zone d'intérêt entourant la fissure. Les images ont finalement été enregistrées en fonction des plans RT et RL, comme illustré dans la Figure 2 (c-d).

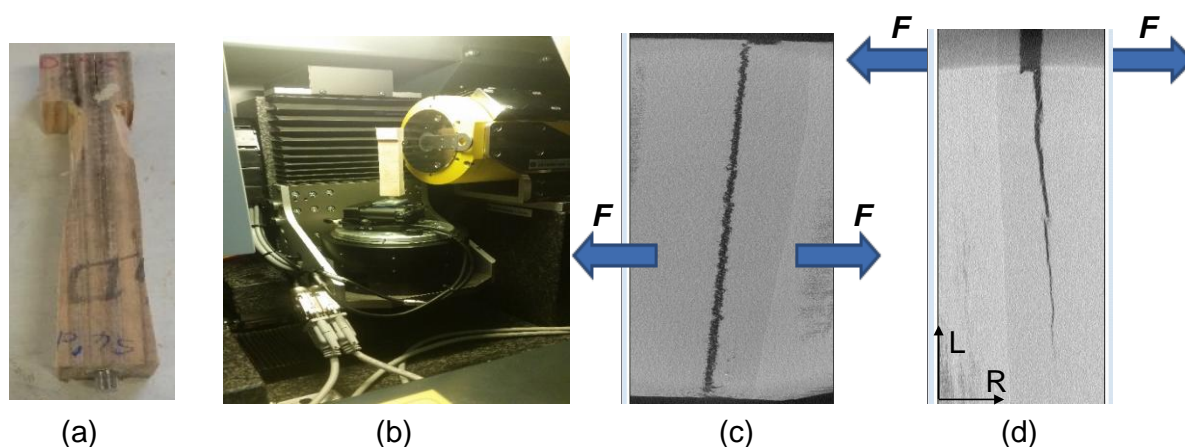


Figure 2 : échantillon : (a) Débité ; (b) pour scan  $\mu CT$ ; (c) dans le scanner ; Observation de la fissure selon les plans RT (e) et RL (f).

## 3 Résultats expérimentaux

### 3.1 Courbes forces déplacements

Les Figures 3 et 4 présentent les courbes forces /déplacement respectivement pour le peuplier et le sapin. Dans le premier cas, on observe globalement une résistance plus élevée avec une irrégularité de l'évolution de la force (exemple échantillon P7A3) pour les échantillons testés et non une absence de pontage des fibres propres au bois humide. Les résultats obtenus soulignent clairement la différence entre le bois normal et le bois de tension. En effet, nous constatons que les forces à la rupture oscillent entre 300 et 620 N pour les éprouvettes de bois normal et entre 200 à 300 N pour celles du bois de tension. Dans le cas du sapin (Figure 4),

nous observons, pour certains échantillons des pontages de fibres identifiés par des pics comme pour le bois sec. Les résultats soulignent une variabilité des forces à la rupture pour ce qui est du bois de compression. En effet, les forces varient entre 200 à 600 N. D'autre part, on observe pour ce qui est du bois normal que les efforts oscillent entre 300 à 500 N, ce qui traduit une résistance presque identique à celle du bois de compression en mode I de fissuration.

