

" Comportement mécanique du bois soumis au mode II d'endommagement en utilisant les critères d'énergie : Application sur le THUYA du Maroc et l'Eucalyptus Grandis"

" Amal Saoud"¹, "Abdelhamid Elamri"¹, "Khadija Kimakh"¹, "M'hamed Chergui"¹, " Mohsine Ziani"² " Moussa Elmatar "³

¹ " *University of Hassan II, National Superior School of Electricity and Mechanics Casablanca (ENSEM), LCCMMS, Morocco.*"

² " *Institut National des Sciences de l'Archéologie et du Patrimoine (INSAP)/Rabat, Morocco.*"

³ " *Centre Technique d'Industrie du Bois et d'Amenblement (CTIBA)/Casablanca, Morocco.*"

Résumé :

La résistance au cisaillement est l'une des propriétés souvent utilisée pour qualifier une essence de bois en vue de son exploitation dans l'industrie. Mais jusqu'à lors il n'y a pas d'essai normalisé qui permet de comprendre ce phénomène. Dans notre travail, nous avons adopté une nouvelle approche pour l'étude du comportement du matériau bois soumis au mode II d'endommagement, pour se faire nous avons conçu et réalisé un nouveau prototype d'éprouvette de bois que nous avons testé au sein de notre laboratoire où nous avons pu constater que la propagation de la fissure dans notre cas , est stable ce qui engendre une évaluation de la rupture jusqu'à séparation par un cisaillement de l'éprouvette dans l'unique plan longitudinal. Des séries de tests ont été réalisés sur deux essences à savoir le Thuya (*Tetraclinis Articulata* (Vahl) Masters) et l'Eucalyptus Grandis comme matériau d'essai pour obtenir l'enregistrement typique de la courbe charge déplacement, qui nous a permis de déterminer un paramètre jugé important dans la mécanique linéaire de la rupture(MLR) : Le taux de restitution d'énergie critique et cela en utilisant le critère d'IRWIN KIES ainsi que la méthode de la complaisance.

Mots clefs : *cisaillement, mode II d'endommagement, rupture.*

1. Introduction

Au début du XXI^{ème} siècle, où l'environnement requiert l'attention toute particulière des chercheurs quant au processus de transformation du bois s'est avéré le moins coûteux en termes d'énergie. L'étude du comportement mécanique du bois est alors en plein essor surtout après les recommandations faites suite aux conférences des parties de : (Kyoto, Rio, Paris et Marrakech). C'est pour cela que les engagements environnementaux des pays participants incitent d'avantage des travaux de recherche scientifiques sur le matériau bois pour une utilisation plus massive dans le cadre d'une exploitation forestière raisonnable.

L'étude de ce matériau hétérogène passe par la connaissance de son comportement face aux différentes sollicitations, tout en sachant que le bois en tant que matériau naturel contient beaucoup de défauts. L'application de la théorie de la mécanique de rupture qui est un moyen d'estimer la stabilité des fissures au voisinage immédiat des défauts est impérative, elle permet aussi de prévoir la longueur critique de propagation en fonction du chargement appliqué. En conséquence, elle est fondamentale pour fournir des mesures précises de certaines propriétés de rupture telles que les taux de restitution d'énergie en mode I, mode II, mode mixte I+ II et mode III.

Le mode I a été largement étudié par différents chercheurs en utilisant plusieurs types d'éprouvettes standards à savoir: compact tension (CT), single-edge notched tension (SENT), double-edge notched tension (DENT), single-edge notched three point bending (SENB) tests [1–6] et l'éprouvette DCB (Double Cantilever Beam). L'éprouvette DCB, son efficacité a été universellement acceptée grâce à sa simplicité de conception et de réalisation pour la mesure de la ténacité (GIC et KIC) par la théorie de poutre simple [7]. Son comportement face au cisaillement est l'un des phénomènes jusqu'à maintenant non maîtrisé, c'est pour cela que plusieurs prototypes ont été proposés pour approcher de près la nature de la rupture en mode II d'endommagement, les trois principaux essais sont basés sur la flexion : L'essai le plus communément utilisé est le End-Notched Flexure (ENF) : une éprouvette contenant un défaut artificiel sur l'un de ces côtés est chargée en flexion trois points. L'application de la charge est plutôt simple, la propagation de la fissure à partir de l'insert est instable sauf pour les longueurs d'entaille très importantes $a/L > 0,7$ [8]. Les études qui utilisent l'ENF se font avec un rapport a/L de 0,5 [9-11] la propagation est donc instable.

