

# Caractérisation expérimentale du délaminage en mode I des panneaux de contreplaqué

A. EL MOUSTAPHAOUI<sup>1</sup>, A. CHOUAF<sup>1</sup>, M. CHERGUI<sup>1</sup>, Kh. KIMAKH<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Laboratoire de Contrôle et Caractérisation Mécanique des Matériaux et des Structures (LCCMMS), Université Hassan II Casablanca, ENSEM.*

## Résumé

Pour caractériser la propagation du délaminage des panneaux de contreplaqué de Ceiba, nous avons fait appel à l'approche énergétique qui considère que la propagation de la fissure est un phénomène de dissipation d'énergie. Le paramètre fondamental de cette approche est le taux de restitution d'énergie. Pour déterminer ce paramètre en mode I ( $G_I$ ), nous avons opté pour l'essai DCB qui consiste à faire propager une fissure au sein d'un joint collé sollicité en traction et à mesurer la résistance de ce joint à la propagation de cette fissure. Pour chacune des éprouvettes, un film en téflon de faible épaisseur a été inséré sur le plan moyen, permettant ainsi de créer une zone pré-délaminée qui va servir à l'amorçage du délaminage. Le taux de restitution d'énergie en mode I est déterminé à l'aide de quatre approches, à savoir la théorie des poutres, l'interpolation de Berry, la théorie des poutres modifiée et la méthode de calibration de la complaisance. La mesure de la longueur de délaminage est assurée par l'observation visuelle à l'aide d'un caméscope qui permet de suivre le délaminage dès le début jusqu'à la fin de la propagation. Ensuite, nous avons déterminé l'influence des paramètres de fabrication du contreplaqué sur l'apparition macroscopique du délaminage. Enfin, nous avons déterminé la courbe de résistance à la propagation du délaminage de la structure étudiée.

**Mots clés : Contreplaqué, Délaminage, Essai DCB, Taux de restitution d'énergie, Courbe de résistance.**

## Abstract

To characterize the propagation of the delamination of Ceiba's plywood panels, we used the energy approach which considers that crack propagation is a phenomenon of energy dissipation. The fundamental parameter of this approach is the energy restitution rate. To determine this parameter in mode I ( $G_I$ ), we chose the DCB test which consists of propagating a crack within a joint strained under tension and measuring the resistance of this joint to the propagation of this crack. For each of the specimens, a thin film of Teflon was inserted on the middle plane, thus creating a pre-delaminated zone which will serve to initiate the delamination. The energy restitution rate in Mode I ( $G_I$ ) can be determined using four approaches, namely Beam Theory, Berry law, Modified Beam Theory and the method of Compliance Calibration. The delamination length is measured by visual observation using a camcorder which allows the delamination to be tracked from the beginning to the end of propagation. Then, we determined the influence of the manufacturing parameters of the plywood on the macroscopic appearance of delamination. Finally, we determined the delamination propagation resistance curve of the structure studied.

**Mots clés : Plywood, delamination, Test DCB, Energy restitution rate, Resistance curve.**

## I. Introduction :

L'arrivée de dérivés et de composites à base de bois, présentant des caractéristiques plus intéressantes que sa forme naturelle, a donné un nouvel élan industriel à ce matériau [1]. L'un des meilleurs dérivés et composites de bois est le panneau de contreplaqué. Le contreplaqué est un panneau constitué de minces feuilles de bois obtenues par déroulage. Ce panneau se distingue par une superposition des plis à fils croisés, la cohésion des plis est assurée par collage et pressage à chaud. Ce procédé pourrait engendrer divers défauts macroscopiques. Parmi ces défauts, nous pouvons citer le délaminage, des micro-vides ou des impuretés [2]. Dans cette présente étude, nous allons nous intéresser au délaminage. En effet, le délaminage est un mécanisme de rupture qui se caractérise par un décollement ou une décohésion entre les plis du stratifié. La cause de délaminage pourrait être attribuée, en grande partie, à l'existence des contraintes interlaminaires. Ces contraintes interlaminaires se développent à partir de la discontinuité du comportement mécanique entre les plis individuels [3]. Le niveau de ces contraintes devient très singulier au voisinage des bords libres, ce phénomène est connu par « l'effet de bord libre » [4]. Le mode d'ouverture (mode I) est le mode de délaminage le plus critique parce qu'il nécessite le moins d'énergie. Parmi les essais en mode I, la configuration la plus répandue est l'essai DCB (Double Cantilever Beam).

L'essai DCB consiste à faire propager une fissure au sein d'un joint collé sollicité en traction et à mesurer la résistance de ce joint à la propagation de cette fissure. C'est un essai de traction appliquée sur deux bras d'une éprouvette symétrique incluant une fissure artificielle. Cette pré-fissure, nécessaire pour amorcer le délaminage dans des conditions stables, est réalisée via un insert non-adhésif (téflon) d'une épaisseur faible [5].

Cet essai permet de mesurer en même temps la ténacité de l'interface :  $G_{IC}$ , et la courbe de résistance, appelée également courbe R. La première désigne la résistance à l'amorçage du délaminage en mode I pur, et la deuxième décrit la quantité d'énergie nécessaire pour faire propager la fissure initiale dans le plan étudié de la structure [6].

