
Détection et évaluation de l'endommagement mécanique du bois par émission acoustique

DAHOU Z.², SALIBA J.¹, SBARTAÏ Z.M.¹, BONIFACE A.¹, MOREL S.¹

¹ I2M, UMR 5295, Département génie civil et Environnemental, Université de Bordeaux, CNRS, INRA, France.

² Laboratoire Mécanique des Structures LMS, Université de Bechar, Algérie.

RÉSUMÉ. Le bois est un matériau naturel de plus en plus utilisé dans la construction. Afin d'améliorer les outils de conception des structures en bois, la connaissance des mécanismes de fissuration est un élément primordial à appréhender. L'objectif de ce travail s'oriente vers l'étude des propriétés mécaniques et des mécanismes d'endommagement du bois massif épicéa et du bois lamellé collé avec des lamelles de pin. Une investigation expérimentale préliminaire est proposée en réalisant un essai de fissuration en traction (Mode I) provoquée par enfoncement d'un coin (Wedge Splitting Test). Le suivi de l'endommagement durant ces essais est effectué à l'aide de la technique d'émission acoustique (EA). La localisation cumulée des événements acoustiques et les paramètres des signaux (énergie, amplitude, etc.) durant les différentes phases de l'essai de traction ont été étudiés. Les résultats montrent une bonne corrélation entre les courbes force-CMOD et l'activité acoustique. La largeur de la zone de microfissuration a été aussi estimée à partir des cartes de localisation.

ABSTRACT. Wood is a natural material increasingly used in the construction. In order to design reliable wood structures, the understanding of the failure processes is important. An experimental investigation on the fracture properties of spruce and pine wood is proposed in this paper by submitting wood specimens to a wedge splitting test (Mode I). The acoustic emission (AE) technique was applied to monitor crack growth and characterize the crack development during tensile tests. The localisation of AE events and the AE signals parameters were studied during the different loading levels. The results show a good correlation between the load CMOD curves and the AE activity. The width of the fracture process zone was also estimated based on the localisation maps.

MOTS-CLÉS : bois, endommagement, émission acoustique, WST.

KEY WORDS: wood, damage, acoustic emission, WST.

1. Introduction

Le bois est un matériau naturel de plus en plus utilisé dans la construction. Il est recherché pour ses qualités esthétiques, techniques et écologiques. Par ailleurs, le matériau bois est caractérisé par son hétérogénéité, hygroscopicité et anisotropie. Afin d'améliorer les outils de conception des structures en bois, la connaissance des mécanismes de fissuration est un élément primordial à appréhender. D'autre part, le développement des outils de Contrôle Non Destructif est nécessaire pour le monitoring des structures en bois in situ.

L'objectif de ce travail de recherche s'oriente vers l'étude des propriétés mécaniques et des mécanismes d'endommagement du bois en utilisant du bois massif épicéa et du bois lamellé collé avec des lamelles de pin. Une investigation expérimentale est proposée en réalisant un essai de fissuration en traction (Mode I) provoquée par enfoncement d'un coin (Wedge Splitting Test). Le suivi de l'endommagement durant ces essais est effectué à l'aide de la technique d'EA. C'est une méthode de contrôle non-destructif utilisée fréquemment ces dernières années dans la mesure des évolutions liées aux phénomènes structuraux. C'est une technique passive et non invasive qui peut être appliquée soit en surveillance de la santé des structures (évaluation globale) soit pour la localisation des défauts et la compréhension des phénomènes d'endommagement. Les premiers travaux associant l'EA au matériau bois remontent à plusieurs années où principalement des analyses quantitatives des signaux en fonction de la variation de l'humidité relative ont été menées [LEE 96; BOO 95]. Plusieurs chercheurs se sont aussi intéressés aux problèmes de suivi de fissuration dans le bois [AIC 01; REI 00; SCH 96; KOW 04; AND 06; RIT 14] et une bonne corrélation entre l'énergie de rupture en mode I et l'énergie acoustique a été mise en évidence [LAN 00 ; LAM 15]. Par contre, très peu de travaux ont abordé les études de localisation des microfissurations à cause des difficultés liées aux propriétés acoustiques du bois et à son orthotropie induisant des vitesses différentes selon les directions principales [LAM 15].

