

Prédiction de la charge ultime des poutres entaillées en bois avec et sans renforts

Edouard Sorin¹

¹ edouard.sorin@u-bordeaux.fr Laboratoire I2M Université de Bordeaux UMR 5295

RÉSUMÉ. Cet article présente une méthode de prédiction de la charge ultime des poutres entaillées en bois avec et sans renforts qui tient compte de la quasi-fragilité du matériau et de la propagation de fissure en mode mixte. Les besoins d'une telle méthode sont présentés dans un court état de l'art. La méthode proposée utilise la Mécanique Linéaire Élastique de la Rupture équivalente (MLEReq), et plus particulièrement les courbes-R, pour décrire le comportement quasi-fragile du matériau. La mixité des modes de propagation est déterminée à l'aide de la Virtual Crack Closure Technique (VCCT) et d'une loi de mélange entre les courbes-R en mode I et II purs. La pertinence de la méthode est ensuite comparée à celle des approches utilisées dans l'Eurocode 5 à l'aide d'une campagne expérimentale menée sur des éléments de dimensions d'emploi.

ABSTRACT. This article presents a method to predict the ultimate load of reinforced and unreinforced wooden notched beams which takes into account the quasi-brittleness of the material and the mixed mode crack propagation. The method is presented in a short state-of-the-art report. The proposed method uses the equivalent Linear Elastic Fracture Mechanic (eqLEFM), and especially the R-curves, in order to describe the quasi-brittle behaviour of the material. Mixed modes of crack propagation is defined by using the Virtual Crack Closure Technique (VCCT) and a criterion including the R-curves in pure mode I and II. The relevance of this method is then evaluated with rule of Eurocode 5 by comparing with experimental results performed on element of building dimensions.

MOTS-CLÉS : Poutre entaillée, prédiction, renforcement, courbe-R, mode mixte, bois.

KEY WORDS: Notched beam, prediction, reinforcement, R-curve, mixed mode, wood.

1. Contexte

Ces dernières années ont vu apparaître une augmentation significative du nombre de constructions en bois au niveau mondial, entraînée par la réalisation de projets vitrines toujours plus ambitieux. Cette volonté d'utiliser le matériau au maximum de ses capacités peut amener à l'utilisation d'éléments de structure qui présentent des zones de faiblesse conduisant à des fissurations prématurées dans les ouvrages. Ce sont des éléments soumis au fendage, qu'il est alors nécessaire de renforcer [FRA 15]. De nombreuses techniques de renforcement existent, mais le transfert des sollicitations entre le bois et le système de renforcement reste mal connu.

En effet, les recherches sur ce type de solutions ne considèrent pas les interactions possibles entre le comportement quasi-fragile du bois et les renforts. Pourtant, certains projets de recherche ont montré que la résistance du bois pouvait avoir un impact significatif sur la résistance ultime des éléments de structures [COU 02].

Lors du WCTE (*World Conference on Timber Engineering*) 2016 les questions du renforcement des éléments de structure ont fait l'objet de sessions de recherche, l'objectif à terme étant de proposer de nouvelles règles de dimensionnement dans ce domaine à l'approche de la révision de l'Eurocode 5 [DIE 16]. Il apparaît donc primordial d'étudier l'interaction entre les mécanismes de propagation de fissure et d'adhérence des renforts.

Dans cet article, seul le cas des poutres entaillées est étudié. En effet, celles-ci présentent une géométrie et un cas de chargement simplifié, l'effort tranchant étant à l'origine de la rupture, ce qui facilite l'analogie avec les essais de caractérisation proposés par la mécanique de la rupture. De plus, il s'agit du cas le plus représenté dans la littérature, ce qui permet de comparer la méthode proposée ici avec une base de données importante [FOL 89], [JOC 14].

2. Etat de l'art

Ces poutres ont la spécificité de présenter une entaille à l'une ou l'autre de leurs extrémités, voire même aux deux (Figure 1), et présentent au fond de celle-ci une zone de concentration de contraintes à l'origine du fendage du bois.