Pour cet essai, une courbe typique de la réponse en effort-déplacement ( $P-\delta$ ) sera présentée. A partir de ces résultats expérimentaux, le taux de restitution d'énergie critique ( $G_{IC}$ ) peut être déterminé par quatre approches. Une fois ces valeurs connues, il sera alors possible de prédire et d'anticiper la délamination du contreplaqué.

Puisque le délaminage est un mode de rupture prépondérant dans les structures stratifiées soumises à un chargement mécanique, alors la maîtrise de leur amorçage et leur propagation est incontournable. En effet, les prévisions issues de la simulation numérique du comportement d'une structure, sont insuffisantes de traduire la réalité sans tenir compte de la loi du comportement du délaminage. L'établissement de cette dernière, avant tout, doit être basé sur l'analyse des résultats expérimentaux obtenus par les essais mécaniques [7].

## II. influence des paramètres de stratification sur l'apparition macroscopique du délaminage :

Le pressage à chaud consiste dans un premier temps en pré-pressage à froid des panneaux composés à plis croisés à une pression de 4 kg/m<sup>2</sup>. Ensuite, ces panneaux sont introduits dans une presse chaude de façon à obtenir une polymérisation suffisante du film de colle le plus éloigné des plateaux chauffants. Ce pressage à chaud permet d'assurer la liaison physique et chimique des différents plis. La pression,

la température, le temps de pressage et le dépôt de colle sont déterminés en prenant en considération le type de colle utilisée, l'épaisseur du panneau à fabriquer et les caractéristiques des placages utilisés.

L'objectif de cet partie est de déterminer l'influence des principaux paramètres de la fabrication du contreplaqué sur l'apparition macroscopique du délaminage.

Pour mettre en évidence cette influence, nous avons fixé la pression à 12 kg/m<sup>2</sup> afin d'agir seulement sur trois variables (température, temps de pressage, dépôt de colle), ensuite nous avons choisi trois valeurs de chaque paramètre. Les placages utilisés ont un taux d'humidité égal à 12%. Ensuite, pour étudier l'effet de la pression sur l'apparition macroscopique du délaminage, nous avons affecté trois valeurs à la pression en fixant les autres paramètres.

Pour déterminer le **Pourcentage d'Apparition du Délaminage (PAD)** de chaque paramètre, il faut tout d'abord commencer par déterminer le pourcentage des panneaux délaminés de chaque expérience effectuée. Ces expériences ont été réalisées à partir des valeurs figées de chaque paramètre. Or, nous avons travaillé avec trois valeurs pour chaque paramètre. Par conséquent, le nombre des expériences réalisées égale à 27.

Le PAD résulte de la valeur d'un paramètre qui est obtenue en faisant la moyenne des pourcentages des panneaux délaminés de toutes les expériences dans lesquelles cette valeur est apparue.

En suivant cette démarche, nous obtiendrons les résultats ci-dessous (Figure 1) pour les deux essences étudiées (Ceiba et Peuplier) qui représentent deux structures différentes aussi bien au niveau de leurs caractéristiques physiques que mécaniques :