Dans la première partie de cet article, le programme expérimental et les conditions d'essais sont présentés. Puis, les résultats des essais de rupture sont analysés en corrélation avec l'activité acoustique. Enfin, une analyse plus détaillée est proposée sur la localisation des événements acoustiques.

2. Programme expérimental

2.1 Géométrie et essais de rupture

Deux types de bois ont été utilisés dans cette étude : le bois massif épicéa et le bois lamellé collé en pin. La largeur des lamelles du bois lamellé collé est de 4,3 cm. Les dimensions des éprouvettes sont présentées sur la figure 1 avec 21,7 cm de largeur, 25 cm de hauteur et une épaisseur de 6,9 cm pour le bois massif et 25 cm x 25 cm x 10 cm pour les éprouvettes de bois lamellé collé respectivement.

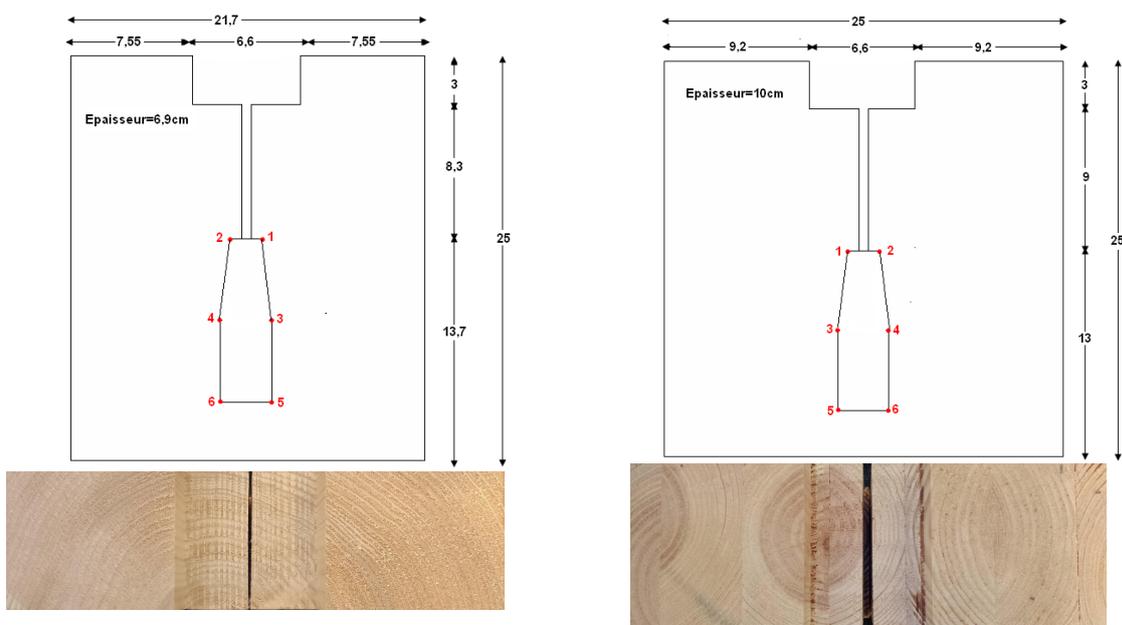


Figure 1. Géométrie des éprouvettes, positions des capteurs d'EA et vue de dessus pour a) le bois massif et b) le bois lamellé collé.

Les essais de rupture de type WST ont été réalisés à l'aide d'une presse électromécanique en positionnant un coin ayant un demi angle de 15° au niveau de la gorge préexistante à l'aide d'un système de roulement [TSC 95] (figure 2). L'enfoncement du coin provoque ainsi l'ouverture de l'éprouvette pré-fissurée en mode I. Les essais sont réalisés avec un contrôle du déplacement de la traverse en appliquant une vitesse constante de 0,5 mm/min. L'ouverture de l'entaille (ou Crack Mouth Opening Displacement (CMOD)) est continuellement mesurée à l'aide de deux capteurs LVDT placés d'un côté et l'autre de l'entaille.