D'autres chercheurs utilisent End Loaded Split (ELS) [12]: le côté sain d'une éprouvette prismatique est encasté alors que le côté contenant le défaut artificiel est chargé dans la direction de l'épaisseur. Le chargement est généralement appliqué à l'éprouvette par l'intermédiaire d'un bloc de charge. L'essai ELS permet d'obtenir une propagation de fissure stable en mode II si la condition $a/L > 0,55$ est respectée [8]. Néanmoins, il nécessite un montage assez compliqué pour maintenir les conditions de l'encastrement glissant.

Enfin, on trouve l'éprouvette la plus récente 4 End-Notched Flexure (4ENF) : une éprouvette contenant un défaut artificiel sur un de ces côtés est chargée en flexion quatre points, ce prototype présente l'avantage d'être le plus stable, mais l'acquisition des résultats nécessite des équipements sophistiqués.

Dans ce document on présente un nouveau prototype d'essai facile à utiliser, stable et dans lequel on peut percevoir la rupture de l'éprouvette sous chargement en mode II.

2. Présentation de l'essai:

La partie expérimentale consiste à soumettre des éprouvettes plates entaillées de faible épaisseur, de différentes longueurs d'entailles à des essais de traction en mode II. Toutes les éprouvettes et le dispositif d'amarrage ont été conçus et réalisés par nos propres moyens.

1. Matériau d'essai

Le matériau utilisé est du Thuya du Maroc "Tectracanalis Articulata" et l'Eucalyptus Grandis. La première essence provient du plateau du moyen Atlas (région de Khemissat). Cet arbre a la faculté de développer de la loupe qui est excroissance qui se trouve au niveau du collet de l'arbre et se développant dans des conditions mal connues dont la présence n'est pas systématique. Au Maroc, le Thuya occupe une superficie totale d'environ 680 000 ha (soit l'équivalent de 11,7% de la surface totale couverte par la forêt marocaine) et joue un rôle socio-économique important dans le cadre de la satisfaction des besoins locaux des populations riveraines en matière de parcours, bois de chauffage et bois de service divers [13]. La deuxième essence est l'Eucalyptus Grandis, provenant de Sidi Yahia Gharb, cet arbre est différent du précédent puisque c'est un feuillu au contraire du Thuya qui est un résineux.

Ces arbres ne présentent ni défauts ni pourritures. En respectant les diverses dimensions en fonction des spécificités de l'essai, les éprouvettes, ont été réalisées à partir des billons de 25 mm d'épaisseur

obtenues du CRF (Centre de Recherches Forestières) ont été découpé selon le prototype élaboré, au sein Centre Technique des Industries du Bois et d'Ameublement CTIBA.

Pour mieux aborder le matériau, nous avons effectué des essais de caractérisation physique et mécanique :

Mesures physiques : La teneur en eau, les diverses densités et les retraits suivant les trois axes sont déterminés sur des éprouvettes cubiques de (20mm×20mm×20mm) respectivement selon les normes NF B 51- 004, NF B 51-005 et NF B 51-006.

Mesures mécaniques : Le module d'élasticité statique longitudinal E_l et la contrainte de rupture en flexion statique σ_{fs} sont déterminés à partir d'un essai de flexion 4 points en utilisant des éprouvettes prismatiques de 20mm x 20mm x 360mm taillées suivant les trois directions privilégiées du bois en respectant la norme NF B51-008. Nous avons réalisé des essais de compression pour déterminer la contrainte à la rupture σ_a en se soumettant à la norme NF B 51-007 et enfin des essais de cisaillement sur des éprouvettes dont les spécificités dimensionnelles sont détaillées dans la norme NF B 51-012 .

