

EFFET DE L'HUMIDITE SUR LA RESISTANCE A LA PROPAGATION D'UNE FISSURE DU MATERIAU BOIS

Reçu le 20/02/1999 – Accepté le 21/01/2001

Résumé

Si pendant très longtemps, le bois a été considéré comme un matériau d'utilisations traditionnelles (décoration et aménagement), il apparaît depuis peu de temps comme un matériau d'avenir dans de nouvelles techniques, en particulier l'industrie du lamellé-collé.

L'étude présentée ici, a pour but d'établir la résistance à la propagation brutale d'une fissure du matériau bois sous chargement imposé. Après avoir posé les bases de la mécanique de la rupture, le calcul de la ténacité du matériau bois utilisable en charpente à différents taux d'humidité et pour deux orientations de cernes sera développé sur une nouvelle géométrie d'éprouvette initialement envisagée pour l'étude des matériaux isotropes. Enfin, une comparaison entre le taux de restitution d'énergie critique G_C et l'intégrale de Rice J_C dans le domaine linéaire a été effectuée.

Mots clés : Bois, Sens RL, Sens TL, Humidité, Propagation de fissure, Mécanique de la rupture, Intégrale de Rice, Taux de restitution d'énergie.

Abstract

If wood was considered for long time as a material of traditional use only such a decoration, it has appeared during the last few years as a material of the future, to be used in new techniques, in particular the industry on bonded-plates.

The purpose of the present study is to establish the strength of the wood to the brutal propagation of a crack under imposed loads. After the establishment of the based of the fracture mechanics, the calculus of the tenacity of wood used at different degrees of humidity, and for two directions of the fibres will be developed with a new geometry of the specimen initially envisaged for the study of isotropic materials. Finally, a comparison between the rate of restitution of the critical energy G_C and the integral of Rice in the linear field, has been made.

Key words: Wood, RL direction, TL direction, Humidity, Crack propagation, Fracture mechanics, Integral of Rice, Rate of energy restitution.

M.M. KHENFER

M. LAMARA

S. AMARA

Institut de Génie Civil

Centre Universitaire de Laghouat

BP 376 Laghouat 03000 (Algérie)

ملخص

إذا كان الخشب، منذ القدم، يعتبر كمادة للاستعمال التقليدي (زخرفة)، فإنه منذ الأمد القريب أصبح كمادة تستعمل في التقنيات الحديثة خاصة الصفائح الملصقة و إنجاز المشاريع الفنية. كل هذا جعل من مادة الخشب تتسع استعمالاتها إلى تطبيقات أخرى.

في هذه الدراسة وبعد طرح مفاهيم الانهيار، حاولنا حساب صلابة مادة الخشب المستعملة في الهياكل المحفوظة في عدة حالات من الرطوبة و لتوجيهين للخطوط الجذعية (TL) و (RL). هذا الحساب يطبق على نموذج ذو هندسة جديدة و الذي كان في الأصل مستعمل في المواد المتجانسة كالحديد.

أخيرا حاولنا أن نقوم بالمقارنة بين معدل الارتداد الحرج للطاقة G_C و تكامل رايس J_C في المجال الخطي. **الكلمات المفتاحية:** خشب، توجه RL، توجه TL، رطوبة، انتشار التشقق، مفاهيم الانهيار، تكامل رايس، معدل الارتداد للطاقة.

L'éprouvette utilisée pour la détermination d'un critère de rupture dans le bois (pin maritime) est l'éprouvette ENS (Edge Notched Shear) car elle peut être utilisée en mode I et en mode II et que les études précédentes [1, 2] ont montré que dans le cas d'un matériau isotrope, la part du mode d'ouverture est négligeable. La ténacité du bois est très liée aux conditions expérimentales comme l'humidité et, par conséquent, on a essayé de déterminer un critère de rupture du matériau bois à différents taux d'humidité et pour différentes orientations.

On a aussi essayé de faire une comparaison entre le taux de restitution d'énergie critique G_C et l'intégrale de Rice J_C dans le domaine linéaire; c'est le cas où le bois est élastiquement linéaire.