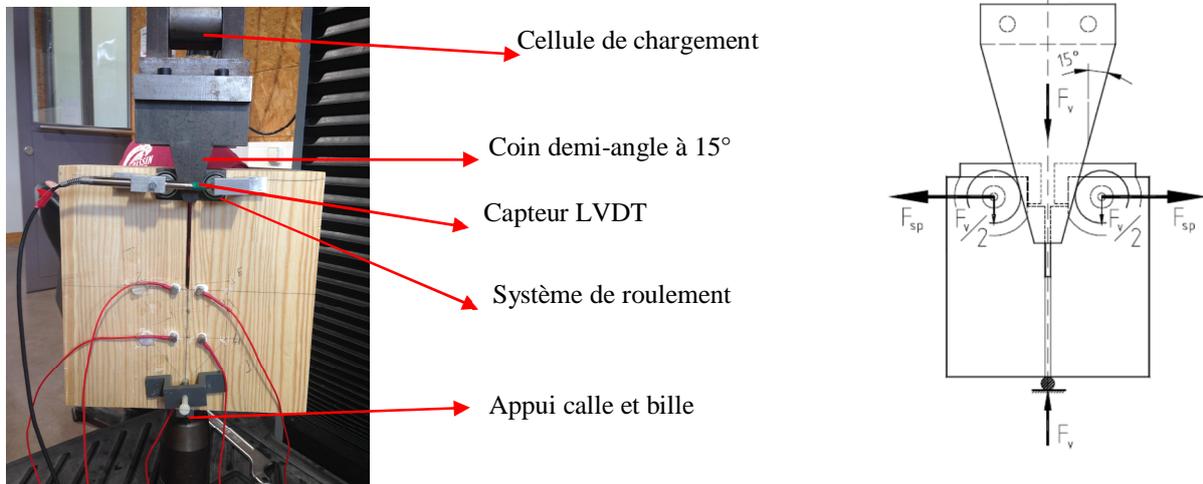


Figure 2. Configuration de l'équipement et principe de l'essai WST.

La force verticale P_v de compression de la presse électromécanique est vectoriellement divisée en une force transversale d'ouverture du spécimen P_{sp} tel que :

