

Comparaison des propriétés de rupture du Pin Maritime et de l'Epicéa en mode I et II purs : un protocole d'essai

Edouard Sorin¹, Jean-Luc Coureau¹, M. Chaplain¹, F. Lanata², A. Cointe¹, P. Galimard¹

¹ I2M CNRS UMR 5295, Talence

² LUNAM, Ecole Supérieure du Bois (ESB), LIMBHA, Nantes

RÉSUMÉ.

Cet article établit le protocole d'une campagne expérimentale, qui sera réalisé prochainement, et ayant pour objectif de comparer les propriétés de rupture en mode I et II, de l'Epicéa et du Pin Maritime. Afin de s'affranchir de l'influence de la géométrie, une géométrie unique pouvant être testée en mode I et II a été étudiée. De plus, pour limiter les effets de la variabilité, les éprouvettes testées sont jumelées selon deux méthodes différentes de débit. Dans cette étude le bois est considéré comme quasi-fragile, ainsi les comparaisons seront effectuées à partir des courbes-R. Le dernier objectif de cette campagne expérimentale, est d'établir une relation entre l'angle des cernes de croissance du bois et les paramètres des courbes-R selon les deux modes de rupture.

ABSTRACT.

This article aimed at establishing the protocol of an experimental campaign, in order to characterize the degree of anisotropy of fracture energies of Spruce and Maritime Pine (mode I and II). In order to avoid the influence of the geometry on the fracture properties, a single geometry, was chosen. Moreover, in order to reduce the effect of variability, the tested specimen are twinned according to two different methods. In this study wood is considered as quasi-brittle material, so the comparison will be performed according to different R-curve parameters. The last objective of this investigation is to determine a relationship between the orientation of the annual rings and corresponding R-curve parameters in mode I and II of failure.

MOTS-CLÉS : Pin Maritime, Epicéa, Rupture, Mode I, Mode II, Quasi-fragilité.

KEY WORDS : Maritime Pine, Spruce, Fracture, Mode I, Mode II, Quasi-brittleness.

1. Introduction

Cette étude fait partie d'un projet de recherche plus global sur le renforcement des poutres entaillées ou avec réservation. La campagne expérimentale proposée a pour objectif d'alimenter un modèle numérique de dimensionnement au fendage ; mais également, de mettre en évidence une des limites du calcul proposé actuellement dans les Eurocodes 5[CEN 04] , voir paragraphe 2.

2. Etat de l'art

Jockwer [JOC 11], suite à une analyse de sensibilité, indique que l'énergie de rupture est le paramètre le plus sensible dans le calcul de la charge ultime des poutres entaillées en bois proposé dans les Eurocodes 5. L'expression proposée par Gustafsson [GUS 88], qui est à l'origine de cette formule, n'utilise que la résistance à la propagation en mode I de l'essence d'Epicéa (*Picea abies.*) pour déterminer la capacité résistante des composants. Pour d'autres essences, la valeur requise en énergie de rupture est celle de l'Epicéa, ce qui ne permet pas une estimation plus fiable de la capacité portante des poutres en fonction des classes de résistance. Or une étude réalisée par Dourado *et al.* [DOU 08] montre que la résistance à la propagation de fissure critique en mode I (G_{RIC}) du Pin Maritime (*Pinus pinaster*) est 1.4 fois supérieure à celle de l'Epicéa (cf. Tableau 1).

Géométrie du specimen	Mode de fissuration	G_{RIC} (J/m ²)	G_{RIC} (J/m ²)	Ratio Pin Maritime/ Epicéa
SEN/TPB	TL	209 [DOU 08] CoV = 13.1%	149 [DOU 08] CoV = 12.3%	1.40
			145 [MOR 05] CoV = 13%	1.44

Tableau 1. Comparaison entre la résistance à la propagation en mode I (G_{RIC}) de l'Epicéa et du Pin Maritime

Dans le reste de la littérature il est très difficile de comparer le G_{RIC} de l'Epicéa avec celui du Pin Maritime (cf. Tableau 2), en raison de la diversité des protocoles d'essais. Il existe de nombreuses géométries différentes pour déterminer cette valeur, or la résistance à la propagation est dépendante de la géométrie des éprouvettes utilisées [LES 07]. De plus en raison de la diversité des protocoles d'essais, l'orientation des cernes va avoir une influence importante sur la valeur de G_{RIC} selon le plan de fissuration choisi (cf. Figure 1). En effet, en comparant les tests DCB réalisés par de Moura *et al.* [MOU 08] avec ceux réalisés sur des éprouvettes mTDCB par Phan [PHA 16], on remarque que G_{RIC} est 2.27 fois supérieure lorsque l'on fissure dans le sens TL par rapport au sens RL. Les éprouvettes DCB, TDCB et mTDCB sont très semblables, c'est pourquoi il est possible de comparer ces valeurs avec celle obtenues par Lespine [LES 07], les éprouvettes ayant été fissurées dans le sens TL dans les deux cas. En faisant la moyenne des trois géométries testées par Lespine, on obtient un G_{RIC} pour le Pin Maritime 2.17 fois supérieure à celui de l'Epicéa. Comme pour l'étude menée par Durado *et al.* [DOU 08], la résistance à la propagation du Pin Maritime est supérieure à celle de l'Epicéa.