Le tableau 1 résume les principales caractéristiques physiques et mécaniques du Thuya et de l'Eucalyptus Grandis.

	d_H g/cm ³	d_0 g/cm ³	d_b g/cm ³	$R_v(\%)$	$R_T(\%)$	$R_R(\%)$	A	$E_l(MPa)$	σ_a (MPa)	σ_{fs} (MPa)	R_{Lc} (MPa)
Moyenne Thuya	0.68	0.63	0.6	4.98	2.9	1.83	0.64	7437	35	82.22	30
Ecart type	0.03	0.02	0.02	0.46	0.45	0.06	0.11	148.1	0.38	25.93	2.41
Moyenne Euc	0,58	0,53	0,5	15,54	8,95	5,90	0,67	1680	49,03	1215	914
Ecart type	0,11	0,12	0,11	2,61	1,53	1,34	0,14	267	0,50	30	60

Tableau1: Propriétés mécaniques et physiques du bois de Thuya et d'Eucalyptus Grandis

2. Prototype de l'éprouvette conçue

Les éprouvettes utilisées ont été confectionnées à partir des billons d'arbres Thuya et d'Eucalyptus Grandis .Ces éprouvettes sont destinées à un essai de rupture par mode II. Pour ce faire nous nous sommes basés sur les travaux antérieurs du phénomène ainsi que sur les dispositifs expérimentaux développés au sein de notre laboratoire, nous avons finis par élaborer le prototype d'éprouvette après avoir fait plusieurs tentatives et en s'inspirant des divers dispositifs on a choisi la géométrie présentée dans la figure 1 dont les caractéristiques dimensionnelles sont présentées dans le tableau 2

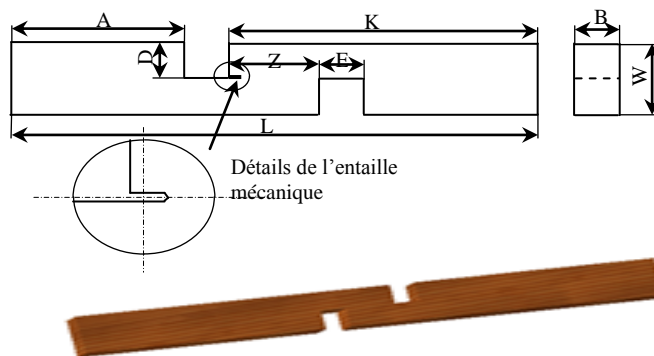


Figure 1 : Représentation de l'éprouvette d'essai

Symbole	Description	Dimensions (mm) précision de ±0.1mm.
W	Largeur de l'éprouvette	20
B	Epaisseur de l'éprouvette	10
E	La largeur de la rainure	10
D	La profondeur de la rainure	10
L	Longueur de l'éprouvette	234
Z	La zone d'endommagement	20
a	Longueur d'entaille	$0,2 \leq a \leq 0,6$
A	Zone d'amarrage	97
K	Zone d'amarrage	127

Tableau 2 : Les dimensions de l'éprouvette d'essai de rupture en mode II

3. Principe de l'essai

Emplacement de l'entaille et amorçage de la fissure.

La réalisation des entailles mécaniques est effectuée à l'aide d'une scie sauteuse. Un dispositif adéquat a été mis en place pour avoir une profondeur d'entaille précise et assurer un déplacement parallèle au plan de base de la rainure, les détails de cette entaille mécanique sont représentés sur la figure 2.

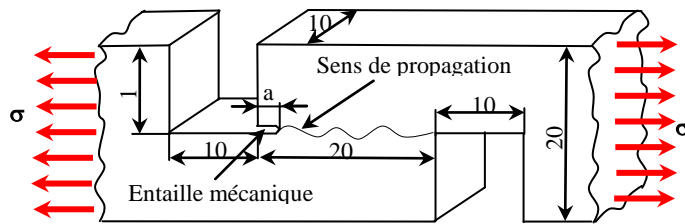


Figure 2 : Représentation des parties utiles de l'éprouvette d'essai

Cette opération a été reproduite sur les vingt-cinq éprouvettes usinées qu'on a ensuite placée dans une enceinte climatique à une température 10°C et 74% d'humidité jusqu'à stabilisation à 15%. Avant chaque essai, une lame de rasoir a été utilisée pour amorcer la fissure ainsi augmenter l'acuité de l'entaille mécanique, compatible à l'application des équations de la mécanique linéaire de la rupture. Les caractéristiques dimensionnelles sont données sur le tableau 2.