$$P_{sp} = \frac{P_v}{2 \tan \alpha} = \frac{P_v}{2 \tan(15)} \quad [1]$$

2.2 Technique d'émission acoustique

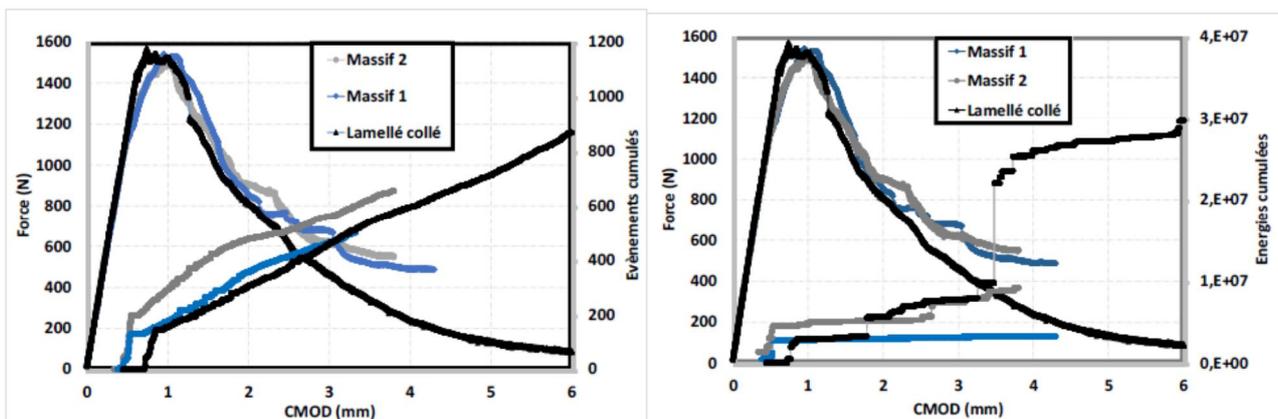
Le dispositif d'acquisition et de traitement des signaux d'émissions acoustiques est constitué d'un système d'acquisition MISTRAS 8 voies. Six capteurs piézoélectriques sont placés sur l'éprouvette entaillée autour de la zone de propagation de la fissure. Ils sont positionnés sur les éprouvettes avec une faible couche de graisse silicone chassée d'air. Cette technique permet de garantir un meilleur couplage entre les capteurs et l'éprouvette et par conséquent assurer une bonne transmission des signaux qui sont amplifiés par un amplificateur ayant un gain de 40 dB. Un seuil de détection de 40 dB a été choisi pour filtrer le bruit de fond. L'erreur de localisation maximale mesurée avec des cassées de mines est de l'ordre de 5 mm. Les erreurs de localisation peuvent être reliées aux différents mécanismes d'absorption et de diffusion des ondes par le matériau en fonction de sa structure et son anisotropie ainsi qu'à d'autres facteurs reliés au couplage, ainsi qu'à la méthode de détection des signaux et de calcul des positions, etc. L'acquisition est validée avant chaque essai en utilisant la source HSU-NIELSEN (Norme NF EN 1330). Cette procédure permet d'estimer d'une part la vitesse de propagation et d'autre part l'atténuation des ondes acoustiques dans le matériau.

Dans cette étude, afin de prendre en compte l'anisotropie du bois dans l'algorithme de localisation, une localisation planaire en 2D avec deux vitesses différentes a été utilisée. Ces vitesses ont été déterminées préalablement en réalisant des cassés de mines dans le sens longitudinal et transversal et sur deux diagonales entre les capteurs sur la surface du bois. Pour le bois massif, les vitesses de propagation mesurées dans le sens longitudinal et transversal sont égales à 4200 m/s et 850 m/s respectivement ce qui est attendu connaissant les propriétés mécaniques du bois et la meilleure résistance à la traction du bois dans le sens longitudinal par rapport à son comportement dans le sens radial et tangentiel. Pour le bois lamellé collé, les vitesses de propagation mesurées dans le sens longitudinal et transversal sont égales à 4200 m/s et 950 m/s respectivement.

3. Analyse des résultats

3.1 Corrélation entre les courbes de rupture et l'activité acoustique

La figure 3 présente les courbes force-CMOD obtenues pour les éprouvettes en bois massif et en bois lamellé collé en parallèle avec le nombre cumulé des événements. La force obtenue avec le bois lamellé collé a été corrigée afin de prendre en compte la différence d'épaisseur entre les éprouvettes. Les résultats montrent une bonne corrélation entre les courbes force-CMOD et l'activité acoustique. La comparaison entre les courbes force CMOD montre un comportement proche pour les deux types d'éprouvettes mais avec une phase élastique plus importante pour les éprouvettes en bois lamellé collé. La technique d'émission acoustique utilisée en parallèle permet aussi de mieux apprécier les différences de comportement à l'échelle de la microstructure avec une activité acoustique qui apparaît plus tardivement au niveau du pic. Des essais supplémentaires doivent être réalisés afin de vérifier si ce gain de rigidité est relié à la colle, à l'essence du bois ou simplement dû à l'hétérogénéité du bois. Le taux des événements cumulés reste plus ou moins constant après le pic indiquant la propagation stable des fissures suivant le sens des fibres. Les mêmes tendances sont observées au niveau des énergies cumulées avec parfois des sauts d'énergies qui peuvent être dû au pontage des fissures [VAS 02]. A noter ici qu'un essai supplémentaire, réalisé avec du bois lamellé collé, n'a pas été présenté ici, car l'entaille a été créée au niveau du noyau provoquant ainsi une résistance à la rupture plus faible par rapport aux autres. La courbe force CMOD et l'activité acoustique correspondante ont montré par contre un comportement à la rupture très ductile accompagné d'une activité acoustique beaucoup plus importante.