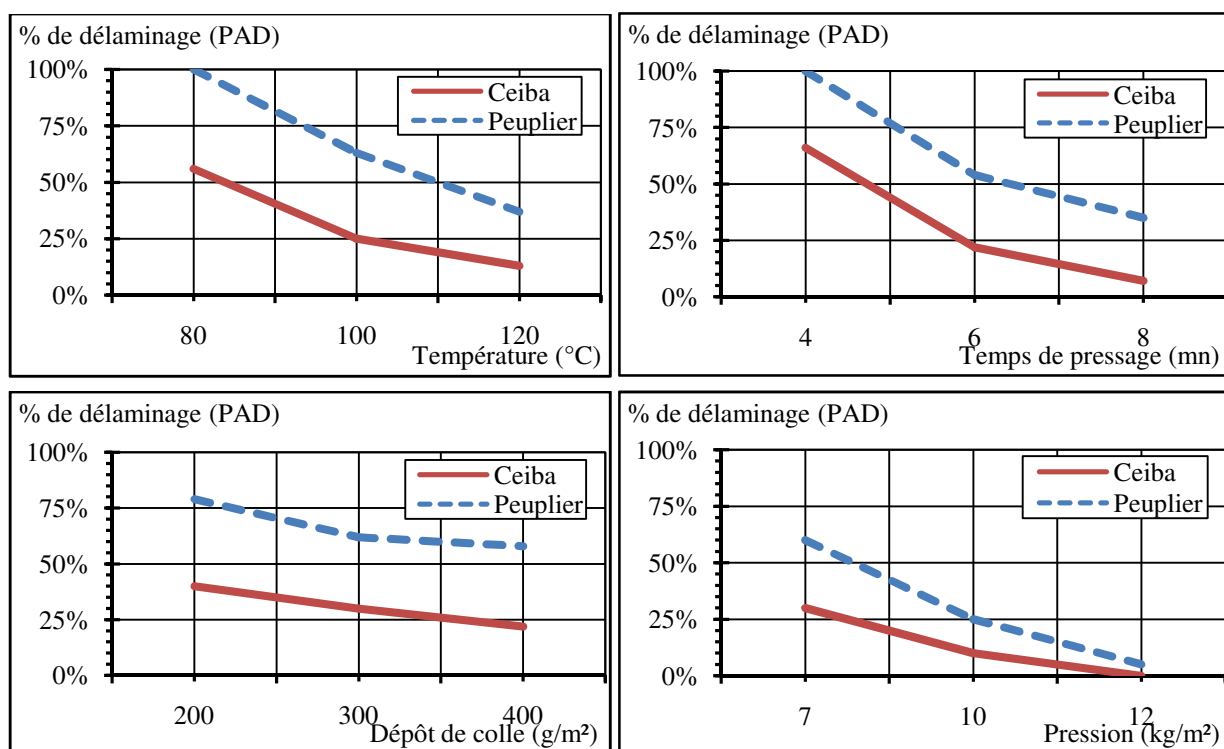


Figure 1 : PAD des quatre paramètres étudiés

Selon les résultats obtenus, nous pouvons remarquer que le pourcentage d'apparition du délaminage varie énormément en fonction des paramètres de fabrication du contreplaqué et que leur influence sur le délaminage du Peuplier est beaucoup plus importante que sur celui du Ceiba. En effet, ce pourcentage est une fonction décroissante suivant les quatre paramètres. Cette étude expérimentale nous a permis de mettre en évidence l'influence des paramètres de la fabrication du contreplaqué sur l'apparition macroscopique du délaminage. Ce phénomène résulte en grande partie du champ de

contraintes développé au voisinage du bord du panneau [8]. En effet, la théorie classique des stratifiés néglige l'existence des contraintes  $\sigma_z$ ,  $\tau_{xz}$  et  $\tau_{yz}$ . Cette hypothèse est justifiée pour les régions éloignées des discontinuités géométriques telles que les bords libres. Or, il est prouvé que le chargement mécanique ou hygrothermique produisent ces contraintes, normale et de cisaillement interlaminaires dans certains endroits, spécialement dans les régions près des bords libres [9, 10].

Pour notre étude, nous pourrions associer la criticité des contraintes conduisant au délaminage à la température et au temps de pressage en premier lieu. Ces deux paramètres sont liés l'un par rapport à l'autre.

Quand la température augmente, les molécules de colle restées à la surface deviennent d'abord plus mobiles, cela entraîne une diminution de la viscosité, ensuite commence la polymérisation et la formation de la liaison physique et chimique avec le bois. Si la température est insuffisante, alors cette liaison physique et chimique entre les plis de bois ne se forme pas d'une façon parfaite. Cela provoque l'apparition du délaminage.

Or, il existe deux approches pour caractériser le délaminage. La première approche est une approche locale qui se base sur le calcul des champs de contraintes ou de déformations. La deuxième approche est une approche globale qui considère que la propagation de fissure est un phénomène de dissipation d'énergie. Selon la théorie de Griffith, l'énergie consommée est la différence entre l'état énergétique du système avant et après fissuration. Cependant, l'approche énergétique présente des avantages par rapport à l'approche en contraintes. Le taux de restitution d'énergie est relativement facile à déterminer par des méthodes expérimentales ou analytiques ce qui permet d'éviter d'étudier le champ de contrainte très complexe à l'extrémité de la fissure.

Par la suite, nous allons nous intéresser particulièrement à la caractérisation de l'essence de Ceiba en utilisant l'approche énergétique.

### III. Etude expérimentale :

#### III.1. Détermination de la complaisance et du taux de restitution d'énergie critique $G_{IC}$ :

Pour déterminer expérimentalement la complaisance ainsi que le taux de restitution d'énergie critique  $G_{IC}$  relatifs à la structure étudiée, nous allons faire appel à quatre méthodes différentes. Le formalisme de chacune de ces méthodes est développé ci-dessous :

##### III.1.1. Méthode de la théorie des poutres (TP):

Afin d'évaluer la ténacité en mode I pur à partir des essais du type DCB, la formule Irwin-Kies issue de la mécanique élastique linéaire de la rupture est appliquée [11] :

$$G_{IC} = \frac{P_C^2}{2b} \frac{dC}{da} \quad (1)$$

Où  $P_C$  désigne la charge critique à l'amorçage de la fissure,  $C$  la complaisance de l'éprouvette au point d'application de la charge,  $b$  la largeur de l'éprouvette et  $a$  la longueur initiale de la fissure.