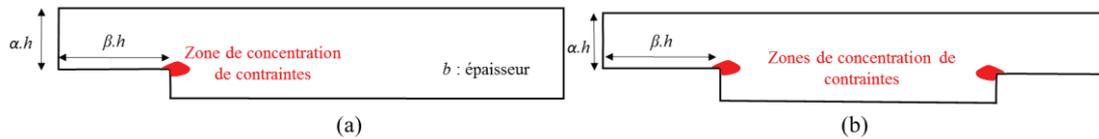


Figure 1. Schéma représentant des poutres entaillées avec une (a) ou deux entailles (a) et les zones de concentration de contraintes correspondantes

La Mécanique des Milieux Continus ne permet pas de calculer correctement les contraintes au niveau de cette zone car la singularité géométrique induit une contrainte infinie au sens de l'élasticité linéaire pouvant entraîner la fissuration du matériau. Griffith [GRI 21] propose une méthode basée sur une approche énergétique permettant de considérer la propagation locale d'une fissure au sein d'un matériau. On exprime alors la résistance à la propagation de fissure du matériau à l'aide d'un critère de rupture énergétique fondé sur le taux de restitution d'énergie critique (G_c). Cette propagation peut s'effectuer selon trois modes différents (Figure 2) :

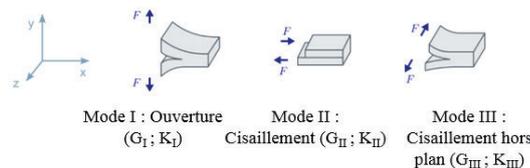


Figure 2. Les différents modes de propagation de fissure rencontrés

Dans le cadre d'application en Génie Civil, et plus particulièrement en construction bois, il existe de nombreuses méthodes de dimensionnement des poutres entaillées permettant d'obtenir une prédiction de la charge de ruine à partir des concepts de la mécanique de la rupture. Elles se différencient principalement par les hypothèses prises sur les mécanismes de fissuration. Dans cette étude, on considérera uniquement l'expression de l'Eurocode 5 [CEN 04] qui se base sur les travaux de Gustafsson [GUS 88]. Ce dernier propose une expression utilisant le taux de restitution d'énergie critique en mode I (G_c) et les propriétés élastiques du matériau (E_x , G_{xy}) pour prédire l'effort tranchant ultime de la poutre (V) (Equation 1). L'entaille étant à l'origine de la fissuration considérée en mode I du matériau, sa géométrie est également considérée dans ce calcul par les facteurs α et β .

$$\frac{V}{bah} = \frac{\sqrt{G_c/h}}{\sqrt{0.6(\alpha - \alpha^2)/G_{xy} + \beta \sqrt{6 \left(\frac{1}{\alpha} - \alpha^2\right) / E_x}}} \quad [1]$$

2.1. Quasi-fragilité

La considération seule du taux de restitution d'énergie critique en mode I ne prend pas en compte la quasi-fragilité du matériau (souvent négligée) et la mixité des modes de propagation. Or, le bois est un matériau quasi-fragile [MOR 05] qui présente avant la séparation totale de la matière, une zone de microfissuration et de pontage de fissure, que l'on appelle zone endommagée ou Fracture Process Zone (FPZ) en anglais. Ne pas considérer cette zone endommagée dans le cas du bois peut amener à une erreur dans la prédiction des performances mécaniques des composants de structure.

Afin de prendre en compte l'impact de la quasi-fragilité, il est possible de considérer la résistance à la propagation de fissure à l'aide d'une courbe-R, celle-ci se limitant à un plateau dans le cas d'un matériau purement fragile (Figure 3).