Déroulement des essais :

Nos éprouvettes ont été placées dans une machine universelle de type «MTS 810» qui permet la réalisation des essais de traction en déplacement contrôlé. Cette machine est équipée d'un ordinateur muni d'un logiciel de pilotage, qui donne les enregistrements de la variation de la charge appliquée en fonction de l'écartement des lèvres de la fissure pour chaque éprouvette en essai. Cette charge appliquée est mesurée grâce à la cellule de charge installée sur la traverse supérieure de la machine. Les enregistrements « charge-déplacement » sont visualisés sur un écran d'ordinateur puis stockés pour les analyser.

Les deux bouts de l'éprouvette sont ensuite introduits dans le dispositif d'amarrage puis pincée fortement par quatre vis Figure 3.

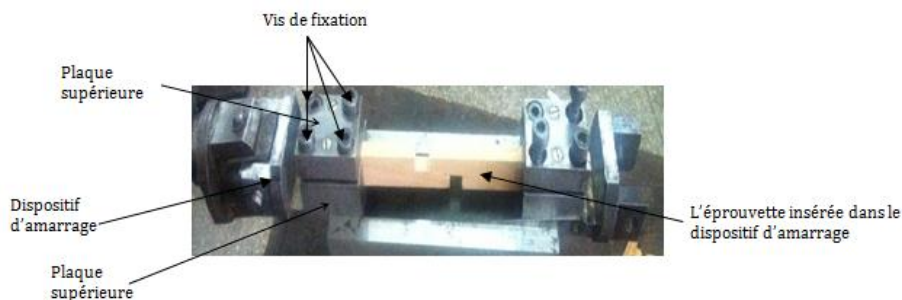


Figure 3 : Le dispositif d'amarrage

Le dispositif d'amarrage de ces éprouvettes plates est constitué de 2 chapes. Chacune de ces chapes est montée sur une liaison rotule, cette solution permet à chaque instant de la sollicitation d'assurer l'alignement entre l'axe de la traverse et celui du vérin. Ce dispositif est entièrement conçu et réalisé dans nos ateliers figure 3. Ensuite, l'ensemble a été placé dans la machine de traction présentée dans figure 4

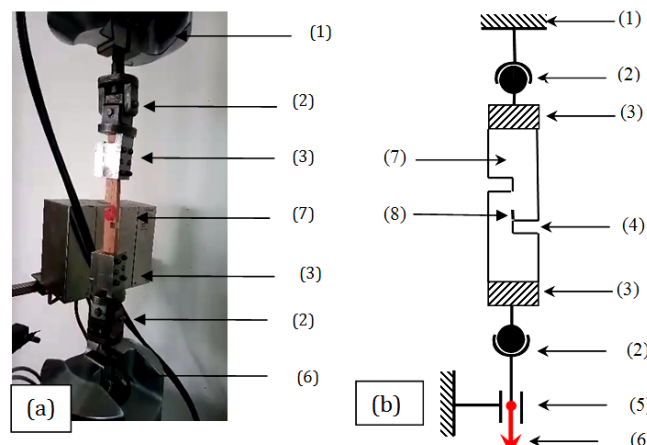


Figure 4 : (a) image de l'éprouvette d'essai montée dans le dispositif d'amarrage ; (b) le schéma cinématique de l'éprouvette montée dans le dispositif d'amarrage : (1) Traverse de la machine ; (2) liaison rotule ; (3) zone d'amarrage ; (4) Rainures ; (5) Liaison pivot ; (6) Direction du chargement et (7) L'éprouvette d'essai.

Cette machine nous a permis d'appliquer un effort de traction uni axiale parallèle au fil du bois sur une série de 25 éprouvettes de chaque essence avec une vitesse constante de 0,5mm /min. Cette sollicitation a permis la propagation de l'entaille jusqu'à a créé une surface de rupture par cisaillement.