(a)

(b)

Figure 3. Corrélation entre les courbes force-CMOD avec (a) le nombre cumulé des événements acoustiques et (b) l'énergie cumulée.

3.2 Localisation des événements acoustiques

La méthode de localisation consiste à mesurer les différences de temps d'arrivée d'un signal aux différents capteurs utilisés répartis sur la surface de l'éprouvette de façon à constituer une maille de localisation. En configuration 2D, pour qu'une source soit localisée, il suffit qu'une salve atteigne au moins trois capteurs. La localisation cumulée des événements acoustiques durant l'essai WST est présentée sur la figure 4 pour les éprouvettes en bois massif et en bois lamellé collé. Les points représentent les sources d'émission acoustique détectées sur une fenêtre d'observation en fonction des coordonnées x et y centrée sur l'entaille. Les dimensions de la fenêtre d'observation sont celles des dimensions des éprouvettes et représentent respectivement la largeur et la hauteur de l'éprouvette. La localisation des sources d'émission acoustique est présentée au pic de chargement, et à la fin de l'essai de rupture pour montrer l'accumulation de l'endommagement dans l'éprouvette.

Les événements acoustiques présentent des paramètres différents en termes d'énergie, d'amplitude, etc. qui peuvent correspondre à des mécanismes d'endommagement différents. Pour cela, les événements ont été divisés en plusieurs classes selon leur énergie absolue (aJ).

Une faible activité acoustique a été enregistrée pendant la phase élastique de la courbe force-CMOD indiquant très peu d'endommagement. Les événements commencent à se localiser à partir de la zone non linéaire de la courbe force-CMOD. Les cartes de localisation au pic de chargement montrent que les événements sont principalement présents au-dessus de l'entaille. La contrainte de traction étant maximale dans les éprouvettes au niveau du front

de la fissure, l'endommagement et la formation d'une bande de microfissuration commencent à se localiser autour de l'entaille indiquant le début de fissuration. L'activité acoustique continue à augmenter après le pic dans la phase "dite phase d'adoucissement". Cette augmentation correspond à la propagation des fissures et d'autres changements inélastique et irréversible dans le matériau qui peuvent dissiper de l'énergie.

Dans la figure 4, on peut observer que les microfissurations sont bien distribuées à travers le ligament. Ainsi, les sources d'émission acoustique sont localisées dans une bande qui représente le mode de propagation de la fissure. La zone d'endommagement à l'extrémité de la fissure est caractérisée par plusieurs mécanismes complexes (événements avec des énergies différentes). L'activité acoustique étant proportionnelle à la densité des microfissurations, le profil de la largeur de la zone d'endommagement montre une zone de localisation plus réduite dans les éprouvettes en bois massif.