La théorie classique des poutres qui néglige l'effet de cisaillement, permet d'exprimer la complaisance en fonction de la longueur de la fissure et des paramètres du matériau comme suit (Figure 2) :

$$C = \frac{2a^3}{3EJ} = \frac{\delta}{P} \quad (2)$$

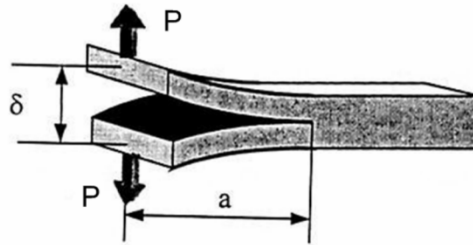


Figure 2 : Essai Double Cantilever Beam (DCB)

Où  $E$  est le module d'Young longitudinal,  $\delta$  le déplacement entre les deux bras de l'éprouvette et  $J$  le moment quadratique.

En tenant compte des équations (1) et (2), le taux de restitution d'énergie critique peut s'écrire :

$$G_{IC} = \frac{3\delta_c P_c}{2ba} \quad (3)$$

Où  $\delta_c$  correspond au déplacement pour lequel la force critique  $P_c$  est atteinte.

### III.1.2. Loi de Berry (LB) :

La loi de complaisance proposée par Berry (LB) a pour avantage de ne pas faire des hypothèses supplémentaires pour la détermination de la complaisance. Elle est sous la forme suivante [12]:

$$C = \alpha a_0^n \quad (4)$$

Où  $\alpha$  et  $n$  sont des paramètres intrinsèques au matériau qui se déterminent par l'interpolation de la courbe expérimentale  $C$  en fonction de  $a_0$ . En appliquant cette loi de complaisance, la formule

Irwin-Kies permet d'obtenir le taux de restitution d'énergie critique par :

$$G_{IC} = \frac{P_c^2}{2b} \alpha n a_0^{n-1} \quad (5)$$

### III.1.3. Théorie modifiée des poutres (TMP) :

La théorie modifiée des poutres est une loi de complaisance, inspirée de la théorie des poutres, a été largement appliquée dans la littérature [13] :

$$C = A a_0^3 + B \quad (6)$$

Où  $A$  et  $B$  sont déterminés par une régression linéaire de la courbe expérimentale  $C$  en fonction de  $a_0^3$ . Selon cette formulation, le taux de restitution d'énergie critique peut s'exprimer par :

$$G_{IC} = \frac{3P_C^2}{2b} Aa_0^2 \quad (7)$$

### III.1.4. Méthode de Calibration de la Complaisance (CC):

Elle consiste à tracer le logarithme de la complaisance,  $\log(C)$ , en fonction du logarithme de la longueur initiale de la fissure  $\log(a_0)$ . On détermine la meilleure approximation linéaire possible avec la méthode des moindres carrés et on calcule le coefficient de la pente,  $n$ , tel que l'illustre la Figure 3.

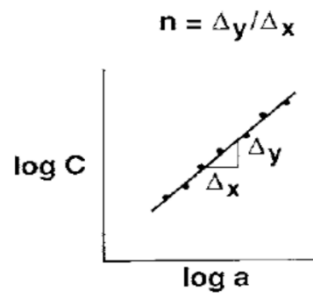


Figure 3 : Calcul du paramètre  $n$  utilisé dans la méthode CC

A partir de cette méthode, le taux de restitution d'énergie critique peut s'exprimer par [12] :

$$G_{IC} = \frac{n \delta_C P_C}{2ba} \quad (8)$$

### III.2. Résultats expérimentaux et discussions :

Le matériau des éprouvettes DCB est un panneau de contreplaqué constitué des plis à base de l'essence de Ceiba. Les dimensions de l'éprouvette sont  $2400(w) \times 80(b) \times 18(h)$  mm<sup>3</sup> (Figure 3). Le mélange collant utilisé est constitué de la résine l'urée-formaldéhyde. Lors de la fabrication des éprouvettes, la fissure initiale ( $a_0$ ) est réalisée par insertion d'un film de Téflon de faible épaisseur servant d'initiateur à la délamination. Pour calculer la complaisance expérimentale, il faut tracer la courbe effort-déplacement pour plusieurs cas de figure de longueur de fissure initiale  $a_0$ , ensuite il faut déterminer l'équation de l'effort en fonction du déplacement dans la partie linéaire de la courbe  $P = f(\delta)$ .

Les essais ont été réalisés sur une machine de traction à déplacements imposés de 1,5 mm/min. Des forces d'ouverture sont appliquées sur l'éprouvette par le moyen de charnières collées à une de ses extrémités comme le montre la Figure 4.

