

ANALYSE PROBABILISTIQUE DE L'ENDOMMAGEMENT D'UNE PLAQUE EN COMPOSITE SOUS CHARGEMENT THERMIQUE

Belaïd. Mechab¹, Mokadem. Salem¹, Mohamed. Mokhtari^{2,*}, Boualem. Serier¹

¹LMPM, Département de Génie Mécanique, Université Djillali Liabes de Sidi Bel
Abbes BP 89 Cité Ben M'hidi 22000, Sidi Bel Abbes, Algérie.

²Laboratoire LARTFM, Ecole Nationale Polytechnique Maurice Audin, Oran, Alegria
E-mail: mokhtarimohamed44@yahoo.fr

Reçu le : 13/02/2019

Accepté le : 19/09/2019

Résumé

L'objectif de ce travail est de faire une analyse, tridimensionnelle par la méthode des éléments finis, d'une plaque en composite fissurée sous un chargement thermique. Les effets des propriétés mécaniques du composite, de l'angle de l'orientation des fibres, de la forme géométrique de la plaque, du chargement thermique et de la taille de fissure ont été étudié pour montrer leur influence sur la variation de l'intégrale J. On conclue que l'intégrale J augmente avec les augmentations de la taille de fissure, de la variation de température et la diminution de l'angle d'orientation des fibres(θ). Pour terminer le travail une analyse probabilistique a été réalisée.

Mots-clés : Analyse thermique, Endommagement, Composite, Analyse probabiliste, Fiabilité.

1. Introduction

Les matériaux composites sont de plus en plus souvent utilisés pour la réalisation des pièces de structures. Malgré qu'ils soient anisotropes et hétérogènes, leurs propriétés mécaniques spécifiques permettent en effet un allègement des structures, particulièrement lors de leur introduction dans des secteurs d'activités comme l'aéronautique, l'automobile et le sport. Ainsi, les trois grandes classes des matériaux composites, à matrices céramiques, métalliques et polymères, connaissent un développement soutenu [1,2]. Un matériau composite est constitué d'une matrice et d'un renfort, constitué de fibres et des charges. La matrice est elle-même composée d'une résine (polyester, époxyde, etc.) et de charges dont le but est d'améliorer les caractéristiques de la résine tout en diminuant le coût de production. D'un point de vue

mécanique, l'ensemble résine-charges se comporte comme un matériau homogène, et le composite est considéré comme constitué d'une matrice et d'un renfort [3,4,5]. Le renfort apporte au matériau composite ses performances mécaniques élevées, alors que la matrice a pour rôle de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de protéger les fibres vis-à-vis des agressions extérieures. Le type d'association matrice-renfort dépend des contraintes imposées au concepteur, comme des caractéristiques mécaniques élevées, tenue en température, coût, résistance à la corrosion, etc. L'apparition des fissures et leur propagation est l'un des risques majeurs des structures industrielles. La discontinuité géométrique que constitue la fissure peut, sous certaines conditions de chargement, conduire à une fuite désastreuse où même la ruine complète de la structure. Les chercheurs du début du siècle ont tenté de comprendre comment une fissure pouvait conduire à la ruine des structures. La tâche n'est pas simple car les fissures conduisent, en théorie, à une singularité mathématique.

L'objectif de ce travail est d'étudier les performances des plaques en composite par une analyse tridimensionnelle par la méthode des éléments finis a été utilisée pour réaliser cet objectif. La comparaison est faite sur l'évolution de l'intégrale J en tête de fissure des plaques.

Nous mettrons en évidence les avantages et inconvénient liés aux différentes approches, ainsi que leur intérêt pour notre étude. Et pour terminer l'étude une analyse probabilistique de la défaillance de la structure a été menée.

2. Modèle géométrique

Le modèle géométrique de la plaque en composite fissurée est représenté sur la figure.1. La plaque carrée est caractérisée par ses dimensions, sa hauteur $H = 80$ mm, sa largeur $W = 80$ mm et son épaisseur $e=3$ mm, contenant une fissure centrale de longueur (a) qui varie de 5mm jusqu'à 20mm. La structure composée de la plaque en composite, est sollicitée par un chargement thermique $\Delta T=100$ C°.