METHODES D'ESSAIS

Mode de propagation

En mécanique de la rupture, on distingue l'orientation du prélèvement des échantillons testés avec deux lettres. La première désigne la normale au plan de l'entaille, la deuxième désigne la normale au front de l'entaille dans le plan de celle-ci. Par exemple, une éprouvette prélevée dans le sens RL indique que le plan de l'entaille mécanique est perpendiculaire à la direction radiale et la normale au front de l'entaille est la direction longitudinale. Il existe donc six modes principaux de propagation de fissure dans le matériau bois. Dans cette étude, nous nous limiterons aux deux directions: direction RL et direction TL (Fig. 1).

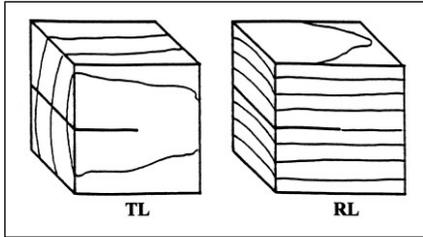


Figure 1: Modes de propagation des fissures étudiés.

Choix de l'éprouvette

Un grand nombre de géométries d'éprouvettes sont exposées dans la littérature. Il est nécessaire de distinguer les éprouvettes de modes purs (Mode I et Mode II) et les éprouvettes qui permettent l'étude du mode mixte (Mode I+II). Richard [1,2] a développé une géométrie d'éprouvette E.N.S (Edge Notched Shear) permettant l'étude du mode mixte sur un matériau isotrope. L'étude de cette éprouvette montre que, dans le cas du matériau isotrope, la part du mode d'ouverture est négligeable. Au laboratoire de Génie Civil de l'université de Bordeaux, nous avons essayé d'adapter cette éprouvette normalisée (Fig.2), de dimensions 150×88×18mm, à l'étude du mode d'ouverture sur le matériau bois. Les entailles sont réalisées à la scie à ruban. La largeur de celles-ci est de l'ordre de 1.5 mm; elles sont prolongées sur 5 mm au "cutter", ce qui assure au fond d'entaille un rayon de courbure suffisamment faible.

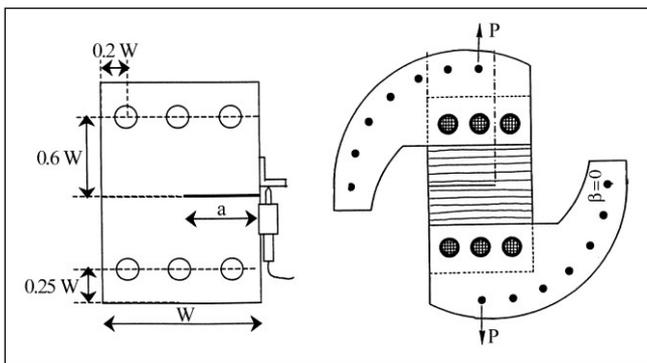


Figure 2: Géométrie et dispositif de mise en charge de l'éprouvette ENS.

Système de chargement

Les deux parties du système de mise en charge (Fig. 2) ont été débité dans un disque unique d'acier. Ceci permettra une grande précision sur la disposition des trous de chargement. Un dégagement suffisant a été usiné dans chaque partie du montage pour permettre le passage de l'éprouvette et assurer une rigidité maximale. Deux contrepoids se sont avérés indispensables pour maintenir l'ensemble en équilibre et ne pas imposer une précharge à l'éprouvette. Les trous oblongs assurent de bonnes conditions de chargement. La mesure du déplacement d'ouverture en mode I est assurée par un capteur inductif positionné à l'extrémité de l'éprouvette. Ce système de chargement permettra, par la suite, d'étudier le mode II ainsi que le mode mixte (mode I + II).

Contrôle de l'humidité

L'éprouvette ENS est étudiée à différents taux d'humidité. Il est donc nécessaire de contrôler ce paramètre tant dans le conditionnement des éprouvettes qu'au cours de l'essai. Les éprouvettes étudiées à un taux d'humidité différent de celui obtenu en atmosphère ambiante sont, avant perçage de trous de chargement et usinage de l'entaille, placées dans une enceinte climatique SAPRATIN à humidité relative et température contrôlées jusqu'à stabilisation de leur poids. Les pourcentages d'humidité absolue correspondant à chaque état d'humidité sont présentés dans le tableau 1.