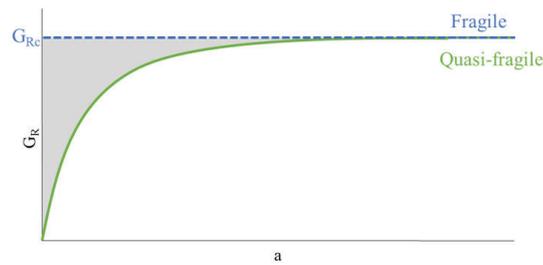


Figure 3. Comparaison entre la résistance à la propagation de fissure d'un matériau fragile et quasi-fragile dans un diagramme $G_R(a)$

2.2. Propagation en mode mixte

En ce qui concerne la mixité des modes de propagation de fissure, des études récentes [JOC 14], [TOU 16], ont montré, par corrélation d'images, qu'aux abords de l'entaille, dès l'initiation de fissure, il y a une forte concentration de déformations perpendiculaire au fil (ε_{yy}) que l'on peut associer au mode I. De plus, au cours de la propagation, une forte concentration de déformations de cisaillement (ε_{xy}) associée au mode II apparaît (Figure 4). Dans le cas des poutres entaillées, la propagation de fissure s'effectue donc dans au moins deux modes différents, avec un taux de mixité non constant. L'expression de l'Eurocode 5 ne considérant que la propagation en mode I, une partie des mécanismes de fissuration est négligée.

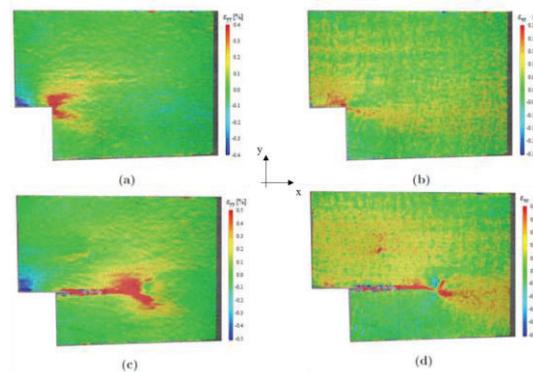


Figure 4. (a) et (c) : champs de déformations perpendiculaires au fil avant et après fissuration ; (b) et (d) : champs de déformations de cisaillement avant et après fissuration [JOC 14]

La mixité des modes de propagation peut alors être considérée à l'aide d'une loi de mélange [MOU 10], comprenant, dans le cas d'un matériau quasi-fragile, l'évolution des taux de restitution d'énergie en modes I et II ($G_I(a)$ et $G_{II}(a)$) au cours de la propagation de fissure ainsi que les courbes-R en modes I et II purs ($G_{R_I}(a)$ et $G_{R_{II}}(a)$) (Equation 2).

$$\left(\frac{G_I(a)}{G_{R_I}(a)} \right)^p + \left(\frac{G_{II}(a)}{G_{R_{II}}(a)} \right)^q = 1 \quad [2]$$

2.3. Renforcement

Afin de transmettre des efforts supplémentaires et d'éviter la propagation de fissure au niveau de ces zones de faiblesse, il est possible de renforcer localement les poutres entaillées [COU 02]. A l'heure actuelle, il n'existe pas de méthode de dimensionnement des poutres entaillées renforcées. Cependant, lors du WCTE 2016 [DIE 16], de nouvelles recommandations basées sur les travaux de Blass et Bejtka [BLA 04] et l'expression (Equation 3) qui ne considère que le renforcement par vis, ont été proposées.

$$V_{ult,renf} = \frac{F_{ax,Rk}}{1.3 \left[3 \left(1 - \frac{h_{ef}}{h} \right)^2 - 2 \left(1 - \frac{h_{ef}}{h} \right)^3 \right]} \quad [3]$$

Cette expression considère uniquement la résistance, perpendiculaire au fil du bois, des vis ($F_{ax,Rk}$) et la hauteur d'épaulement (h_{ef}) ; la résistance du bois est négligée. De plus, ces recommandations considèrent que les renforcements permettent de retarder l'initiation de fissure, alors que des études [COU 02], [JOC 14] ont montré que l'initiation de fissure apparaît dans les poutres renforcées pour le même niveau de charge que dans les poutres non-renforcées. Ces études ont également montré que les renforts subissaient des efforts de cisaillement non négligeables. L'étude de Jockwer [JOC 14] a également permis de mettre en évidence le scénario de ruine par fendage dans les poutres renforcées, actuellement négligé par les méthodes de dimensionnement.