En effet, l'essai est fondé sur le fait qu'on peut considérer que l'éprouvette est constituée de deux parties séparées par l'entaille. La partie supérieure encastree et l'autre inférieure chargée. Durant l'essai la partie inférieure se déplace par rapport à la supérieure ce qui engendre l'effet de cisaillement du matériau selon le plan contenant l'entaille.

4. Résultats et discussions

Nous présentons dans ce qui suit les résultats expérimentaux d'une d'essai réalisé dans les mêmes conditions.

1. Courbes force-déplacement :

Les figures 5 et 6 représentent respectivement l'enregistrement des courbes force/déplacement du Thuya et de l'eucalyptus Grandis :

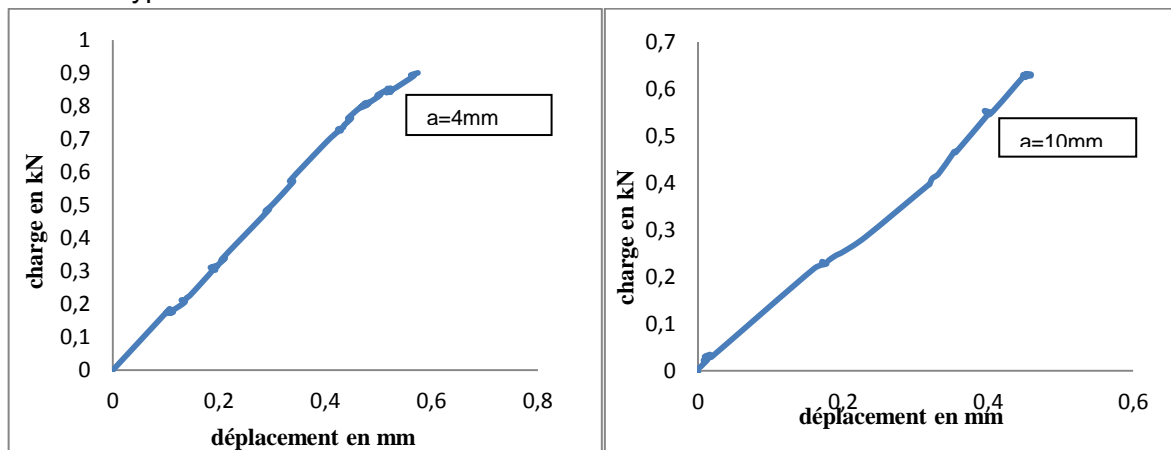


Figure 5: Courbes charge-déplacement pour $a=4\text{mm}$ et $a= 10\text{mm}$ du bois de THUYA

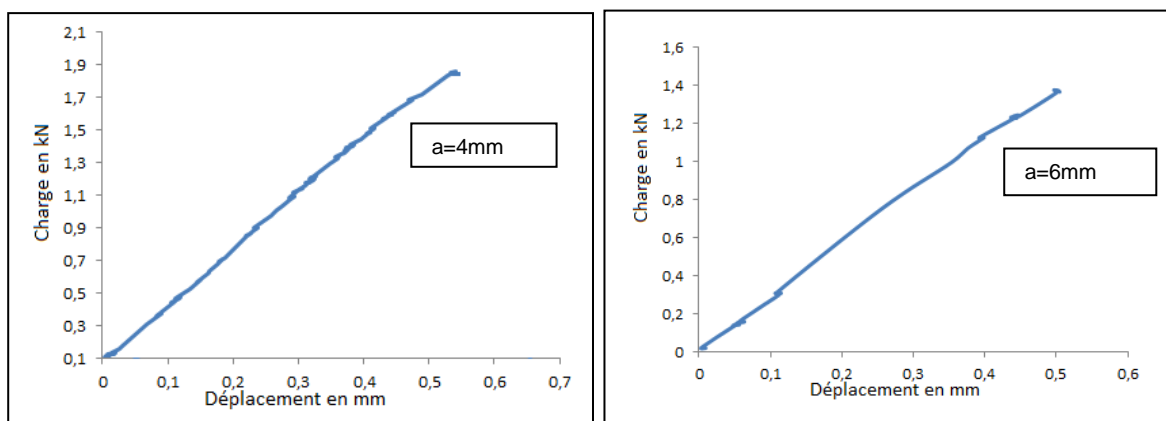


Figure 6: Courbes charge-déplacement pour $a=4\text{mm}$ et $a= 6\text{mm}$ du bois de l'Eucalyptus Grandis

Si on considère que la déformation par flexion a été éliminée grâce au système d'amarrage utilisé, le comportement de notre éprouvette lors de l'essai peut être qualifié comme élastique sous l'action de la charge appliquée. Les Figures 5 et 6 montrent, des courbes typiques charge/déplacement, obtenue pour nos éprouvettes en bois en Thuya et en Eucalyptus Grandis. On remarque que la fissure se propage de façon linéaire jusqu'à atteindre la charge maximale.