Etat du matériau	Taux d'humidité en (%)
Bois desséché	5 ± 1
Bois commercialement sec	12 ± 1
Bois Humide	22 ± 1
Bois saturé en eau	96 ± 1

Tableau 1: Taux d'humidité correspondant à différents états du matériau.

Les éprouvettes ainsi stabilisées sont alors terminées (trous et entaille), ensuite remises dans l'enceinte climatique afin de bien uniformiser l'humidité en fond d'entaille.

Au cours de l'essai, un caisson en Plexiglas, monté sur la machine de traction et reliée à l'enceinte climatique, permet d'avoir une atmosphère contrôlée. Un système de renouvellement par ventilation maintient une circulation de l'air provenant de l'enceinte climatique au moyen des gaines souples.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Intégrale de Rice J_c

Les valeurs critiques de l'intégrale de Rice J_c peuvent être adoptées comme critère de rupture, car il est indépendant du contour choisi [3] et de la géométrie de l'éprouvette [4]. Par conséquent, Il se présente comme un moyen commode d'étendre le concept de la mécanique de la rupture élastique linéaire [5] au cas des matériaux, qui soient pour des raisons métallurgiques, hygroscopiques (comme le cas du bois) et pour des raisons de dimensions de l'éprouvette présentent une grande déformation plastique au fond de l'entaille. Rice [6] définit une intégrale J indépendante du contour d'intégration.

$$J = \int W dx_2 - \vec{T} \frac{\partial u}{\partial X_1} dS \quad (1)$$

W : Energie de déformation,

T : Vecteur de contrainte,

u : Vecteur déplacement.

Considérons la courbe de chargement d'un corps fissuré, P est la charge appliquée et δ le déplacement, on a:

$$J = \left(\frac{\partial U}{\partial a} \right)_P = - \left(\frac{\partial U}{\partial a} \right) \quad (2)$$

U : travail des forces extérieures.

Soit :
$$U = \int_0^{\delta} P d\delta = P\delta - \int_0^P \delta dP \quad (3)$$

Il vient donc :
$$J = \int_0^{\delta} \left(\frac{\partial P}{\partial a} \right) d\delta = \int_0^P \left(\frac{\partial \delta}{\partial a} \right) dP \quad (4)$$

En décomposant le déplacement en deux parties :

$$\delta = \delta_{\text{élastique}} + \delta_{\text{non élastique}} \quad (5)$$

on aboutit à la relation générale :

$$J = G + \int_0^P \left(\frac{\delta_{\text{nel}}}{\partial a} \right) dP \quad (6)$$

J et G sont égaux pour un matériau élastique fragile. On voit donc que G_C n'a pas une signification rigoureuse pour un matériau non élastique linéaire. Le procédé expérimental [7] de détermination de J est le suivant (Fig.3):

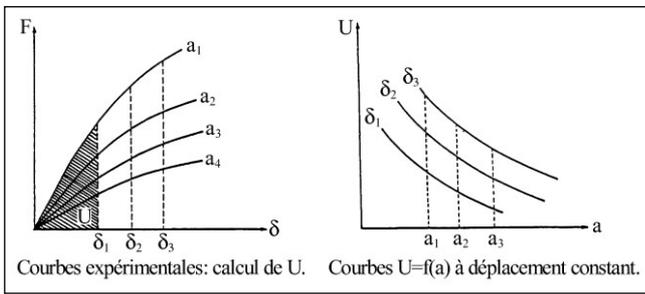


Figure 3: Technique expérimentale de calcul de J .

1- Obtention des courbes ($P - \delta$) pour plusieurs éprouvettes identiques mais de longueurs de fissures différentes ($a_1, a_2, a_3, a_4, \dots$).

2- On détermine l'énergie de déformation U (aire sous la courbe force-déplacement) pour chaque longueur de fissures et plusieurs déplacements δ_i .

3- Les courbes $U = f(a)$ correspondant aux déplacements choisis $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ permettent de calculer la valeur de J qui est déterminée par l'inverse de la pente de ces courbes $U = f(a)$ pour la longueur de fissure choisie. L'énergie U est normalisée par division par la largeur B de l'éprouvette. Le calcul de la pente pour le déplacement critique δ_c donne la valeur critique de l'intégrale de Rice J_c .

