

Poutres en bois de Notre Dame de Paris après l'incendie : réutilisables ?

CHAPLAIN Myriam, REBHI Amal, COUREAU Jean Luc

Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M), Département Environnement et Génie Civil (GCE), Université de Bordeaux, Talence, France

myriam.chaplain@u-bordeaux.fr

Mots clefs : bois ; fissuration, durabilité ; réutilisation ; incendie

Contexte et objectif

Cette étude s'inscrit dans le cadre du programme PEPS CNRS Ingénierie 2024 – FuturVieuxBois. L'objectif de ce projet est de pérenniser l'usage du bois de construction comme puits de carbone en analysant l'effet du vieillissement sur ses propriétés, afin d'en favoriser le maintien en service, le réemploi (pour des usages similaires) ou la réutilisation (pour d'autres usages). Le matériau d'étude est le chêne issu de la charpente incendiée de Notre-Dame de Paris. Ce choix s'inscrit dans la perspective d'un projet plus vaste sur la valorisation structurelle des bois anciens. Les altérations abiotiques de surface, notamment celles liées à l'exposition à la chaleur lors de l'incendie, seront également prises en compte comme facteurs de modification.

Notre étude à l'I2M vise à caractériser les propriétés (taux de restitution d'énergie) à rupture du bois vieilli et ayant subi un incendie à partir d'échantillons prélevés sur les poutres de la charpente de Notre-Dame de Paris. Une comparaison avec les propriétés mécaniques du chêne « contemporain » sera menée, afin d'évaluer la perte – ou l'absence de perte – de performances mécaniques de ce bois de récupération destiné potentiellement au réemploi.

Matériel et méthode

Comportement quasi-fragile du bois

La propagation de fissure du bois se caractérise par le développement d'une zone endommagée à partir de laquelle prend naissance une fissure principale. Le développement de cette zone d'élaboration est caractérisé par des micro-mécanismes. Dans cette zone de fissuration prennent place deux grands types de mécanismes de rupture que sont la microfissuration et le pontage de fissure. Ils engendrent une dissipation progressive de l'énergie élastique de déformation. La rupture des matériaux quasi-fragiles se caractérise par un comportement non-linéaire dû à la présence d'une zone d'élaboration de la fissure nommé Fracture Process Zone (FPZ) (Fig. 1).

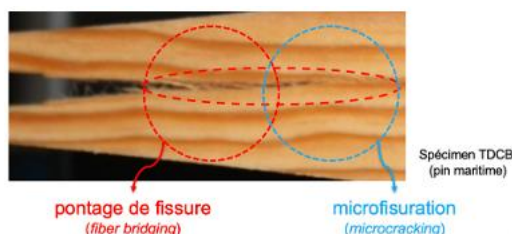


Fig. 1 : Zone d'élaboration de fissure (Fracture Process Zone FPZ)

Le comportement quasi-fragile d'un matériau peut être représenté par une courbe nommée courbe-R, reliant l'énergie de fissuration, le taux de restitution d'énergie, à la longueur de fissuration. Elle comporte deux régimes : un régime croissant, correspondant au développement

de la zone de fissuration jusqu'à sa taille critique et un régime plateau, associé à la propagation auto-similaire de la macro-fissure avec sa zone d'élaboration (Fig. 2 et 3).

Détermination de la courbe-R

La courbe-R est déterminée à partir de la complaisance λ (inverse de la raideur), obtenue par calculs aux éléments finis en recourant au concept de longueur de fissure élastique équivalente, selon l'approche de la Mécanique Linéaire Élastique de la Rupture Équivalente (MLEReq) proposée par Bažant (1997). La longueur de fissure élastique équivalente correspond à la fissure qui, dans un modèle purement élastique, conduit à la même complaisance que l'élément réellement fissuré. Cette méthode est particulièrement adaptée aux matériaux quasi-fragiles, pour lesquels il est impossible de définir précisément une longueur de fissure réelle en raison de l'existence d'une zone d'élaboration (Fig. 1). La valeur de la longueur de fissure élastique équivalente, notée a , est déterminée par éléments finis, en ajustant si nécessaire les propriétés élastiques du modèle de manière à obtenir la complaisance initiale $\lambda(a_0)$ associée à la fissure initiale a_0 .

L'augmentation de la complaisance est considérée comme ne dépendant que du développement ou de la propagation de la FPZ (Fig. 2). Sur cette base, il est possible d'estimer le taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure élastique équivalente a et ainsi d'obtenir une courbe-R (Fig. 3).