On remarque aussi que les courbes connaissent des déviations au cours du chargement qui peuvent être expliquées en entre autre : soit par glissement des fibres entre elles, soient à une éventuelle séparation lente des fibres du bois, soit que la fissure tend à se propager à-coups d'intensité très faible, ou encore de la rencontre des défauts internes du matériau bois.

Pour s'assurer de la validité de nos résultats et tenir en compte de la dispersion, les essais ont été réalisés sur un lot de 25 éprouvettes par essence, en prenant soin de les répartir en cinq petits lots de cinq éprouvettes chacun avec une longueur d'entaille a ($a=4, 6, 8, 10, 12\text{ mm}$)

Avec une vitesse d'essai constante de 0.5mm/min comme il a été signalé précédemment, la charge moyenne à la rupture décroît au fur et à mesure que la longueur d'entaille augmente comme le montre le tableau 3 cela est visible dans les deux essences.

Longueur de fissure a (mm)	La charge critique THUYA (kN)	La moyenne (kN)	Ecart type (kN)	La charge critique EUC GRANDIS (kN)	La moyenne (kN)	Ecart type (kN)
a =4	1	0,95	0,13	1,98	1,728	0,16
	0,81			1,61		
	1,14			1,61		
	0,98			1,64		
	0,80			1,8		
a =6	0,882	0,88	0,07	1,28	1,484	0,21
	1			1,64		
	0,90			1,75		
	0,85			1,25		
	0,801			1,5		
a =8	0,57	0,59	0,01	0,9	1,038	0,10
	0,59			1,2		
	0,60			1,04		
	0,60			1		
	0,57			1,05		
a =10	0,54	0,55	0,01	0,73	0,7644	0,06
	0,54			0,84		
	0,54			0,72		
	0,55			0,82		
	0,57			0,712		
a =12	0,51	0,51	0,07	0,64	0,68	0,03
	0,40			0,7124		
	0,47			0,72		
	0,54			0,675		
	0,61			0,7		

tableau. 3 : Evolution de la charge maximale pour chaque longueur d'entaille des deux essences.

On remarque que les charge maximales varient d'un essai à un autre avec la même longueur d'entaille et sous les mêmes conditions, chose normale vue la forte dispersion du matériau bois mais l'allure des courbes reste cohérente.

2. Application du critère énergétique au bois Thuya et l'Eucalyptus Grandis

Notre approche expérimentale nous a aidé à déterminer un paramètre important à savoir le taux de restitution d'énergie. Pour se faire nous avons commencé par la détermination de la courbe de complaisance en fonction des longueurs d'entailles utilisées

L'ensemble des courbes charges-déplacements fournit plusieurs valeurs de la complaisance

Ci (ai), définie par la pente de la courbe charge-déplacement $C = \delta/P$. Où δ , P représentent respectivement le déplacement et la charge appliquée.

Pour effectuer nos calcul nous avons supposé que :

- Le bois est un matériau homogène du fait que les dimensions de l'éprouvette est grande par rapport à la différence entre les diamètres de deux cernes consécutifs.
- Le comportement élastique dans les domaines de charges et de vitesse de sollicitations envisagés.
- La matrice de rigidité orthotrope

Le taux de restitution d'énergie G_{IIc}

G, le taux de restitution d'énergie correspondant à un petit accroissement de fissure [6]. Sous une forme analytique d'après IRWIN-KIES, on écrit :

$$G_{II} = \frac{P^2}{463} \frac{\partial C}{\partial a}$$

Où : P : charge appliquée, B : épaisseur de l'échantillon, C : complaisance de l'éprouvette fissurée, a : longueur de la fissure.

$$G_{IIC} = \frac{p_c^2}{2B} \frac{\partial C}{\partial a} \bigg|_{a=a_c}$$

Lorsque G_{II} atteint une valeur critique G_{IIC} , la rupture se produit. Ce critère a l'avantage de ne pas nécessiter la connaissance de la répartition des contraintes en fond de fissure.