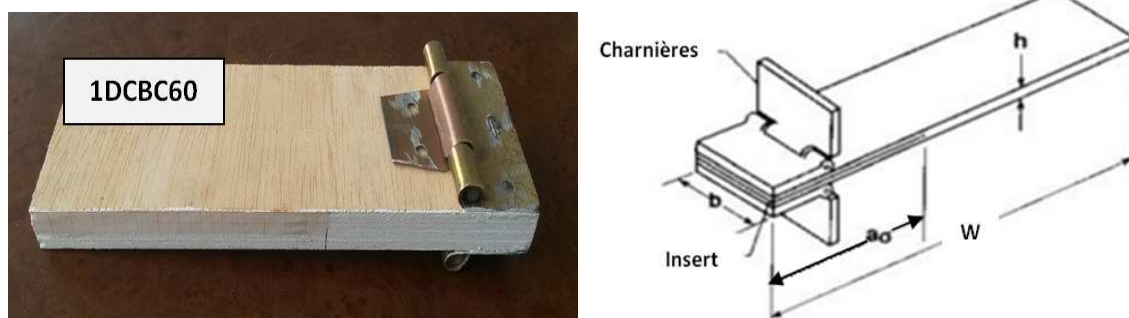


Figure 4 : Éprouvette DCB

### III.2.1. Courbes charge-déplacement :

Nous rappelons que pour nos essais, nous avons considéré plusieurs cas de figure du rapport  $a_0/w$  (0,37 – 0,39 – 0,40 – 0,41 – 0,42 – 0,47 – 0,48 – 0,50). Pour représenter nos résultats, nous avons reporté dans la Figure 5 les cas les plus marquants.

Plusieurs aspects du comportement des courbes charge-déplacement sont mis en évidence :

Dans la première partie, la force augmente de façon linéaire avec le déplacement imposé jusqu'à l'amorçage du délaminage. Au début de la propagation de la fissure, l'augmentation de la charge a été observée, suivi d'une étape où la charge reste quasi stable. Ces phénomènes peuvent être associés à la création de ponts de fibres. Durant cette phase, la résistance à la fissuration devrait augmenter. Par la suite, la propagation du délaminage se traduit par une décroissance de l'effort en fonction de la croissance de la fissure. Les courbes de cette partie relativement lisse représentent la propagation stable de la fissure. Tandis que la chute de l'effort indique une propagation de la fissure instable provoquée éventuellement par la rupture des ponts de fibres. Durant les essais, la croissance de la fissure est restée relativement stable.

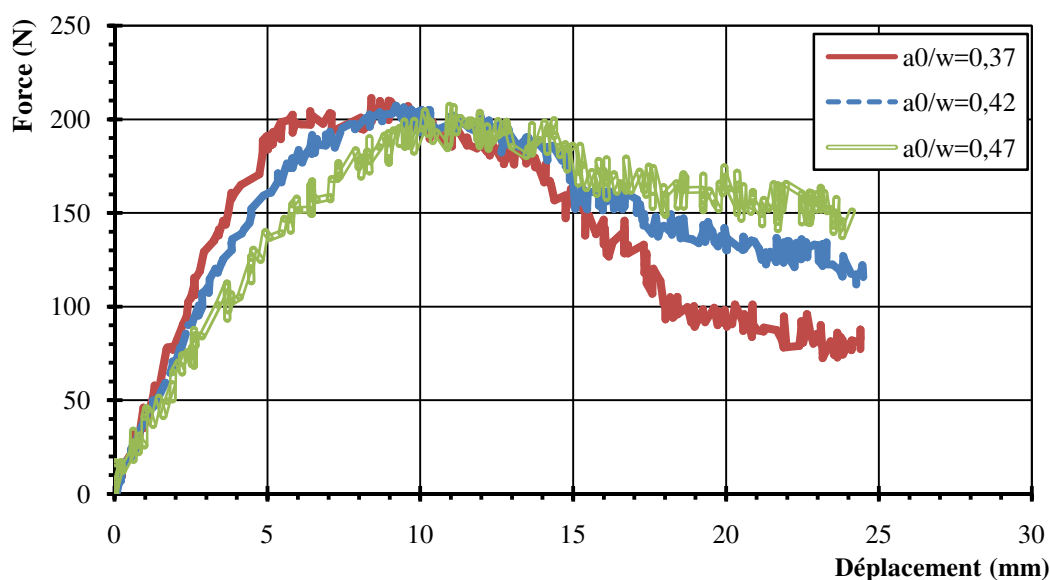


Figure 5 : Courbes expérimentales force-déplacement de DCB

### III.2.2. Taux de restitution d'énergie critique $G_{IC}$ des éprouvettes DCB :

A partir des essais DCB, la détermination de la valeur de  $G_{IC}$  repose sur deux piliers :

- le premier concerne la définition du point d'amorçage de la fissure sur la courbe force-déplacement. Selon les normes, le point d'amorçage peut être ou bien le point marquant la fin de la linéarité, ou bien le point qui représente une baisse de 5% du coefficient directeur initial.
- le deuxième est le choix d'un modèle de la loi de complaisance nécessaire dans l'utilisation de la formule Irwin-Kies. Dans notre étude, le point marquant la fin de la linéarité de la courbe force-déplacement est bien le début de la propagation de la fissure selon les observations visuelles. Afin de comparer les résultats obtenus à partir de quatre lois de complaisance, nous avons d'abord mesuré la complaisance de chaque éprouvette, puis réalisé l'interpolation selon la loi de Berry (Figure 6), la loi

linéaire en  $a_0^3$  issue de la théorie modifiée des poutres (Figure 7) et selon la méthode de calibration de la complaisance (Figure 8).