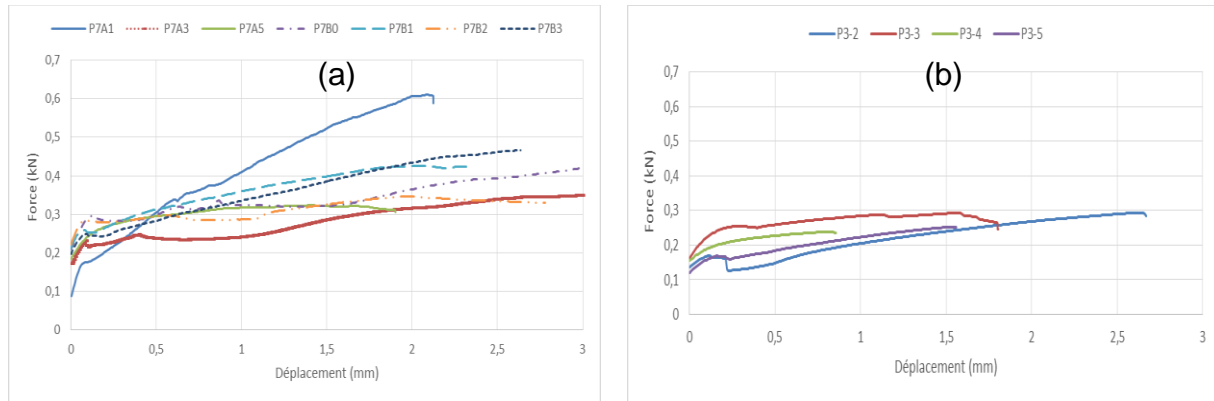


Figure 3 : Courbes force-déplacement du peuplier ; (a) : bois normal ; (b) : bois de tension.

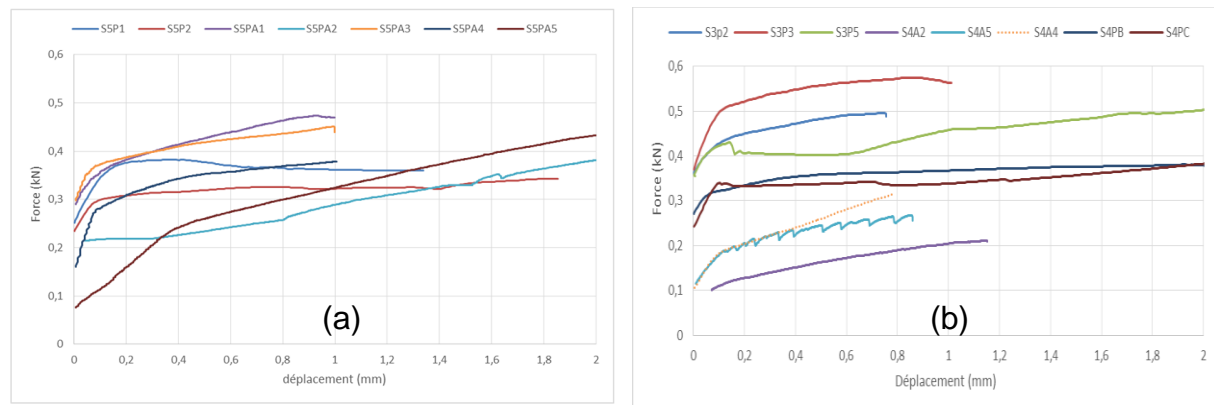


Figure 4 : Courbes forces-déplacement du sapin ; (a) bois normal ; (b) bois de compression.

### 3.2 Images microtomographiques

La figure 5 montre des coupes virtuelles extraites des scans tomographiques. On peut y observer et mesurer la longueur de la fissure suivant l'épaisseur des essais P7A-3 (peuplier) et S4A4