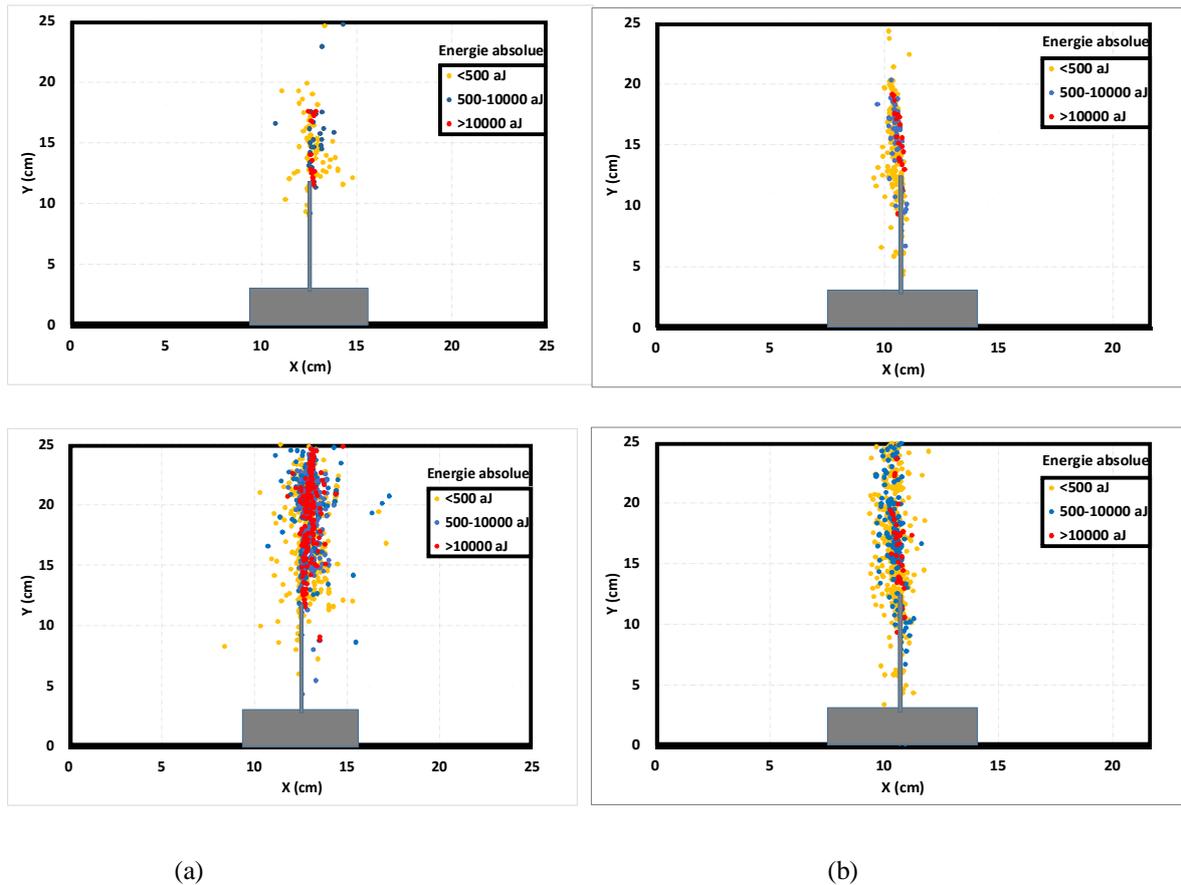
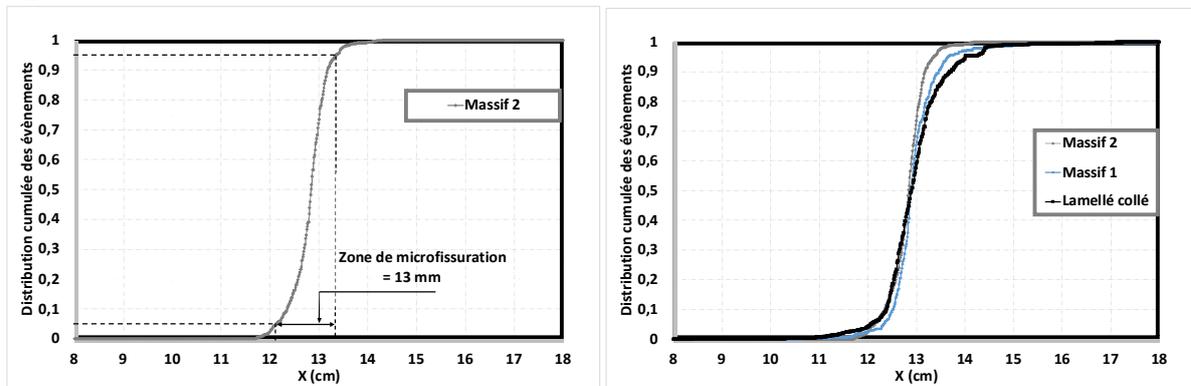


Figure 4. Plan des sources d'EA localisées au pic de chargement, et à la fin de l'essai pour (a) les éprouvettes en bois lamellé collé et (b) les éprouvettes en bois massif.