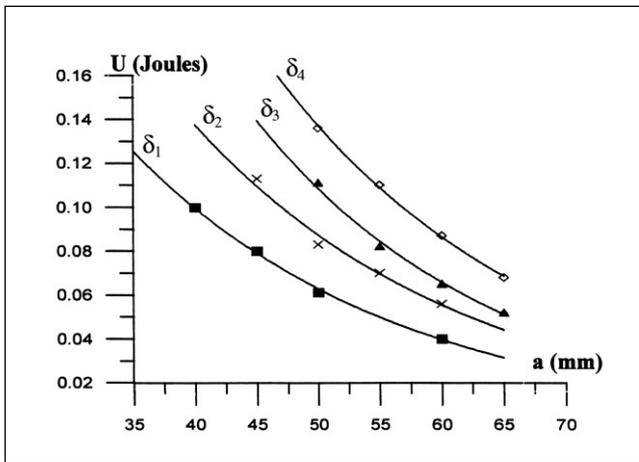


Figure 4: variation de l'énergie de déformation U en fonction de la longueur de l'entaille et pour différents déplacements constants.

La figure 4 montre l'évolution de l'énergie U en fonction de la longueur de l'entaille pour l'éprouvette ENS sollicitée en mode I.

Un lissage de type puissance a donné de bons résultats. La forme de la courbe expérimentale $U = f(a)$ pour δ constant suggère une relation de la forme:

$$\frac{U}{\delta_{\text{const}}} = A.a^\alpha \quad (7)$$

A et α sont des constantes qui peuvent être déterminées pour chaque valeur de δ .

Détermination de la ténacité à différentes humidités

La détermination de l'intégrale de Rice J est étudiée sur du bois à 5% et 22% de taux d'humidité et sur le bois saturé en eau. Cette étude est faite dans les directions RL et TL. La mesure de la valeur critique de l'intégrale de Rice J_c est faite par la méthode de la complaisance, selon la technique présentée par Begley et al [7], fondée sur le fait que, sous un déplacement imposé δ_c , J_c est égale à la variation de l'énergie de déformation élastique U par unité d'épaisseur B :

$$J_c = -\frac{1}{B} \cdot \frac{\partial U}{\partial a} \quad (8)$$

B : épaisseur de l'éprouvette.

Le tableau 2 donne les valeurs critiques de l'intégrale de Rice J_c dans les deux directions RL et TL et pour différents taux d'humidité ainsi que les écarts types.

Etat d'humidité du matériau	Bois desséché	Bois humide	Bois saturé
Sens RL	183 ± 36	242 ± 97	228 ± 48
Sens TL	227 ± 45	140 ± 32	112 ± 12

Tableau 2: Valeurs moyennes et écarts type de J_c dans les deux sens et pour différentes humidités.

Bois desséché

A cet état d'humidité, le bois se comporte comme un matériau élastique fragile. L'allure de la courbe force-déplacement est parfaitement linéaire. Les résultats en mode d'ouverture sont regroupés sur la figure 5.

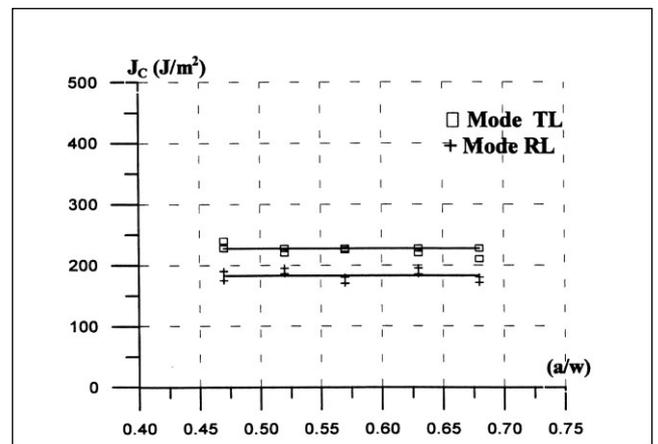


Figure 5: variation de J_c en fonction de a/w .