Un scénario de ruine, celui du fendage, est donc complètement ignoré par les méthodes de dimensionnement actuelles dans le cas des poutres entaillées renforcées. De plus, lors du projet COLORETIM [COU 02], il a été démontré que la résistance des éléments renforcés dépendait de la résistance du bois et de celle du système de renforcement, mais également que ce dernier reprend une charge verticale (F_v), ainsi qu'une charge horizontale (F_h), contrairement à ce qui est considéré dans l'équation 5. Une autre étude plus récente [JOC 14], considère le scénario de ruine par fendage des poutres renforcées ; dans ce cas, leur capacité portante est limitée par la résistance à la propagation de fissure en mode mixte du bois. Numériquement, Jockwer constate que le renforcement des poutres a pour effet de faire bifurquer la propagation de fissure du mode I vers le mode II (Figure 5). Cette observation va dans le sens de celles faites par Coureau [COU 02], qui relève une augmentation des efforts de cisaillement au sein des renforts à mesure que la fissure se propage. Le mode II de propagation consomme bien plus d'énergie que le mode I, ce qui peut expliquer que malgré une ruine de même nature la résistance ultime des poutres renforcées soit supérieure à celle des poutres sans renfort.

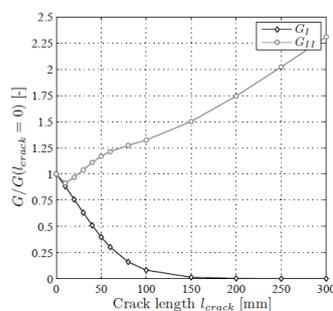


Figure 5. Simulation numérique qui montre l'impact du système de renforcement sur la répartition des modes de rupture dans le cas des poutres entaillées renforcées [JOC 14]

3. Principe modèle numérique

Comme on a pu le voir dans l'état de l'art, il est nécessaire de décrire précisément l'interaction entre le système de renforcement et les mécanismes de propagation de fissure pour proposer une méthode de dimensionnement des poutres entaillées renforcées pertinente.

L'objectif de cette étude est de proposer une méthode de prédiction détaillée mais exploitable par des bureaux d'étude. Certaines hypothèses sont donc prises pour aller dans ce sens. Ainsi, afin de se limiter à un problème 2D, on considère en première approximation un front de fissure uniforme dans l'épaisseur de la poutre. On ne considère alors plus que les modes I et II de propagation. En utilisant les courbes-R en modes I et II purs, il est alors possible, à partir d'une loi de mélange énergétique (Equation 2), de déterminer la résistance à la propagation de fissure des composants étudiés en fonction de la longueur de fissure équivalente $G_R^*(a)$. Celle-ci correspond à la courbe-R critique de l'élément considéré, qui permet de déterminer, à l'aide de la variation de complaisance ($\lambda'(a)$), la valeur de la charge critique de propagation en fonction de la longueur de fissure ($P_c(a)$) (Equation 4).

$$P_c(a) = \sqrt{\frac{2bG_R^*(a)}{\lambda'(a)}} \quad [4]$$

Afin de déterminer cette courbe-R, il est cependant nécessaire de déterminer le ratio de mixité en fonction de la longueur de fissure (a). Pour cela on utilise un modèle éléments finis, qui permet de découpler, à l'aide de la *Virtual Crack Closure Technique* (VCCT) [KRU 04], la part de chacun des modes dans les mécanismes de

propagation de fissure. Cette méthode offre une prédiction de la résistance des poutres qui considère à la fois la quasi-fragilité du matériau et la propagation en mode mixte.

Le modèle développé permet d'identifier l'effet de chacune de ces considérations sur la résistance ultime des poutres entaillées sans renfort (Figure 6). Ainsi, dans un premier temps, on observe qu'une approche par éléments finis offre une prédiction inférieure de 14% à celle proposée par l'expression de Gustafsson. Ceci est dû à une meilleure prise en compte des conditions limites appliquées à la poutre par les éléments finis. On remarque également qu'une approche quasi-fragile offre une prédiction plus sécuritaire qu'une approche purement fragile (d'environ 14% dans l'exemple présenté ici). Ceci s'explique par un endommagement qui intervient pour une énergie plus faible que dans le cas d'un matériau purement fragile (Figure 3). La considération d'une propagation de fissure en mode mixte va quant à elle permettre de prendre en compte une plus grande diversité de géométries d'entaille. En effet, comme on peut le voir sur la Figure 6 (b), la hauteur d'épaulement ($\alpha \cdot h$) influence fortement le ratio de mixité des mécanismes de propagation de fissure. Considérer uniquement le mode I peut donc entraîner une sous-estimation très importante de la résistance des poutres. Le modèle développé, par la prise en compte de la quasi-fragilité et de la propagation en mode mixte, offre une prédiction bien plus complète que l'expression de Gustafsson.