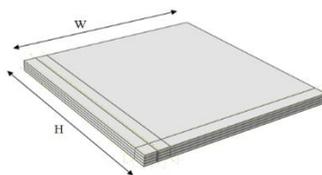


Figure .1 : Modèle descriptive de la géométrie étudiée

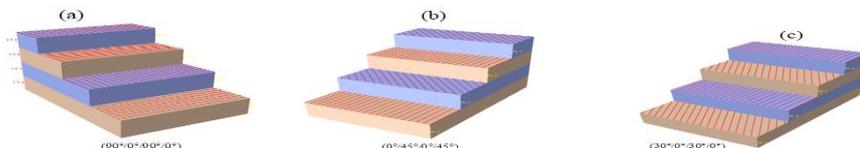


Figure 2 : Modèle descriptif de quatre différents angles étudiés

2.1- Les caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques de la plaque sont regroupées sur le tableau 1.

Tableau 1 : Propriétés mécaniques des différents matériaux.

	Bore/époxyde	Glace/époxyde	Graphite/époxyde
E_1 (GPa)	200	50	127.5
E_2 (GPa)	19.6	25	9.00
E_3 (GPa)	19.6	25	4.80
ν_{12}	0.3	0.21	0.342
ν_{13}	0.28	0.21	0.342
ν_{23}	0.28	0.21	0.38
G_{12} (GPa)	7.2	7.2	4.8
G_{13} (GPa)	5.5	5.5	4.8
G_{23} (GPa)	5.5	5.5	2.55
$\alpha_{12}(10^{-6} \text{ C}^\circ)$	4.5	5.5	-1.2
$\alpha_{13}(10^{-6} \text{ C}^\circ)$	23	15	34
$\alpha_{23}(10^{-6} \text{ C}^\circ)$	23	15	34

2.2. Conditions aux limites

Les conditions aux limites de fixation, subordonnées aux conditions de symétrie de la géométrie, ont été introduites dans la phase initiale. Ces conditions sont représentées comme suit en 3D : Axi-symétries par rapport à Y. ($U_1=U_3= 0$; $UR_2=0$)

3. Méthode des éléments finis

Un des problèmes dans la modélisation des structures fissurées est la description géométrique de la fissure. Dans le cadre de la méthode des éléments finis, elle est décrite explicitement et fait partie intégrante des frontières du maillage. Dans le cadre de cette étude, et Pour des raisons de symétrie seul le quart de la structure est pris en considération et est modélisé par des éléments linéaires briques à 8 nœuds. Le maillage de l'éprouvette utilisée pour l'analyse numérique tridimensionnelle est représenté sur la figure .3. Par conséquent, un maillage raffiné est effectué autour de la fissure pour les trois plaques dont les tailles de fissures sont égales à 5, 10 et 20 mm ; le nombre de nœuds est égal à 9422 et le nombre d'éléments est égal à 7632.

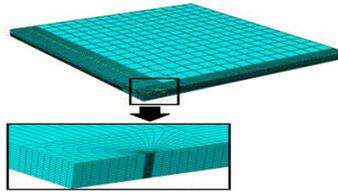


Figure 3 : Maillage utilisé de la structure au voisinage de la fissure

4. Analyse des résultats

4.1- Effet des propriétés du composite

$$J_e = \frac{K_I^2}{E'} \quad (1)$$

Avec : $E=E'$ en contrainte planes ; $E=E/(1-\nu^2)$ en déformation planes

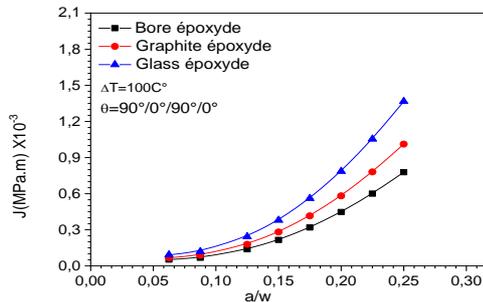


Figure 4 : Variation de l'intégrale J pour quatre différents angles de fibre et trois différents composites pour une plaque carrée en fonction de la taille de fissure.

On peut voir clairement dans cette figure que le Bore/époxyde donne de bonne performance par rapport aux autres composites. Ce type de matériau composite est recommandé pour son utilisation durant la réparation des structures et pour cela notre étude comportera le Bore/époxyde durant l'analyse.