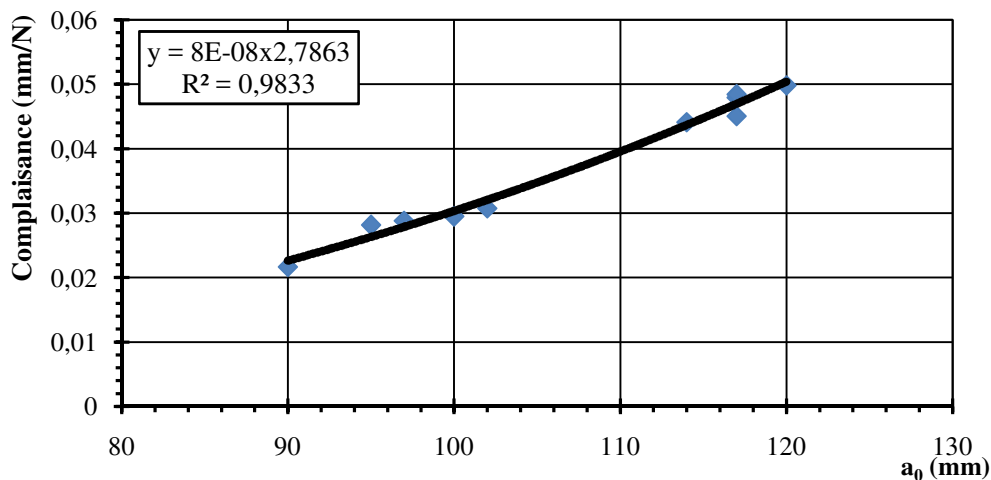


Figure 6 : Interpolation de C en fonction de la longueur de fissure initiale  $a_0$

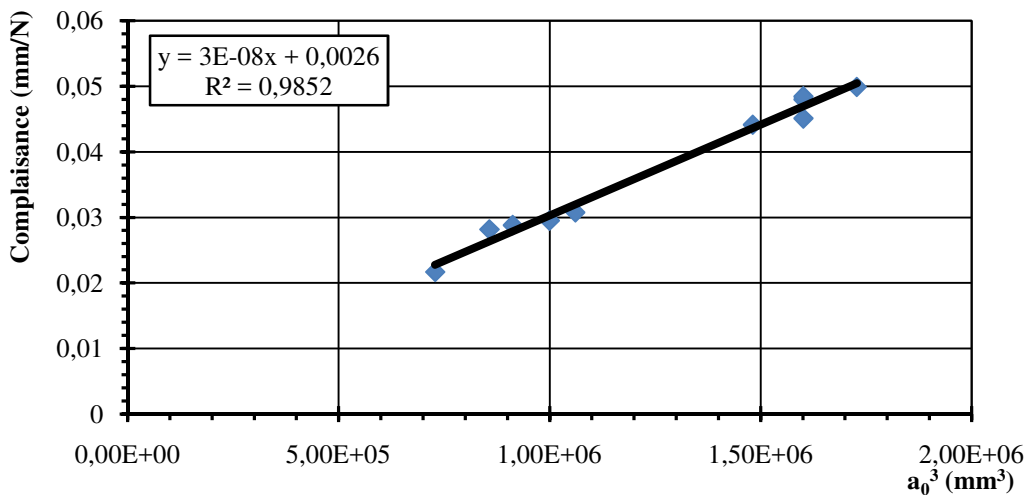


Figure 7 : Interpolation de C en fonction de  $a_0^3$

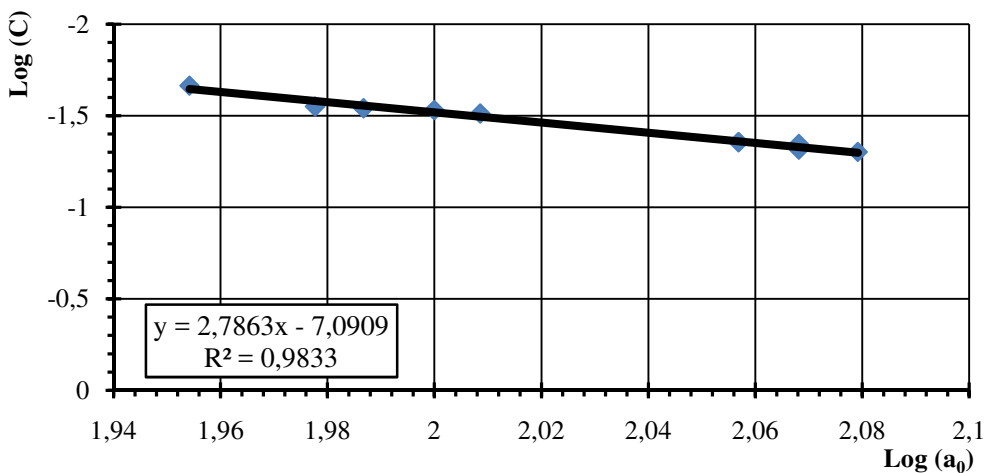


Figure 8 : Interpolation de  $\log(C)$  en fonction de  $\log(a_0)$



Les résultats des taux de restitution d'énergie critique  $G_{IC}$  sont déterminés ci-dessous (Figure 9):