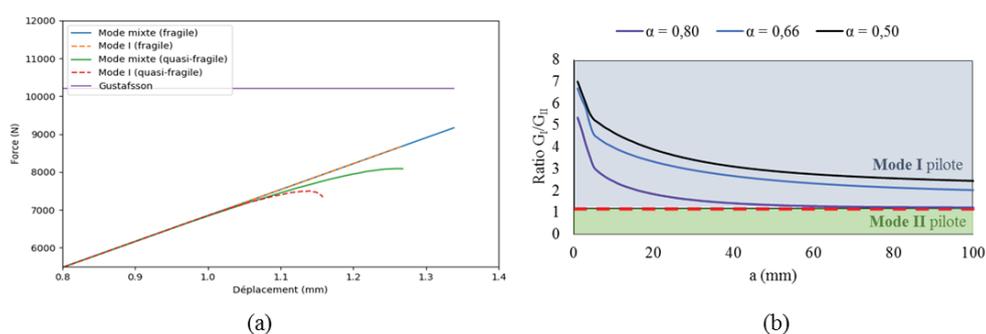


Figure 6. (a) : comparaison de courbes force/déplacement prédictives obtenues à l'aide du modèle proposé, selon différentes considérations des mécanismes de propagation de fissure (mixité des modes, quasi-fragilité), (b) : évolution du ratio de mixité (G_I/G_{II}) en fonction de la longueur de fissure pour différentes hauteurs d'épaulement ($\alpha \cdot h$)

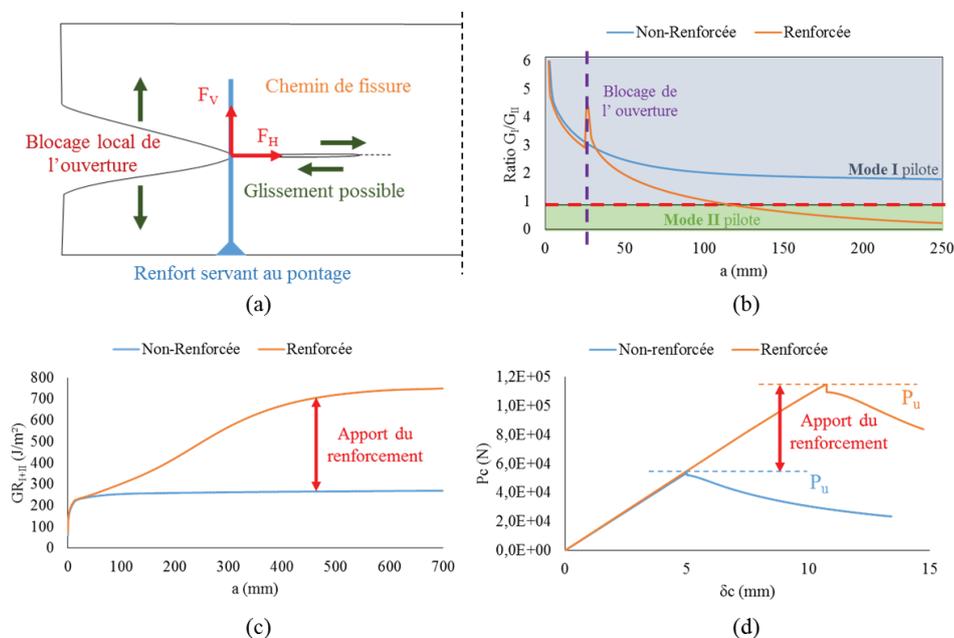


Figure 7. (a) : illustration du principe de frettage d'une fissure ; (b) : évolution du ratio de mixité (G_I/G_{II}) en fonction de la longueur de fissure entre une poutre renforcée et une poutre non-renforcée ; (c) : apport du renforcement en résistance à la propagation de fissure ; (d) : apport du renforcement en résistance ultime