Géométrie du specimen	Mode de fissuration	G_{RIC} (J/m ²)	Essence
mTDCB	TL	600 [PHA 16]	Pin Maritime
DCB	RL	264 [MOU 08]	Pin Maritime
DCB	TL	248 [LES 07]	Epicéa
TDCB10	TL	271 [LES 07]	Epicéa
TDCB20	TL	309 [LES 07]	Epicéa

Tableau 2. Valeurs de G_{RIC} issue de la littérature pour le Pin Maritime et l'Epicéa

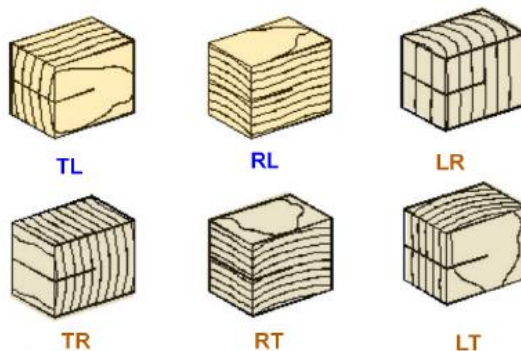


Figure 1. Six principaux modes de fissuration du bois

Ainsi dans le cas des poutres entaillées en Pin Maritime, on peut supposer que l'Eurocode 5 sous-estime la capacité ultime de chargement de la structure, ce qui va dans le sens de la sécurité mais amène à des surdimensionnements sans la prise en compte de la quasi-fragilité. Toutefois, le manque d'études comparatives entre les énergies de ruptures de l'Epicéa et du Pin Maritime ne permet pas d'affirmer qu'une structure en Pin

Maritime est plus résistante à la propagation de fissure en mode I que du mode de rupture I. Dans le cas des poutres entaillées, la rupture s'effectue en mode mixte [TOU 16]. Si l'on souhaite approfondir le calcul proposé par les Eurocodes 5, il est nécessaire de déterminer G_{RIC} pour l'Epicéa et le Pin Maritime et de traiter le mode mixte.

Un protocole pour une campagne expérimentale prévue a donc été établi afin de comparer les valeurs de la résistance à la propagation en mode I et en mode II (G_{RIC} et G_{RIIC}) sur une même géométrie d'éprouvettes pour de l'Epicéa et le Pin Maritime.

3. Protocole d'essai

Pour répondre aux objectifs décrits précédemment, la géométrie choisie se base sur les essais réalisés par Aicher *et al.* [AIC 97] (cf. Figure 2). En effet, cette géométrie permet d'obtenir une propagation de fissure stable en mode I (TDCB [LES 07], [PHA 16]) et en mode II (LTENF [AIC 97]). Afin d'atténuer la variabilité des résultats, on cherche à tester des éprouvettes jumelles en mode I et II pour obtenir des propriétés semblables. On réalise le débit selon le schéma de la Figure 3.

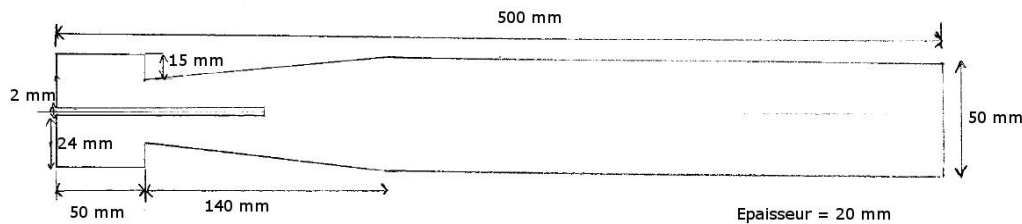


Figure 2. Géométrie des éprouvettes testées en mode I et en mode II

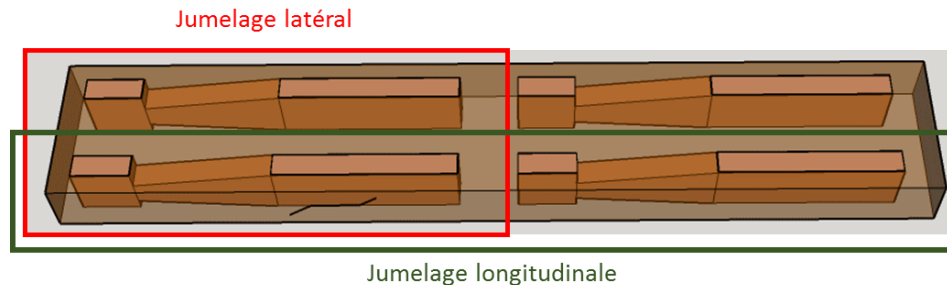


Figure 3. Schéma du débit des poutres (vue de dessus)

Ainsi on obtient dans une poutre quatre éprouvettes identiques, deux testées en mode I et les deux autres en mode II. Le débit proposé permet de tester deux types de jumelage, un que l'on peut qualifier de latéral et l'autre longitudinal, afin d'avoir un bois semblable pour au moins deux éprouvettes sur les quatre.