Aussi bien dans le sens RL que TL (Fig. 5), la valeur critique J_C de l'intégrale de Rice peut être considérée globalement comme indépendante de la longueur d'entaille. Ainsi, il paraît être une caractéristique du matériau. De plus, la rupture dans le sens TL nécessite une plus grande consommation d'énergie que la rupture dans le sens RL.

Bois humide

En augmentant l'humidité dans le bois, la mécanique de la rupture élastique linéaire n'est plus applicable car la courbe force-déplacement dans ces conditions n'est plus linéaire.

Dans le cas de la rupture non linéaire, la force de rupture est déterminée en prenant l'intersection [8] de la courbe force-déplacement avec la droite de pente inférieure à 5% à la pente de la droite AB, portion linéaire de la courbe de charge. (Ce chiffre de 5% correspond dans la norme AFNOR des aciers à une zone plastique égale à 2% de la longueur initiale de la fissure). La force de rupture f_c est déterminée en établissant un logiciel qui permet pour chaque valeur δ_i du déplacement, de calculer la valeur $0.95 \cdot A \cdot \delta_i$ et la comparée à f_{ci} jusqu'à la $n^{ème}$ valeur. Dans tous les cas, on a trouvé que:

$$\left| \frac{0.95 A \cdot \delta_i}{f_{ci}} \right| \leq 1\% \quad (9)$$

avec A la pente de la courbe force-déplacement.

Pour cet état d'humidité, Les résultats de valeurs de l'intégrale de Rice donnent des courbes analogues à celui de l'état d'humidité précédent et la valeur critique de l'intégrale de Rice est constante avec la longueur de l'entaille (Fig.6). Contrairement au bois desséché, on remarque que la rupture dans le sens RL est une plus grande consommation d'énergie que la rupture dans le sens TL. Ceci s'explique par le fait que dans le sens TL (Fig.1), et quand le bois s'humidifie, les cernes ne s'opposent plus comme dans le premier cas à la propagation de la fissure.

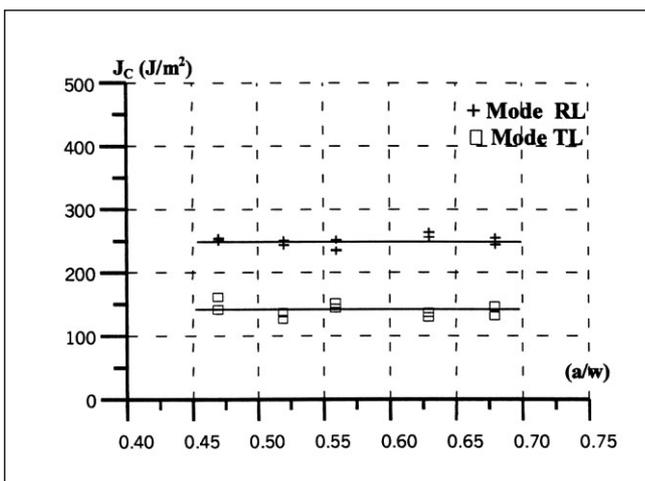


Figure 6: variation de J_c en fonction de a/w .

Bois saturé

On a imprégné les éprouvettes dans l'eau jusqu'à saturation. Les variations de J_C en fonction de la longueur

de l'entaille sont présentées sur la figure 7.

A cet état d'humidité, on remarque, aussi, que la rupture dans le sens RL nécessite plus d'énergie que dans le sens TL avec une baisse de la ténacité par rapport aux différents états d'humidité étudiés précédemment.