Dans le cas des poutres renforcées, le frettage bloque localement l'ouverture des lèvres de la fissure, mais n'empêche pas complètement le glissement entre la partie supérieure et inférieure de la poutre (Figure 7 (a)). L'effet du système de renforcement peut alors être modélisé dans un premier temps par une liaison parfaite des deux nœuds en vis-à-vis de chaque côté des lèvres de la fissure au niveau de l'axe du frettage. On observe ainsi la même bifurcation des modes de propagation de fissure que Jockwer [JOC 14] (Figure 7 (b)). Cette bifurcation est à l'origine d'un gain en résistance à la propagation de fissure que l'on peut observer sur la courbe-R critique associée (Figure 7 (c)) et se traduit par un gain en résistance ultime de la poutre (Figure 7 (d)).

4. Comparaison Modèle/Expérience

4.1. Campagne expérimentale

Suite au développement de ce modèle, trois campagnes expérimentales à différentes échelles ont été menées sur des poutres avec et sans renfort. Dans cet article, seule la campagne expérimentale de « grandes dimensions » est présentée. Celle-ci a pour objectif d'étudier l'effet de la hauteur d'épaulement ($a.h$) et du système de renforcement sur les mécanismes de propagation de fissure.

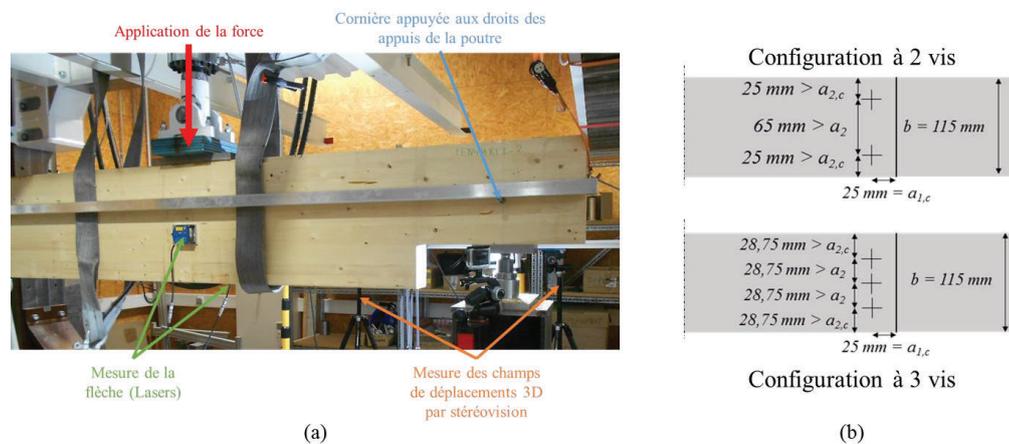


Figure 8. (a): photo du montage expérimental ; (b): configurations de renforcement testées (vue de dessus)

Les poutres testées ont une hauteur pleine de 490 mm, une longueur totale de 4000 mm et une largeur de 115 mm ; le bois utilisé est du lamellé-collé de classe GL24h. Les essais sont réalisés en déplacement imposé sur un banc de structure d'une capacité maximale de 250 kN, avec une cellule de force d'une précision de 0,5% de la charge appliquée. La mesure de la flèche sous l'application de la force s'effectue de façon à assurer que la mesure de la variation de la complaisance ne soit pas perturbée par l'indentation et la réponse élastique au niveau des appuis (Figure 8 (a)). La précision des lasers utilisés pour la mesure est de 50 μ m. De plus, une mesure par stéréovision des champs de déformations au niveau du fond d'entaille est réalisée afin de mettre en évidence l'impact des renforts sur les mécanismes de fissuration. Les poutres sont renforcées à l'aide de vis SFS WR-T-9X350 ; les configurations utilisées sont présentées sur la Figure 8 (b).