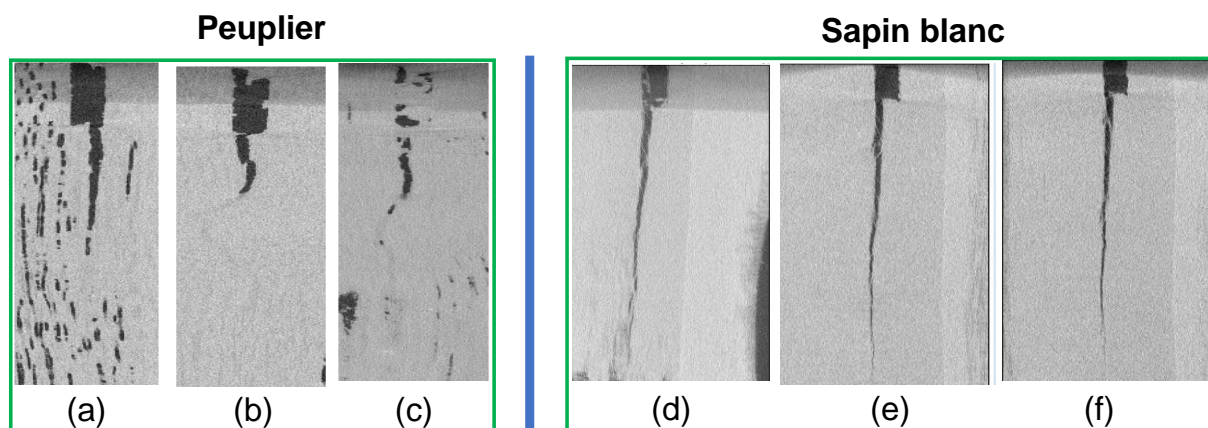


Figure 5 : images  $\mu$ CT des essais P7A-3 et S4A4, (a-d) : faces avant ; (b-e) : à 1,7 et cm d'épaisseur ; (c-f) : face arrière.

(sapin). Dans les cas (a-b-c) de la Figure 5, on constate que la fissure n'a pas toujours la même taille ni la même forme, et n'est pas rectiligne. Il y a donc une variabilité très marquée chez le peuplier de la fissure tant dans la longueur que dans la forme. Le sapin (Figure 5 (d-e-f)) présente lui aussi une variation de la longueur de fissure tout au long de l'épaisseur mais cependant nettement plus homogène que le peuplier avec une forme quasiment rectiligne dans les deux le bois normal et dans le bois de compression. Cette différence de variabilité est à mettre en parallèle avec la structure anatomique plus hétérogène du peuplier en comparaison du sapin composé uniquement de trachéides de formes et distribution assez régulières.

### 3 Analyse et discussion

#### 3.1 Taux de restitution d'énergie

À partir des résultats obtenus, nous avons pu calculer le taux de restitution d'énergie  $G$  en déplacement imposé. C'est un élément déterminant dans la classification de la résistance des matériaux à la fissuration. Ces valeurs sont obtenues à partir de l'équation suivante :

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

Avec  $F_c$  la force critique,  $\Delta C$  la complaisance,  $b$  l'épaisseur et  $\Delta a$  la variation de la longueur de fissure, qui tout comme la complaisance a été calculée entre le point de départ et le point considéré. Ainsi grâce à tous ces paramètres nous avons pu calculer  $G$ .

#### 3.2 Comparaison

Les figures 6 (a) et (b) présentent différentes évolutions de  $G$  en fonction de de la position dans l'épaisseur respectivement pour le peuplier et le sapin moyennant l'hypothèse d'une force homogène unique appliquée pendant l'essai.

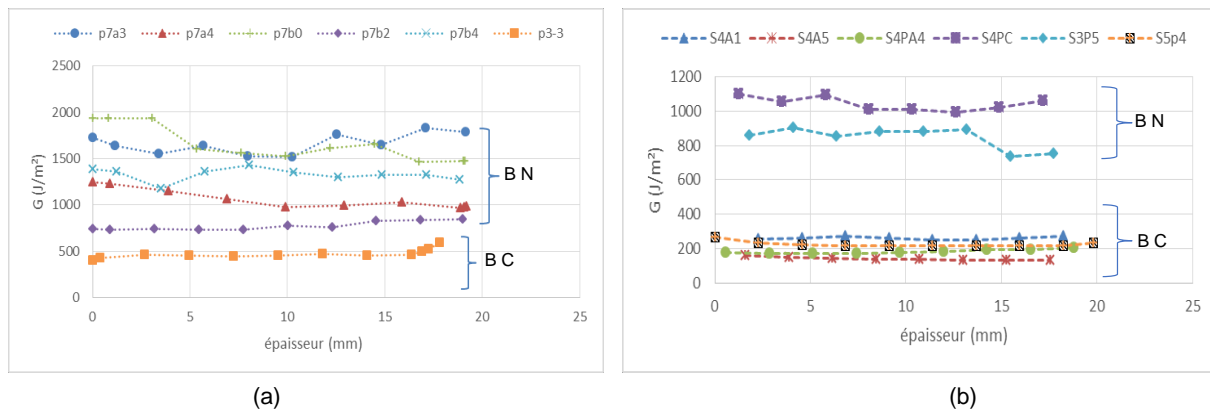


Figure 6 : évolution de  $G$  vs. position dans l'épaisseur : (a) peuplier ; (b) sapin.