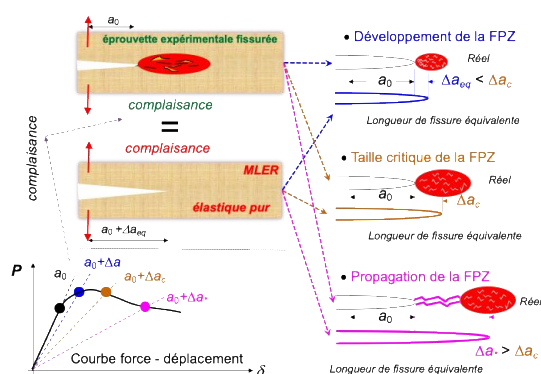


Fig. 2 : Représentation de la MLEReq et de sa longueur de fissure équivalente

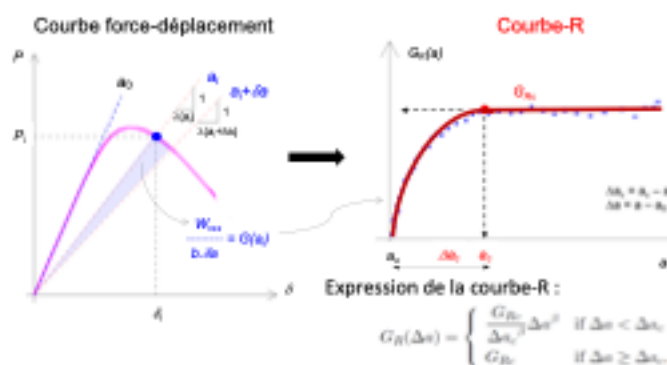


Fig. 3 : Représentation de la courbe-R à partir de la MLEReq et du principe de longueur de fissure élastique équivalente (a_0 : longueur de fissure initiale, a_i obtenue par éléments finis correspondant à λ_i de l'essai)

Morel et al (2005, 2010) propose de la modéliser par une loi puissance pour le régime croissant et une constante pour le plateau (Fig. 3). La valeur plateau G_{Rc} en J/m^2 de la courbe-R n'est autre que l'énergie critique de propagation de la fissure. Le croisement des deux régimes est le point où la zone d'élaboration a atteint sa taille critique a_c et l'incrément de longueur de fissure $\Delta a_c = a_c - a_0$ fournit alors une estimation de la longueur élastique équivalente de la zone d'élaboration de la fissure. Le dernier paramètre de l'expression théorique de la courbe-R est l'exposant β de la loi puissance. Ce paramètre joue sur la courbure de la loi puissance et est compris entre 0 et 1. Ainsi, lorsque $\beta = 0$ nous sommes dans le cas particulier d'un matériau purement fragile.

Résultats et discussion

Étant donné la petite dimension des échantillons de bois prélevés à Notre-Dame de Paris (Fig. 4), nous avons choisi de réaliser des essais de fissuration en mode I (ouverture) sur des éprouvettes de type Compact Tension (CT) (Fig. 5). Nous avons pu obtenir 4 éprouvettes dans l'échantillon 4023B, 3 dans le 8063B, 9 dans le 4076B(b) et 9 dans l'échantillon 4076B(c). Il

n’a été possible de découper deux éprouvettes dans l’épaisseur que sur les échantillons 4076B(b) et (c) (épaisseur supérieure à 180 mm). La fissure initiale est réalisée à l’aide d’une lame rigide de 2 mm et finalisée par un coup de cutter (sur environ 2 mm).



Fig. 4 : Échantillons de poutres de Notre-Dame de Paris (date abatage 1185)

Afin d’avoir une propagation « stable » et obtenir le pic et la décroissance, de la courbe force - déplacement nécessaire pour déterminer la courbe-R, un pilotage en ouverture de fissure au niveau du fond de fissure initiale a_0 est prévu à l’aide de suivi des cibles 1 sur les 2 faces de l’éprouvette (Fig. 5). Le déplacement de la force est obtenu par le suivi des cibles 2, elle est égale à la moyenne des déplacements relevés au niveau des 2 faces Afin d’avoir l’intégralité des paramètres de la courbes-R, il faut également que la longueur de la FPZ soit inférieure à la longueur de l’accroissement de fissure possible, dans notre cas 30°mm.

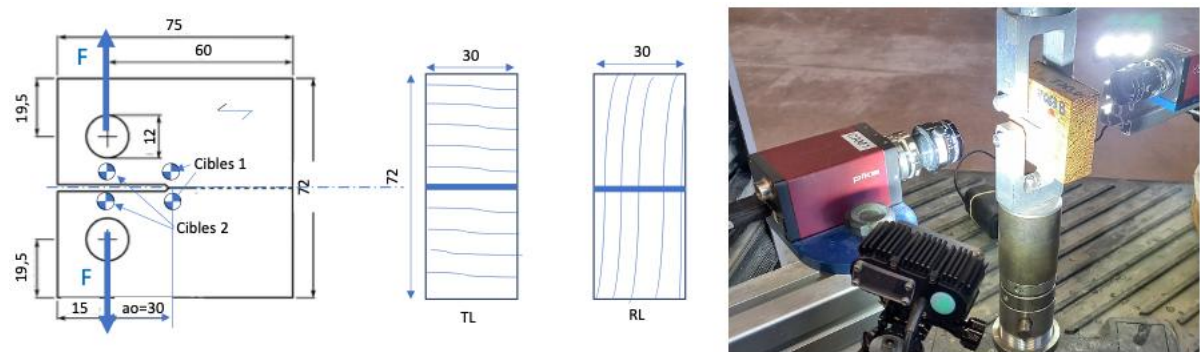


Fig. 5 : Dimension / configuration des éprouvettes CT et dispositif de l’essai

Il n’a pas été possible d’obtenir des éprouvettes CL présentant un plan de fissuration strictement TL ou RL, mais seulement une configuration intermédiaire (Fig. 5). Par ailleurs, malgré un pilotage en ouverture de fissure, seules 15 des 25 éprouvettes testées ont permis de déterminer une courbe-R, principalement des échantillons 4076B (b) et (c).