4.2. Comparaison avec le modèle

Cette partie a pour objectif de comparer la pertinence des méthodes de dimensionnement des poutres entaillées avec et sans renforts, actuellement proposées dans la littérature, au modèle numérique présenté dans cette étude. Dans le cas des poutres non-renforcées, le modèle est comparé avec l'expression de Gustafsson, tandis que dans le cas des poutres renforcées il est comparé avec l'expression de Blass. Pour réaliser ces comparaisons, on utilise des ratios établis sur l'effort tranchant ultime pour chacune des méthodes (Equation 5).

$$R = \frac{V_{\text{expérimental}}}{V_{\text{prédiction}}} \quad [5]$$

Lorsque l'on compare les ratios entre le modèle développé et l'expression de Gustafsson (Figure 9 (a)), on peut différencier très nettement les poutres ayant un α de 0,66 de celles ayant un α de 0,80, et en déduire que l'approche de Gustafsson est plus sécuritaire pour une hauteur d'épaulement importante. Ces observations montrent bien que la fiabilité du modèle proposé est moins dépendante de la géométrie de l'entaille que l'expression de Gustafsson. En effet, cette dernière considère uniquement le mode I de propagation. Or, comme on a pu le voir précédemment, la hauteur d'épaulement ($\alpha.h$) influence fortement le ratio de mixité des modes de propagation, car plus celle-ci augmente, plus la part du mode II augmente. La résistance à la propagation du bois étant plus faible en mode I qu'en mode II, la pertinence de l'expression de Gustafsson est donc très dépendante de la hauteur d'épaulement des poutres considérées, contrairement au modèle proposé qui considère la mixité des modes de propagation.

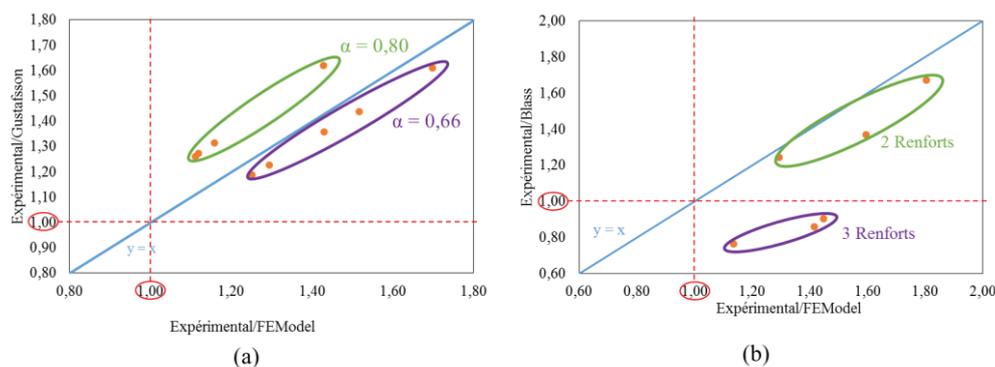


Figure 9. Graphiques représentant les ratios de pertinence du modèle développé en fonction des ratios de pertinence de l'expression de Gustafsson pour les poutres non-renforcées (a), et de Blass pour les poutres renforcées (b)

Comme pour les poutres non-renforcées, on compare les ratios entre ces deux méthodes (Figure 9 (b)). On différencie alors clairement les poutres avec 3 renforts des poutres avec 2 renforts, et l'on constate que l'approche de Blass fournit une prédiction non sécuritaire dans le cas des poutres avec 3 renforts (avec un ratio inférieur à 1). Ceci s'explique par la non prise en compte du scénario de ruine rencontré expérimentalement. En effet, Blass considère uniquement une rupture au niveau du système de renforcement, sans considérer la ruine par fendage du bois. Or c'est cette dernière qui est à l'origine de la ruine de l'ensemble des poutres testées. Dans ce cas, la résistance des poutres testées est indépendante du nombre de renforts utilisés. Contrairement à l'expression de Blass, le modèle numérique permet de dimensionner les poutres en considérant le scénario de fendage du bois, c'est pourquoi on identifie très clairement les deux catégories de poutres sur le graphique.