4.2- Effet de l'orientation des fibres

La figure .5 montre la variation de l'intégrale J pour quatre différents angles de fibre de composite pour une plaque carrée en fonction de la taille de fissure. Il est clair que l'augmentation de la taille fissure engendre une augmentation de l'intégrale J. On remarque que pour le composite d'angle de fibre $\theta=90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$ engendre une diminution de la valeur de l'intégrale J de 40% par rapport au composite d'angle de fibre $\theta=45^\circ/0^\circ/45^\circ/0^\circ$ et de 52% par rapport au composite d'angle de fibre $\theta=30^\circ/0^\circ/30^\circ/0^\circ$.

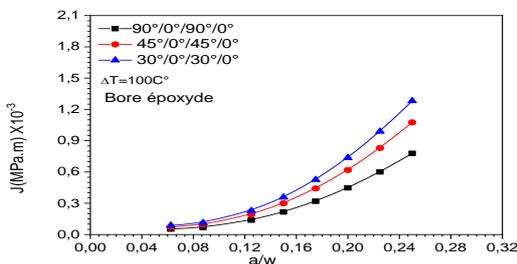


Figure 5 : Variation de l'intégrale J pour quatre différents angles de fibre de composite pour une plaque carrée en fonction de la taille de fissure.

4.3- Effet de la forme des plaques

On peut voir clairement dans cette figure que la forme carrée donne de bonne performance par rapport à la plaque de forme rectangulaire car pour une taille de fissure $a=20\text{mm}$ la différence est de 35% et atteint les 70% pour une forme trapézoïdale.

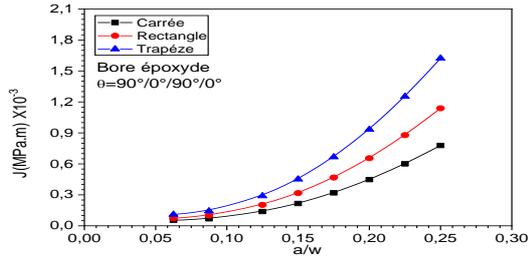


Figure 6 : Variations de l'intégrale J en fonction de la longueur de fissure pour différentes formes géométriques

4.4- Effet de la température

La figure .7 met en évidence la variation de l'intégrale J en mode I en fonction de la longueur de fissure pour trois différentes variations de températures ($\Delta T=100, 150, 200$) °C, pour une plaque de forme carrée. La valeur de l'intégrale J est proportionnelle à la taille de fissure et que l'augmentation de la variation de température augmente l'intégrale J.

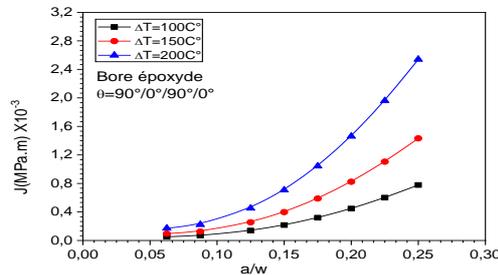


Figure 7 : Variations de l'intégrale J en fonction de la longueur de fissure pour trois différentes valeurs de (ΔT)

5. Analyse probabilistique de la rupture mécanique

La probabilité de défaillance est prédite par la modélisation des incertitudes dans la charge appliquée. Les propriétés des matériaux et la géométrie des structures sont prises comme des variables aléatoires qui sont définies spécifiquement par les fonctions de distribution de probabilité. On considère une structure avec des caractéristiques mécaniques et géométriques qui est soumise à des charges aléatoires. On désigne par X un vecteur aléatoire à N dimensions avec des composants qui caractérisent toutes les incertitudes dans le système et des paramètres de charge. Par

exemple, les composantes aléatoires possibles sont les suivantes : Les paramètres géométriques, H , W , a , et les propriétés mécaniques, E , ν , α . L'ensemble ou une partie de ces variables peuvent être modélisées comme des variables aléatoires. Par conséquent, toute réponse pertinente à la rupture, telle que le $J(X)$, doit être évaluée par la probabilité. La fonction de densité est évaluée en utilisant la méthode Monte-Carlo. L'idée de base est de prélever des échantillons au hasard pour les paramètres d'entrée, puis calculer la réponse pour chaque échantillon par la méthode de Monte-Carlo. Une analyse statistique des ensembles de réponses est fournie pour atteindre une grande précision des résultats, nous avons réalisé 105 simulations. La Figure.8 représente les histogrammes du (J) obtenus par les simulations de Monte Carlo. La fonction de densité de probabilité (pdf) est obtenue en ajustant l'histogramme avec des modèles théoriques à partir de la figure 8.