Dans le cas d'un matériau quasi-fragile, la résistance à la propagation de fissure (courbe-R) est caractérisée en fonction de la longueur équivalente de fissure ([MOR 05], [LES 07], [MOR 07]). L'équation type de cette courbe (cf. [1]) est composée de trois paramètres, β : la pente correspondant à la croissance de la zone d'endommagement, Δ_{ac} : la longueur critique de la zone endommagée, G_{RIC} : la résistance à la propagation de fissure critique. Par ces paramètres, on peut comparer le comportement à la rupture des deux essences en mode I et II. Les essais étant réalisés selon deux modes de fissuration, il est possible d'étudier l'impact de l'orientation des cerne (γ) sur chacune des courbes-R. De plus, en réalisant des essais avec des γ aléatoires on peut, déterminer une relation entre l'angle de cerne et chacun des paramètres des courbes-R en mode I et en mode II.

$$G_{RI}(a) = \begin{cases} \frac{G_{RIc}}{\Delta a_c^{\beta_I}} \times \Delta a^{\beta_I} & \text{si } \Delta a < \Delta a_c \\ G_{RIc} & \text{si } \Delta a > \Delta a_c \end{cases} \quad [1]$$

4. Conclusion et perspectives

La campagne expérimentale proposée dans cette étude, a pour but de déterminer le degré d'anisotropie en mode I et II des énergies de ruptures du Pin Maritime (*Pinus pinaster*) et de l'Epicéa (*Picea abies*). De plus, pour pouvoir comparer les propriétés de rupture en mode I et II de la façon la plus rigoureuse possible, on choisit de réaliser les essais sur une même géométrie d'éprouvette pour les deux modes de rupture et on propose un échantillonnage jumelé. La différence d'énergie de rupture entre deux essences de bois résineux devrait être correctement mise en évidence. De plus, les données récoltées permettront de continuer le développement du modèle de prédiction de la charge de ruine des poutres entaillées développé au laboratoire I2M de Bordeaux pour deux essences de bois, l'Epicéa et le Pin Maritime.

- [CEN 04] CEN, Ed., "Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings," 2004.
- [JOC 11] R. Jockwer, R. Steiger, A. Frangi, and K. Jochen, "Impact of material properties on the fracture mechanics design approach for notched beams in Eurocode 5." Aug-2011.
- [GUS 88] P. J. Gustafsson, "A study of strength of notched beams," presented at the CIB-W18 Meeting 21, Parksville, Canada, 1988, vol. 21-10-1.
- [DOU 08] N. Dourado, S. Morel, M. F. S. F. de Moura, G. Valentin, and J. Morais, "Comparison of fracture properties of two wood species through cohesive crack simulations," *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 39, no. 2, pp. 415-427, Feb. 2008.
- [MOR 05] S. Morel, N. Dourado, and G. Valentin, "Wood: a quasibrittle material R-curve behavior and peak load evaluation," *Int. J. Fract.*, vol. 131, no. 4, pp. 385-400, Feb. 2005.
- [LES 07] I. Lespine, "Influence de la géométrie des structures sur les propriétés de rupture dans les matériaux quasi-fragiles," Bordeaux 1, 2007.
- [MOU 08] M. F. S. F. de Moura, J. J. L. Morais, and N. Dourado, "A new data reduction scheme for mode I wood fracture characterization using the double cantilever beam test," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 75, no. 13, pp. 3852-3865, Sep. 2008.
- [PHA 16] N. A. Phan, "Simulation of time-dependent crack propagation in a quasi-brittle material under relative humidity variations based on cohesive zone approach: application to wood," Bordeaux, 2016.
- [TOU 16] E. Toussaint, E. Fournely, R. Moutou Pitti, and M. Grédiac, "Studying the mechanical behavior of notched wood beams using full-field measurements," *Eng. Struct.*, vol. 113, pp. 277-286, Apr. 2016.
- [AIC 97] S. Aicher and Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, Eds., *Determination of fracture energy of wood in Mode II: RILEM TC 133 report*. Borås, 1997.
- [MOR 07] S. Morel, "R-curve and size effect in quasibrittle fractures: Case of notched structures," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 44, no. 13, pp. 4272-4290, Jun. 2007.