5. Conclusion

L'objectif de cette étude est de proposer un dimensionnement des poutres entaillées avec et sans renfort qui tienne compte des mécanismes de propagation de fissure et de leur interaction avec le système de renforcement. Le modèle proposé, en considérant la quasi-fragilité du matériau et la mixité des modes de propagation se montre plus détaillé que les méthodes de dimensionnement actuelles, et permet en outre de considérer, dans le cas des poutres renforcées, un scénario jusqu'ici négligé et pourtant constaté expérimentalement. Tenant compte de nombreux mécanismes intervenant dans le fendage des poutres entaillées, il peut servir de base pour évaluer la pertinence des méthodes de dimensionnement de ce type de poutres.

Dans le cas des poutres renforcées, le dimensionnement de la résistance ultime d'une poutre ($V_{ult,renf}$) peut alors s'effectuer en considérant la résistance ultime du bois ($V_{0,renf}^u$), qui correspond à la résistance au fendage, ainsi que la résistance ultime du système de renforcement (V_{renf}) (Equation 6).

$$V_{ult,renf} = \min \begin{cases} V_{0,renf}^u \\ V_{renf} \end{cases} \quad [6]$$

A l'heure actuelle, le modèle proposé ne prédit que la résistance au fendage du bois ; il est donc nécessaire de le coupler à des méthodes de dimensionnement qui considèrent la rupture du système de renforcement, comme

l'expression de Blass par exemple. Toutefois, il est envisageable à l'avenir d'avoir un modèle suffisamment complet pour tenir compte de l'ensemble des scénarios de ruine possibles.

6. Remerciements

L'auteur tiens à remercier l'Agence National de la Recherche (ANR) pour sa contribution, dans l'étude présentée ici, à travers le projet Xyloplate, Equipex XYLOFOREST (ANR-10-EQPX-16), le CODIFAB pour le financement des poutres testées, ainsi que SFS intec pour avoir fourni les vis de renforcement.

7. Bibliographie

- [BLA 04] Blass, H.J., Bejtka, I., 2004. "Reinforcements perpendicular to the grain using self-tapping screws", *The 8th World Conference on Timber Engineering*, Lahti, Finland.
- [CEN 04] CEN (Ed.), 2004. Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings.
- [COU 02] Coureau, J.-L., 2002. "Renforcement local d'éléments de structures bois par des matériaux composites", Thèse de doctorat, Bordeaux 1.
- [MOU 10] de Moura, M.F.S.F., Oliveira, J.M.Q., Morais, J.J.L., Xavier, J., 2010. "Mixed-mode I/II wood fracture characterization using the mixed-mode bending test". *Eng. Fract. Mech.* 77, 144–152.
- [DIE 16] Dietsch, P., 2016. "Reinforcement of timber structures - a new section for Eurocode 5". *World Conference on Timber Engineering*, Vienna
- [FOL 89] Foliente C. "Predicting strength of wood beams with tension end notches". PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg.
- [FRA 15] Franke, S., Franke, B., Harte, A.M., 2015. "Failure modes and reinforcement techniques for timber beams – State of the art". *Constr. Build. Mater.* 97, 2–13.
- [GRI 21] Griffith, A.A., 1921. VI. "The phenomena of rupture and flow in solids". *Phil Trans R Soc Lond A* 221, 163–198.
- [GUS 88] Gustafsson, P.J., 1988. "A study of strength of notched beams". *CIB-W18 Meeting 21*, Parksville, Canada.
- [JOC 14] Jockwer, R., 2014. "Structural behaviour of glued laminated timber beams with unreinforced and reinforced notches". PhD Thesis, ETH ZURICH, Zurich.
- [KRU 04] Krueger, R., 2004. "Virtual crack closure technique: History, approach, and applications". *Appl. Mech. Rev.* 57, 109–143.
- [MOR 05] Morel, S., Dourado, N., Valentin, G., 2005. "Wood: a quasibrittle material R-curve behavior and peak load evaluation". *Int. J. Fract.* 131, 385–400.
- [TOU 16] Toussaint E. et al. "Studying the mechanical behavior of notched wood beams using fullfield measurements". *Engineering Structures.* 113, 277-286.