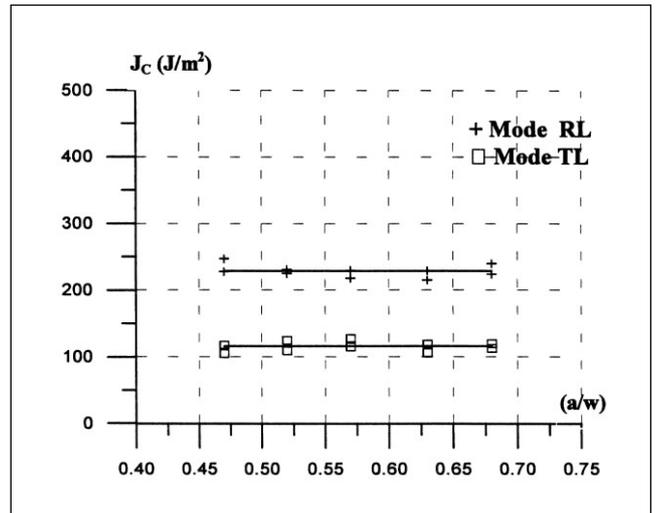


Figure 7: variation de J_c en fonction de a/w .

Variation de J_C en fonction de l'humidité

Les variations de l'intégrale critique de Rice, en fonction de l'humidité et pour les deux directions, sont représentées sur la figure 8. Les valeurs de J_C du bois commercialement sec (humidité=12%) sont prises de la bibliographie [9].

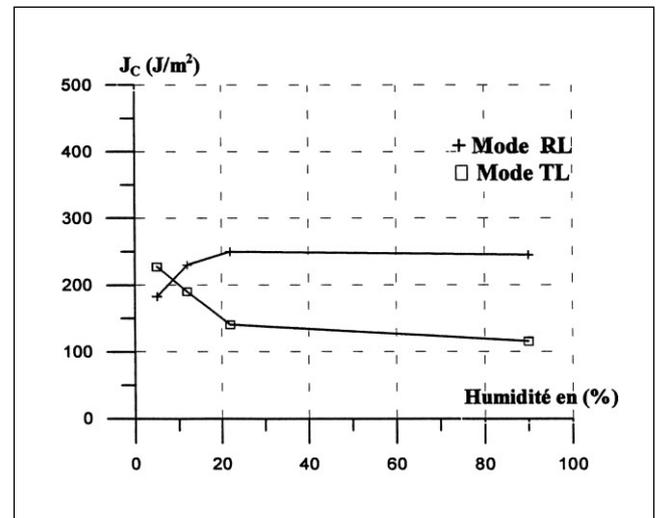


Figure 8: variations de J_c en fonction de l'humidité dans le bois.

Pour le mode RL, on constate une augmentation de la ténacité jusqu'à une humidité de l'ordre de 22%, ensuite devient constante. Cette constatation est en accord avec nos études de l'effet de l'humidité sur la résistance à la fissuration des bétons et plâtres renforcés de fibres de cellulose [10, 11]. Par contre, dans le cas du mode TL, la ténacité varie inversement avec l'état d'humidité dans le

matériau. Ceci s'explique par le fait que plus le matériau devient humide, les cernes ne résistent plus à la propagation de la fissure.

COMPARAISON DES VALEURS CRITIQUES DE L'INTEGRALE DE RICE J_c ET DU TAUX CRITIQUE DE RESTITUTION D'ÉNERGIE G_c

Théorie de Griffith

Griffith a abordé le problème de la rupture des corps fissurés du point de vue énergétique.

Soit un solide élastique avec une fissure de surface S . Lorsque la fissure se propage, la géométrie de celle-ci change et l'aire augmente de dS . Le premier principe de la thermodynamique [12] appliqué à un milieu fissuré en milieu élastique linéaire sans échange thermique stipule la conservation de l'énergie totale de la structure et qui s'écrit:

$$dW_{tot} = dW_e + dW_p + dW_s + dW_{cin} = 0 \quad (10)$$

dW_e = variation de l'énergie élastique;

dW_p = variation de l'énergie potentielle;

dW_s = l'énergie dissipée et qui peut s'écrire de la forme $2\gamma dS$;

dW_{cin} = variation de l'énergie cinétique.

Juste avant la propagation de la fissure, on a un état d'équilibre avec un système de sollicitation extérieure et une fissure de surface S . Peut-on produire, en augmentant la surface de la fissure, un mouvement du système sans modification des sollicitations extérieures? C'est la question de l'initiation de propagation ou plus exactement l'amorçage de la fissure. Lorsque la propagation est en cours, on se pose la question importante de la stabilité au sens classique. La fissure se propage si l'énergie cinétique augmente (c'est-à-dire que $dW_{cin} > 0$) et alors:

$$\frac{\partial}{\partial S} [W_{ela} + W_{ext}] + 2\gamma \leq 0 \quad (11)$$

On pose la définition du paramètre G , qui est appelé taux de restitution d'énergie.

$$G = -\frac{\partial}{\partial S} [W_{elas} + W_{ext}] \quad (12)$$

Le critère de propagation de Griffith se traduit par $G = 2\gamma$. L'initiation de propagation de fissure est possible lorsque $G = 2\gamma$.