L'objectif est de chercher au final, à calculer une valeur moyenne de  $G$  dans le volume de l'échantillon afin de la comparer aux valeurs surfaciques. Nous constatons, dans le cas du peuplier, que la variation du taux d'énergie au sein des éprouvettes est très variable. En effet, pour tous les essais réalisés, nous constatons que nous n'avons jamais sur les deux faces un même taux de restitution d'énergie  $G$ . L'écart de valeurs obtenues pour chaque face est de 89 % ( $50 \leq G \leq 459 \text{ J/m}^2$ ). Nous pouvons donc dire que les valeurs estimées à la surface ne sont pas le reflet du  $G$ -moyen estimé sur la base de la mesure de la forme réelle de la fissure à l'intérieur du matériau. Ceci s'explique par le fait que le front n'est pas rectiligne. En effet, la figure 6(a) nous montre bien que la longueur de fissure varie tant en profondeur que par sa sinuosité dans le plan RT. La dissipation d'énergie au sein du matériau est donc différente en fonction de la position dans la masse. L'écart de valeurs de  $G$  entre les faces a et b des éprouvettes est en moyenne de 6%, et de 10% avec le  $G_{\text{moy}}$ . Pour ce qui est du sapin, nous constatons que la variation du taux de restitution d'énergie suivant l'épaisseur reste variable. Mais les écarts de valeurs restent plus faibles que pour le peuplier environ 71% ( $25 \leq G \leq 88 \text{ J/m}^2$ ). Ici encore on peut faire l'hypothèse que la structure cellulaire beaucoup plus homogène et régulière du sapin est à l'origine de la moindre variabilité des résultats. Tout comme le peuplier, on observe une différence notable entre les estimations de  $G$  réalisées à partir des mesures de fissures effectuées en surface et à partir de l'analyse 3D de la fissure à l'intérieur de l'échantillon (Figure 6(b)).

## Conclusion et perspectives

L'évolution du taux de restitution d'énergie est investiguée dans le bois vert pour un peuplier et un résineux à l'aide de l'observation non-destructive par  $\mu\text{CT}$ . Les résultats sont comparés dans chaque cas entre le bois normal et le bois de tension (peuplier) et de compression (sapin). On remarque que la dissipation d'énergie estimée à la surface diffère, parfois fortement, de celle mesurée en tenant compte de la forme réelle de la fissure et en particulier sa profondeur variable à l'intérieur de l'échantillon. Dans le cas du sapin blanc, les écarts de  $G$  moyen entre les faces avant et arrière sont en moyenne de 10%. Dans les prochains travaux, ces résultats 3D seront comparés à ceux obtenus en 2D via une analyse par corrélation d'images numériques. Les résultats seront aussi comparés aux modélisations numériques obtenues par éléments finis 3D.

## Références

- [1] Odounga B., Moutou Pitti R., Toussaint E., Grédiac M. *Mode I fracture of tropical woods using grid method*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 95, 1-17.
- [2] Hamdi SE, Moutou Piti R., Diakhate M. Combined acoustic emission and x-ray microtomography approach for structural health monitoring of wood- based structures. *2018 World Conference on Timber Engineering (WCTE)*, August 20-23, 2018, Seoul, Republic of Korea.
- [3] Moutou Pitti R., Dubois F., Octavian P. *A proposed mixed-mode fracture for wood under creep loadings*. International Journal of Fracture. 167, 195-205, 2011
- [4] Torres-Ruiz J.M., Cochard H., Mencuccini M., Delzon S., Badel E. 2016. *Direct observations and modelling of embolism spread between xylem conduits: a case study in Scot pine*. PCE. 39(12):2774-2785. doi:10.1111/pce.12840
- [5] Badel E., Lux, J., Delisée C., 2008. *3D structural characterisation, deformation measurements and assessment of low-density wood fibreboard under compression. The use of X-ray microtomography*. Composite Sciences and Technology 68 (7-8) 1654-1663.