Si on note que :

$$C = ma^3 + C_0$$

Où m et C_0 sont déterminés par une régression linéaire de la courbe expérimentale C en fonction de a^3 G_{IIC} devient alors :

$$G_{IIC} = 3P^2ma^2/2b$$

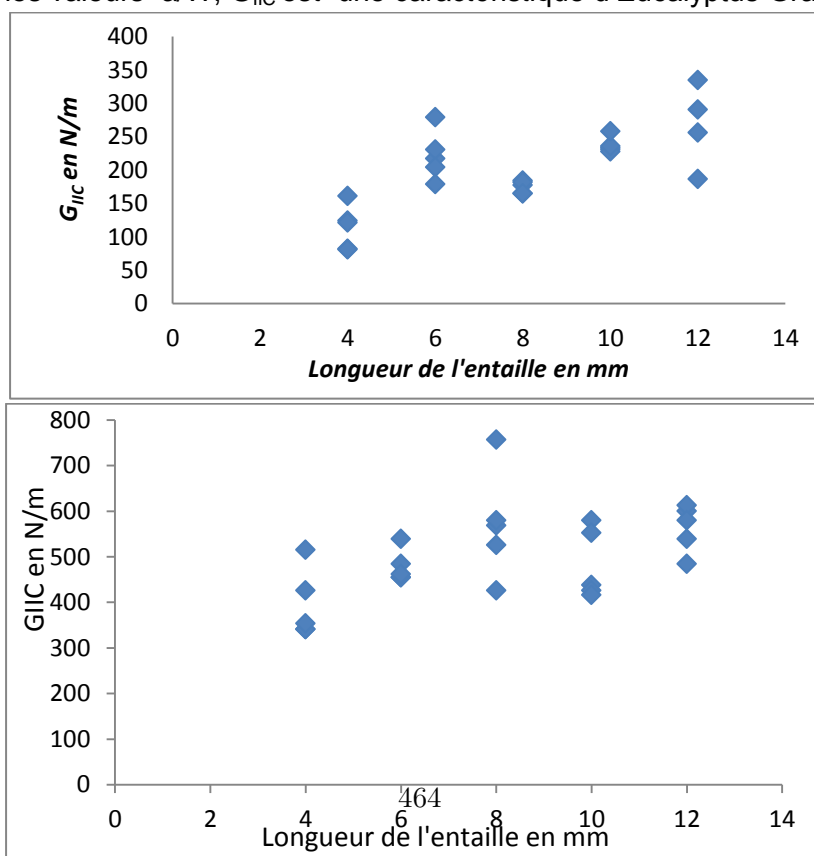
Nous mettons la valeur moyenne du taux de restitution d'énergie critique G_{IIC} déterminé en utilisant respectivement les formules citées précédemment dans (3) et (4) dans Tableau 4

Sachant qu'un matériau soumis à des contraintes contient l'énergie élastique emmagasinée dans les liaisons distendues. Lorsque le matériau se rompt, ces liaisons reprennent leur position d'équilibre ; elles restituent par conséquent une certaine quantité d'énergie élastique. Cependant, quand notre éprouvette est chargée, l'énergie de tension est stockée principalement sur la surface de la rupture du spécimen et peut être calculée en admettant les relations décrites précédemment.

a (mm)	G _{IIC} THUYA N/m		G _{IIC} Euc Grandis N/m	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
4	113,95	33,37	395,07	75,86
6	221,99	37,14	569,00	192,70
8	174,65	9,20	571,19	120,18
10	237,20	11,87	482,24	77,25
12	267,06	62,51	563,15	52,25

Sur la figure 8. On observe pour la première essence à savoir Thuya une dispersion pour chaque valeur de a, sauf pour les valeurs de 8 et de 10mm cette dispersion est moins visible. On constate également que la propagation de la fissure est stable à partir du rapport $a/w = 0,3$ D'où une quasi stabilité de notre prototype, on peut conclure que pour des valeurs supérieures $a/W = 0,3$ G_{IIC} est une caractéristique de cette essence.