Lorsque $G > 2\gamma$, une partie de l'énergie disponible sert précisément à rompre les liaisons, c'est l'énergie de séparation. L'excès d'énergie $(G - 2\gamma)dS$ est transformé en énergie cinétique qui pourrait à son tour, s'il n'y avait pas d'autres apports d'énergie extérieure, se dissiper dans la séparation de surfaces nouvelles. On remarque que ce processus mène à la propagation instable. Si au contraire les sollicitations extérieures sont telles qu'à tout moment, on a l'égalité $G = 2\gamma$, alors il n'y aura pas d'accroissement d'énergie cinétique et la rupture est dite contrôlée. Dans ce cas, c'est une croissance stable de la fissure.

Expression de G

On a: $W = \frac{1}{2} P.Z$, Z étant proportionnel à la charge P .

$Z = C(a).P$ où C caractérise la rigidité du corps fissuré; c'est ce qu'on appelle la complaisance. Elle dépend de la longueur d'entaille. On a alors:

$$W_{elas} = \frac{1}{2} \frac{Z^2}{C(a)} \quad \text{et} \quad W_P = -Z.P = -C(a).P^2 \quad (13)$$

Lorsque la fissure croît de la quantité a à $(a + \Delta a)$, on obtient:

$$\partial W_e = \frac{1}{2} \frac{dC(a)}{da} P^2 \partial a \quad (14)$$

$$\partial W_P = -\frac{dC(a)}{da} P^2 \partial a \quad (P \text{ étant constante}) \quad (15)$$

$$\partial W_{tot} = -\frac{1}{2} \frac{dC(a)}{da} P^2 \partial a = \partial W_{ela} + \partial W_P = -\partial W_e = \frac{1}{2} W_P \quad (16)$$

$$G.\partial a = -[\partial W_{tot}] = \frac{1}{2} P^2 \frac{dC(a)}{da} \partial a \Rightarrow G = \frac{1}{2} P^2 \frac{dC(a)}{da} \quad (17)$$

Pour une épaisseur b , nous aurons:

$$G = \frac{1}{2b} P_C^2 \frac{dC(a)}{da} \quad (18)$$

P_C étant la force de rupture.

Calcul de la complaisance

Pour le calcul du taux de restitution d'énergie, la complaisance des éprouvettes testées apparaît par sa dérivée. Cette complaisance est relative au déplacement de la force appliquée à l'éprouvette. Elle est alors déterminée par le rapport $C = \Delta\delta/\Delta P$.

La figure 9 montre l'évolution de la complaisance en fonction de la longueur de l'entaille pour l'éprouvette ENS sollicitée en mode I.

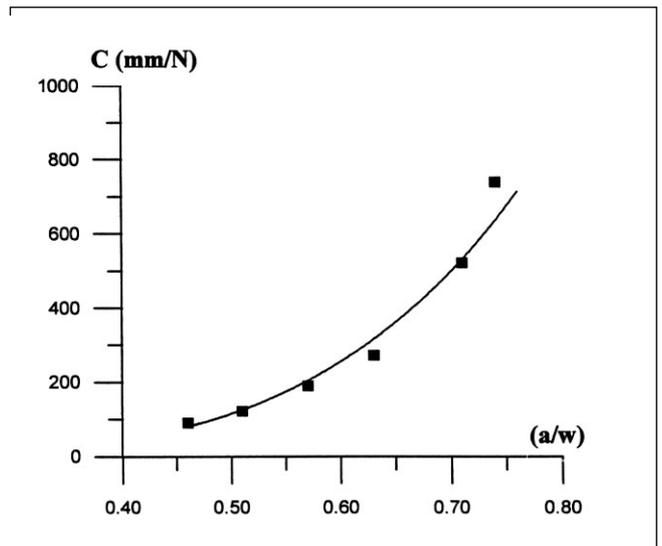


Figure 9: évolution de la complaisance en fonction de a/w .