4. Etude de la zone d'endommagement

Un des objectifs de l'analyse en émission acoustique est de déterminer les caractéristiques de la zone de microfissuration, et plus particulièrement sa largeur. Plusieurs approches statistiques ont été utilisées dans la littérature en se basant sur la répartition des événements ou des énergies [SAL 12 ; HAI 05 ; HAD 07 ; SBA 14]. L'analyse implémentée dans notre étude consiste à tracer la distribution cumulée des événements acoustiques qui suit une loi normale (figure 5). La quantification des zones de microfissuration des différents cas expérimentés est ainsi réalisée en déterminant la zone à forte densité d'événements. Un seuil de signification de 5% est choisi comme critère statistique afin de ne prendre en compte qu'une densité significative des événements avec un risque de 5% [SBA 14]. La courbe (figure 5a) est ainsi divisée en deux zones : 1) la première correspond à une zone de confiance dans laquelle le nombre élevé des événements est relié à l'endommagement du matériau au front de la macro fissuration ; 2) la seconde est représentée par un pourcentage plus faible d'événement qui correspond à un niveau d'endommagement plus faible. Un comparatif des distributions est présenté sur la figure 5b. Après application du seuillage statistique sur les trois courbes, les largeurs de la zone de microfissuration calculées sont respectivement de 13 mm et 15 mm pour les éprouvettes en bois massif et de 18 mm pour le cas du lamellé collé.

La différence entre les deux éprouvettes de bois massif de même géométrie est non significative puisqu'elle est inférieure à 10%. Pour l'éprouvette en lamellé collé qui a une géométrie plus élevée, une légère augmentation de la zone de microfissuration est observée (4 mm plus large que la moyenne des deux éprouvettes en massif). Cette différence au niveau de la largeur de la bande accompagnant le front de la fissure peut être due à l'épaisseur plus importante pour l'éprouvette en bois lamellé collé, ainsi qu'au déphasage ou à un chemin de fissure plus tortueux entre les deux faces et à des mécanismes d'endommagement différents. En effet, pour le bois lamellé collé, la rupture a été observée au niveau de la direction tangentielle du bois avec des gondolements au niveau des faciès de rupture.



(a) calcul de la largeur de microfissuration, cas de l'échantillon Massif 2

(b) comparaison entre les trois éprouvettes

Figure 5. Distribution cumulée des événements dans les éprouvettes en bois.

5. Conclusion

Les résultats de ce travail de recherche permettent d'analyser le comportement à la rupture des éprouvettes en bois Epicéa massif et en bois lamellé collé de pin. Les résultats montrent que la technique d'ÉA est une méthode très pertinente pour observer la localisation des fissures dans ce type de matériau en prenant en compte son anisotropie. L'évolution du nombre cumulé des événements ainsi que l'étude des cartes de localisation permettent de suivre les différentes phases d'évolution de la zone de microfissuration. Les cartes de localisation ont mis en évidence la présence d'une bande d'activité acoustique au front de la fissure ayant une largeur qui varie entre 13 et 15 mm pour le bois massif et 18 mm pour le bois lamellé collé.

Ce travail constitue une étude préliminaire de faisabilité, une large campagne d'essai est programmée afin de suivre l'évolution de l'endommagement et mieux comprendre les mécanismes de rupture en jeu de plusieurs essences de bois à l'aide de la technique d'ÉA avec un couplage avec d'autres méthodes de contrôle non destructif comme le traitement d'images et les ultrasons. Une étude plus approfondie peut être également une piste intéressante en analysant les signatures acoustiques afin de discriminer les différents mécanismes d'endommagement, voire identifier les micro-endommagement dans le plan de colle du lamellé collé.