Pour L'Eucalyptus Grandis on remarque une mineure dispersion mais on constate que la propagation de la fissure est stable à partir du rapport $a/w = 0,2$ D'où la stabilité de notre prototype, on peut conclure alors que pour toutes les valeurs a/W , G_{IIC} est une caractéristique d'Eucalyptus Grandis.



5. Conclusion

Nous avons développé dans ce travail, une nouvelle méthode d'essai pour l'étude du comportement du matériau bois soumis à un effort de cisaillement dans le plan longitudinal.

Le protocole expérimental de cet essai a été appliqué dans un premier temps sur deux séries de deux essences : une résineuse le Thuya du Maroc et l'autre feuillus l'Eucalyptus Grandis. Nous avons pu déterminer alors G_{IIC} à partir de l'enregistrement typique de la courbe charge déplacement lors de la propagation stable de la fissure et en utilisant la méthode de la complaisance. Ces résultats ont été confrontés à la littérature où on a remarqué que notre approche présente une facilité dans la réalisation et l'application des éprouvettes pour le mode II de propagation.

Au contraire des autres dispositifs présentés antérieurement bien que la comparaison des résultats montre une grande conformité.

Bibliographie

- [1] Schniewind AP, Pozniak RA. On the fracture toughness of Douglas-fir wood. *EngngFractMech* 1971;2:223–33.
- [2] Mall S, Murphy JF, Shottafer JE. Criterion for mixed mode fracture in wood. *J EngngMech* 1983;109:680–90.
- [3] Triboulot P, Jodin P, Pluvinage G. Validity of fracture mechanics concepts applied to wood by finite element calculation. *Wood SciTechnol* 1984;18:51–8.
- [4] Kretschmann DE, Green DW. Modeling moisture content-mechanical property relationships for clear southern pine. *Wood Fiber Sci* 1996;28:320–37.
- [5] King MJ, Sutherland IJ, Le-Ngoc L. Fracture toughness of wet and dry Pinusradiata. *HolzRohWerkst* 1999;57:235–4
- [6] Dourado N, Morel S, de Moura MFSF, Valentin G, Morais J. Comparison of fracture properties of two wood species through cohesive crack simulations. *Composites Part A* 2007;39:415–27
- [7] YOSHIHARA H., 2007. Simple estimation of critical stress intensity factors of wood by tests with double cantilever beam and three-point end notched flexure. *Holz* ;61:182–9
- [8] DAVIES, P., BLACKMAN, B.R.K. & BRUNNER, A.J. « Standard test methods for delamination resistance of composite materials: Current status. » *Applied composite materials*, 1998, vol. 5, p. 345-364.
- [9] DAVIES, P., BLACKMAN, B.R.K. & BRUNNER, A.J. « Mode II delamination. » Dans : *Fracture mechanics testing methods for polymers, adhesives, and composites*. Ed. par D.R. MOORE, A. PAVAN & J.G. WILLIAMS. Oxford, Royaume-Uni : Elsevier Science Ltd., 2001, p. 307-333. ISBN 0080436897
- [10] M.A.L. Silvaa, M.F.S.F. de Mourab, J.J.L. Moraisa Numerical analysis of the ENF test for mode II wood fracture *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* Volume 37, Issue 9, September 2006, Pages 1334–1344
- [11] Hiroshi Yoshihara, Masamitsu Ohta Measurement of mode II fracture toughness of wood by the end-notched flexure test *J Wood Sci* (2000) 46:273-278
- [12] Silva MAL, Morais JJL, de Moura MFSF, Lousada JL. Mode II wood fracture characterization using the ELS test. *EngngFractMech* 2007;74:2133–47.
- [13] Mohammed ELLATIFI l'économie de la forêt et des produits forestiers au Maroc: Bilan et Perspectives p72
- [14] D. Guitard, F. El Amri Modèles prévisionnels de comportement élastique tridimensionnel pour les bois feuillus et les bois résineux *Ann sci for* 1987