Résultats expérimentaux

En mode I le taux de restitution d'énergie critique est calculé à partir de la relation:

$$G_C = \frac{(P^2)}{2b} \cdot \frac{\partial C(a)}{\partial a} \quad (19)$$

Les résultats en mode d'ouverture et pour les deux sens RL et TL sont présentés sur le tableau 3.

Bois desséché	G_C (J/m ²)	J_C (J/m ²)
Sens RL	167 ± 34	188 ± 36
Sens TL	240 ± 37	242 ± 65

Tableau 3: Comparaison des valeurs de G_C et de J_C .

On remarque que dans du bois desséché, (c'est-à-dire quand le matériau a un comportement élastique linéaire) et en tenant compte des écarts-types, la valeur du taux de restitution d'énergie critique G_C et de la valeur critique de l'intégrale de Rice J_C sont très proches. Ceci prouve que le travail provenant des déformations inélastiques est négligeable et, par conséquent, la déformation totale se limite seulement à la déformation élastique.

CONCLUSION

La détermination du taux de restitution d'énergie critique G_C ou du facteur d'intensité de contrainte K_C n'a pas de signification rigoureuse dans le cas du bois à humidité élevée qui se comporte comme un matériau non linéaire. Aussi, fait-on appel à la mécanique de la rupture élastique non-linéaire. Dans le cas du bois à humidité supérieure à 12%, bien que l'utilisation de l'intégrale de Rice soit délicate, elle reste toujours préférable à d'autres critères de rupture. Dans le cas du mode d'ouverture (mode I), on note une décroissance de la valeur critique de l'intégrale de Rice plus importante pour le mode de propagation TL que pour le mode de propagation RL. Dans le cas du bois desséché, c'est-à-dire lorsque le matériau est élastique linéaire, on trouve la valeur du taux de restitution

d'énergie critique G_C presque égal à celle de l'intégrale de Rice J_C lorsqu'on tient compte des écarts types de chaque valeur, ce qui est en concordance avec la théorie.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]- Richard H.A., "A new compact shear specimen", *Int. Jour. of Fracture*, Vol. 17, (1981), pp. 105-107.
- [2]- Richard H.A., "Examination of brittle fracture criteria for overlapping mode I and mode II loading applied to crack", *Application of fracture mechanics to materials and structures*, Freiburg, (1983), pp. 309-316.
- [3]- Hayes J.D., "Some applications of Elastic-Plastic Analysis of Fracture Mechanics", Ph.D. Dissertation, Imperial College, University of London (1970).
- [4]- Landes H.D. and Begley J.A., "The effect of specimen geometry on J_{IC} ", *Westinghouse Scientific Paper 71-IE-FM PWR-P6*, (1971).
- [5]- Bui M.D., "Mécanique de la rupture fragile", Editions Masson (1978).
- [6]- Rice J.R., "A path independent integral and the approximate of strain, concentration by notches and cracks", *Journal of applied mechanics*, Transactions ASME, 35, June (1968).
- [7]- Begley J.A., Landes J.D. and Wilson W.K., "An estimation model for the application of the J-integral", *Fracture analysis*, ASTM STP 560 (1974).
- [8]- Barthelemy B., "Notions pratique de la mécanique de la rupture", Editions Eyrolles (1980).
- [9]- Caumes P., "Rupture d'un matériau anisotropes en conditions polymodales (le bois)", Thèse de Doctorat ès-sciences de l'université de Bordeaux, France (1986).
- [10]- Khenfer M.M., Bali A. et Morlier P., "The effect of water and fibre length on the Fracture toughness of Cellulosic Fibre Cement", *Journal of Concrete Sciences Engineering*, Vol.2, (2000), pp. 56-62.
- [11]- Khenfer M.M. et Morlier P., "Plâtres renforcés de fibres de cellulose", *Journal of Materials and Structures*, vol. 32, (1999), pp. 52-56.
- [12]- Naman R., "Rupture par fissuration des structures", Edition Hermes (1995). □