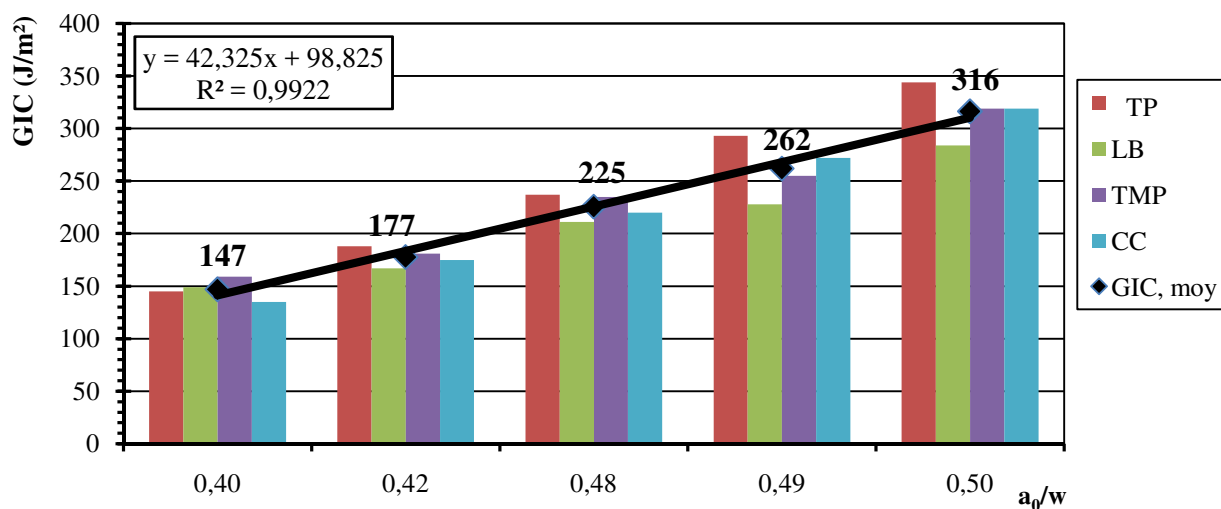


Figure 9 :  $G_{IC}$  selon les quatre approches

Selon les résultats obtenus, nous pouvons remarquer que le taux de restitution d'énergie critique est proportionnel à la longueur d'entaille initiale pour toutes les approches. La courbe de tendance de la valeur moyenne des quatre approches de  $G_{IC}$  suit bien une loi linéaire en fonction de la longueur d'entaille initiale. Or, la méthode MTP donne les résultats les plus élevés. En effet, la méthode MTP ne prend pas en compte la rotation des microfissures dans la zone délaminée. Cela provoque une surestimation des valeurs de  $G_{IC}$ . Cependant, la loi de Berry est très conservatrice, elle donne des valeurs les moins élevées de  $G_{IC}$ .

### III.3. Courbe de résistance :

En temps réel, on trace la courbe de la force en fonction du déplacement. L'évolution de la propagation de la fissure est également enregistrée à l'aide d'un caméscope. À chaque fois que la fissure atteint une graduation sur la tranche de l'éprouvette, la force et le déplacement associés sont relevés. Il en résulte la courbe de résistance (courbe R) qui se détermine par des valeurs moyennes des taux de restitutions d'énergie qui sont encadrées par plus au moins un écart type.

La Figure 10 présente les courbes de résistance obtenues selon les quatre méthodes de calcul.