Le Tab. 1 présente, sans distinction de plan de fissuration, les moyennes et coefficients de variation des paramètres des courbes-R obtenues. Pour comparaison, les valeurs de courbes-R obtenues par Amal Rebhi (2024) sur des éprouvettes Mixed Mode Bending (MMB) de chêne contemporain sont également reportées dans le Tab. 1. Pour les deux types d’essais, sur éprouvettes CT ou MMB, le chêne avait été préalablement conditionné à 20 °C et 60 % d’humidité relative, correspondant à une teneur en eau d’environ 12 %.

Tab. 1 : Comparaison des propriétés du chêne contemporain et de Notre-Dame de Paris- Moyenne (cv)

Chêne	Eprouvettes	nombre d'essais (valides)	G_{rc} (J/m ²)	Δac (mm)	β	densité
Contemporain	MMB	11	337 (53%)	12 (53%)	0,26 (39%)	
Notre Dame de Paris	CT	15	206 (20%)	18 (17%)	0,21 (19%)	0,68 (13%)

Bien que Bažant (1997) souligne que la forme de la courbe-R dépend de la géométrie de l'éprouvette, si nous considérons que l'énergie G_{Rc} (valeur plateau) est peu influencée par cette géométrie, une diminution d'environ 40 % des performances est observée. Cette tendance devra toutefois être confirmée — ou infirmée — par des essais complémentaires.

La Fig. 6 présente un exemple de courbe-R ainsi que la courbe force-déplacement correspondante. Pour certains essais, il n'a pas été possible d'obtenir une propagation stable de la fissure : une rupture brutale est survenue peu après le pic de force, ce qui n'a pas permis de déterminer une courbe-R.

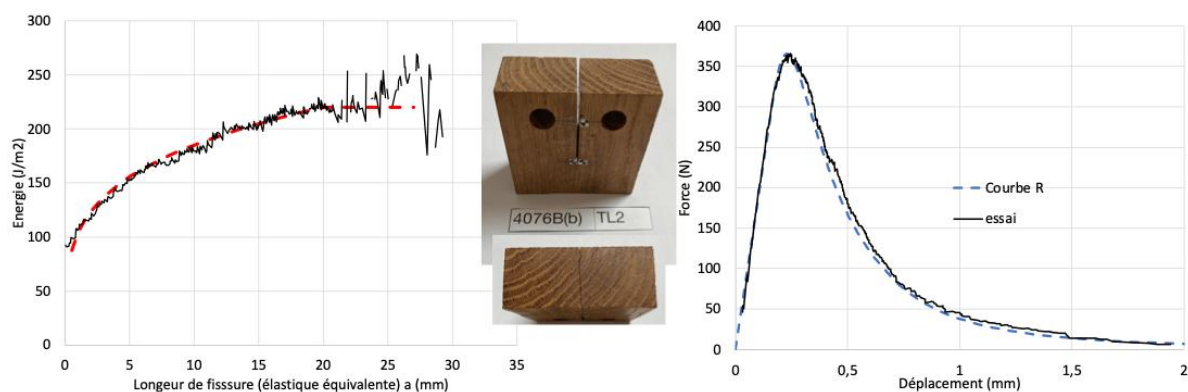


Fig. 6 : Exemple de courbe-R et des courbes force-déplacement expérimentale et obtenue avec la courbe-R

Conclusion et perspectives

Le nombre d'essais réalisés étant limité, il n'est pas possible de conclure de manière définitive sur le niveau de dégradation des performances en rupture du chêne de Notre-Dame de Paris après incendie. Des essais complémentaires sont prévus, incluant des éprouvettes CT de chêne contemporain pour comparaison. Si les dimensions des échantillons prélevés sur la charpente de Notre-Dame le permettent, des essais sur des éprouvettes CT (ou d'une autre géométrie) de dimensions plus importantes seront également envisagés, afin de s'assurer d'avoir toute la phase de développement de la FPZ.

Remerciement

Financier : PEPS CNRS Ingénierie 2024 –Plateforme d'essais : Xyloplate (I2M)

Références

- Bažant ZP, Planas J (1997) Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials. volume 16. CRC press.
- Morel S, Dourado N, Valentin G (2005) Wood: a quasibrittle material R-curve behavior and peak load evaluation. *International Journal of Fracture* 131, p. 385–400.
- Morel S, Lespine C, Coureau JL, Planas J, Dourado N (2010) Bilinear softening parameters and equivalent LEFM R-curve in quasibrittle failure. *International Journal of Solids and Structures* 47, 837–850.
- Rebhi A (2024) Modélisation de l'endommagement d'un matériau hétérogène biosourcé : application au bois massif. Thèse de doctorat- Université de Bordeaux, 220p.