6. Références

- [AIC 01] AICHER S., L.HOFLIN L., G. DILL-LANGER G., «Damage evolution and acoustic emission of wood at tension perpendicular to fiber », vol.59., n° 1-2, 2001, p. 104-116.
- [AND 06] ANDO K., HIRASHIMA Y., SUGIHARA M., HIRAO S., SASAKI Y., «Microscopic processes of shearing fracture of old wood, examined using the acoustic emission technique », Wood Science and Technology, Vol.52, n° 6 ,2006, p.483-489.
- [BOO 95] BOOKER J. D., DOE P. E., «Acoustic emission related to strain energy during drying of Eucalyptus regnans boards », Wood Science and Technology, Vol.29, n°2, 1995, p.145-156.
- [HAD 07] HADJAB H.S., THIMUS J.Fr, CHABAAT M., « The use of acoustic emission to investigate fracture process zone in notched concrete beams », *Current Science*, Vol. 93, n° .5, 2007, p. 648-653.
- [HAI 05] HAIDAR K., PIJAUDIER-CABOT G., DUBE J.F., LOUKILIA., « Correlation between the internal length, the fracture process zone and size effect in model materials », *Materials and Structures*, Vol.38, n°2, 2005, p.201-210.
- [KOW 04] KOWALSKI S.J., MOLINSKI W., MUSIELAK G., «The identification of fracture in dried wood based on theoretical modelling and acoustic emission», Wood Science and Technology, Vol.38, p.35-52, 2004.

- [LAN 00] LANDIS E.N., WHITTAKER D. B., «Acoustic emission and the fracture energy of wood », Condition Monitoring of Materials and structure Conference, May 21-24, 2000, Austin, Texas, United States, Publisher ASCE, p. 21-29.
- [LEE 96] LEE S. H., QUARLES S. L., SCHNIEWIND A. P., « Wood fracture, acoustic emission, and the drying process Part 2. Acoustic emission pattern recognition analysis », Wood Science and Technology, Vol.30, n°4,1996, p.283-292.
- [REI 00] REITERER A., STANZL-TSCHEGG S. E., TSCHEGG E.K., « Mode I fracture and acoustic emission of softwood and hardwood », Wood Science and Technology, Vol.34, n° 5, 2000, p.417-430.
- [RIT 14] RITSCHHEL F., ZHOU Y., BRUNNER A. J., FILLBRANDT T., NIEMZ P., « Acoustic emission analysis of industrial plywood materials exposed to destructive tensile load », Wood Science and Technology, Vol.48, n° 3, 2014, p.611-631.
- [SAL 12] SALIBA J., LOUKILI A., GRONDIN F., REGOIN J-P., « Experimental study of creep-damage coupling in concrete by acoustic emission technique », Materials and Structures, Vol. 45, n° 9, 2012, p.1389-1401.
- [SBA 14] SBARTAÏ ZM, SAÏDOUN K, « Evaluation de l'endommagement mécanique des bétons par emission acoustique ». Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, Janvier-Mars 2014.
- [SCH 96] SCHNIEWIND A.P, QUARLES S.L. LEE S.H. « Wood fracture, acoustic emission, and the drying process Part 1. Acoustic emission associated with fracture », Wood Science and Technology, Vol.30, 1996, p.273-281.
- [TSC 95] TSCHEGG E. K., ELSER M., STANZL-TSCHEGG., « Biaxial fracture tests on concrete-Development and Experience », Cement & Concrete Composites, 17, n° 1, 1995, p. 57-75.
- [VAS 02] VASIC S., SMITH I., « Bridging crack model for fracture of spruce », Engineering Fracture Mechanics, Vol.69, n° 2, 2002, p.745-760.
- [LAM 15] LAMY F., TAKARLI M., ANGELLIER N., DUBOIS F., POP O., « Acoustic Emission Technique for fracture analysis in wood materials ». International Journal on Fracture, Vol.192, 2015, p.57-70.