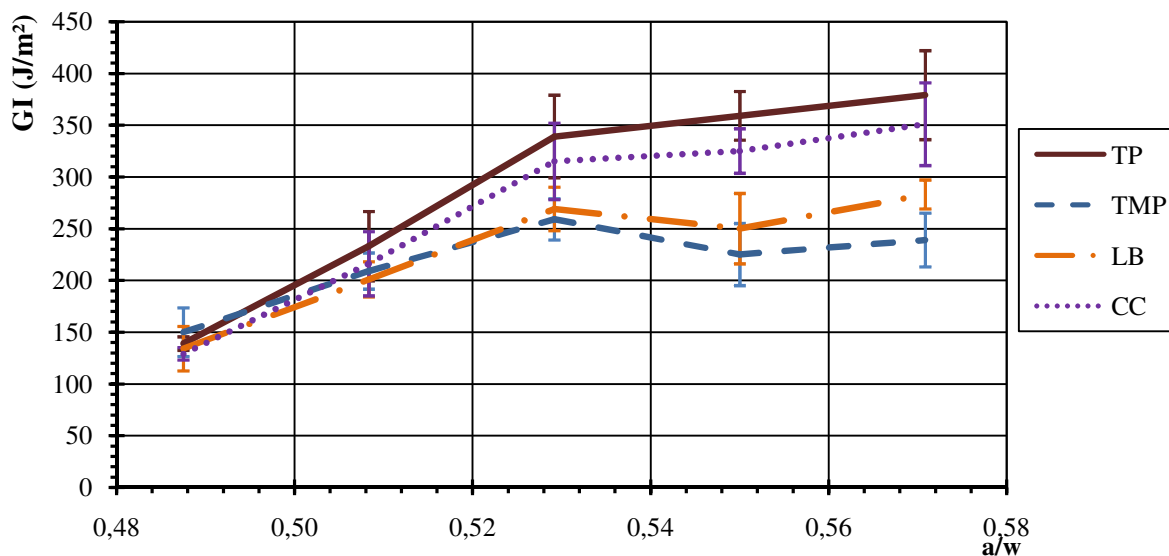


Figure 10 : Courbe de résistance pour  $a_0/w = 0,48$

Nous pouvons remarquer que le taux de restitution d'énergie en mode I ( $G_I$ ) augmente en fonction de la longueur de la fissure. Ce phénomène est attribué à la formation de ponts de fibres issus des zones endommagées autour de la fissure qui provoque une augmentation de l'énergie de rupture. Nous pouvons relever qu'il y a une concordance entre les méthodes TP et CC et entre les méthodes TMP et LB.

#### IV. Conclusion et perspectives :

La complexité de l'endommagement des panneaux de contreplaqué rend la prédiction de leur rupture une tâche très difficile. Parmi ces endommagements prédominants, nous trouvons le délaminage qui est certainement le plus méconnu et le plus difficile à modéliser. Ce qui en fait un axe de recherche toujours d'actualité pour l'industrie.

Dans cette étude, nous avons dans un premier temps mis en évidence l'influence des paramètres de la fabrication du contreplaqué sur l'apparition macroscopique du délaminage. A partir de nos résultats obtenus, nous pouvons associer la criticité des contraintes conduisant au délaminage, principalement à la température et au temps de pressage. Dans la deuxième partie, nous avons opté pour l'approche énergétique pour caractériser la propagation du délaminage des panneaux de contreplaqué. Pour ce faire, nous avons réalisé des essais expérimentaux, et nous avons choisi l'essai DCB qui est le plus utilisé pour caractériser le mode I pur. Les approches déployées sont la théorie des poutres, l'interpolation de Berry, la théorie des poutres modifiée et la méthode de calibration de la complaisance. Les résultats obtenus nous ont permis de déterminer une loi linéaire entre le taux de restitution d'énergie critique  $G_{IC}$  et la longueur initiale de la fissure  $a_0$  sans procéder à des essais expérimentaux. Cette loi nous pouvons la considérer comme une caractéristique intrinsèque des panneaux de contreplaqué de Ceiba. Enfin, le tracé la courbe de résistance de la structure étudiée est sensible à la méthode utilisée. Cette concordance a été observée d'un part entre les méthodes TP et CC et d'autre part entre les méthodes TPM et LB.

#### V. Références :

- [1] J.B. CLAUDEL, Caractérisation du comportement mécanique de panneaux de contreplaqué sous sollicitation de flexion et flexion-compression, Thèse, Université de Metz, France, 2002.
- [2] M. FOUGEROUSSE, R. BARRAY, G. DEON, Résistance des panneaux contreplaqués à la pourriture : premiers essais sur l'influence de l'épaisseur des plis. *Revue Bois et Forêt des Tropiques*, n° 197, 3e trimestre 1982.
- [3] C. AVRIL, Etude expérimentale et numérique de la résistance interlaminaire en mode I de thermoplastiques à renfort tissé. Philippe OLIVIER et Jacques LAMON. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France.
- [4] T. VANDELLOS, Vers un modèle de zones cohésives adaptée à l'étude du délaminage dans les composites stratiés. 10e colloque national en calcul des structures, May 2011, Giens, France.
- [5] ASTM, Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional continuous fiber reinforced composite materials.
- [6] F. LACHAUD, Délaminage de matériaux composites à fibres de carbone et à matrices organiques : Etude numérique et expérimentale, suivi par émission acoustique, Thèse, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1997.

- 
- [7] M.J. MATHEWS, S.R. SWANSON, Characterization of the interlaminar fracture toughness of a laminated carbon/epoxy composite. *Composites science and technology*, 2007, vol. 67, p. 1489-1498.
- [8] R.B. PIPES, N.J. PAGANO, Interlaminar stresses in composite laminates under uniform axial extension. *Journal of composite materials*, 1970, vol. 4, p. 538-548.
- [9] M. Daniel, O. ISHAI, *Engineering Mechanics of Composite Materials*. Oxford University Press, 2006, ISBN 978-0-19-515097-1 chap. 9.
- [10] T. HERAKOVICH, *Mechanics of Fibrous Composites*. John Wiley & Sons, Inc., 1988, ISBN 0-471-10636-4, chap. 8.
- [11] G.R. IRWIN, Fracture I. *Handbuch der Physik*. 6, 1958, pg. 558-590. Flügge.
- [12] F. DUCEPT, D. GAMBY, P. DAVIES, A mixed-mode failure criterion derived from tests on symmetric and asymmetric specimens. *Composites science and technology*, 1999, vol. 59, p. 609-619.
- [13] M.L. BENZEGGAGH, M. KENANE, Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus. *Composites science and technology*, 1996, vol. 56, p. 439-449.