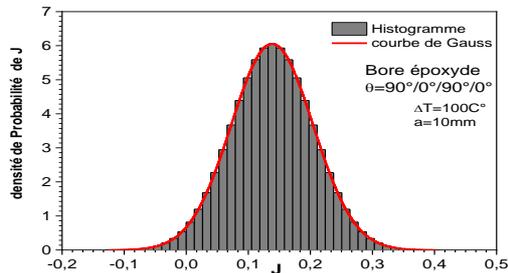


Figure 8 : Histogramme et Probabilité de la fonction de densité de J

Dans la conception basée sur la fiabilité, les incertitudes sont prises en compte en considérant la marge de sécurité (J) (x_i) décrite en termes de variables aléatoires (x_i) qui définissent les incertitudes. La marge de sécurité (J) (x_i) est la règle de conception probabiliste, qui définit la sécurité de la plaque par la condition (J) (x_i) > 0 et la défaillance de la plaque par (J) (x_i) < 0 . Les figures 9 et 10 représentent respectivement la densité de probabilité de (J) pour différentes valeurs de (σ) et de longueurs de la fissure (a). On constate que lorsque la contrainte est élevée, la valeur de la densité de probabilité de (J) est faible. On peut voir que la marge augmente de manière significative avec les incertitudes liées à la longueur de la fissure, ce qui conduit à une probabilité de défaillance plus

grande, enfin les probabilités de rupture dépendent de la longueur de la fissure (a).

a) b)

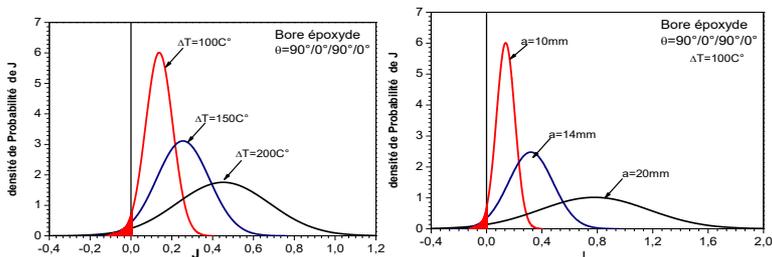


Figure 9 : Densité de probabilité de l'intégrale J pour a) différentes valeurs de ΔT pour b) différentes valeurs de longueurs de fissures.

Conclusion

La discontinuité géométrique que constitue la fissure peut, sous certaines conditions de chargement, conduire à une fuite désastreuse où même la ruine complète de la structure. L'objectif de notre étude est de mettre en évidence l'analyse de l'endommagement des plaques en composite ainsi que les résultats obtenus. Les résultats de l'analyse montrent que :

- Pour le composite où l'orientation des fibres est de $\theta=90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$ on observe une diminution importante de l'intégrale J par rapport au composite d'angle de fibre $\theta=45^\circ/0^\circ/45^\circ/0^\circ$ et de celui d'angle de fibre $\theta=30^\circ/0^\circ/30^\circ/0^\circ$ ainsi on peut conclure que l'angle des fibres des composites joue un rôle déterminant sur la résistance et la durée de vie des structures.

- La forme carrée donne de bonne performance par rapport aux plaques de formes trapézoïdale et rectangulaire.

- La probabilité de défaillance de la structure est liée étroitement à la taille de fissure (a) et diminue avec l'augmentation de la charge.

Références

- [1] L Berreur, B de Maillard, S Nösperger, 2 du 13 mai 2002 « L'industrie française des matériaux composites »
- [2] RENARD, J, « Elaboration, microstructure et comportement des matériaux composites à matrice polymère », Lavoisier, 2005.



- [3] Pinzelli R.F, Vanthier D, « Renforts Mixtes de Fibres kevlar et Verre-E Pour composites Marins », Journée du Verre Textile/Composites Conférence, Paris. (1984)
- [4] BERTHELOT.J.-M,« Matériaux composite : Comportement mécanique et analyse déstructures »,1999.
- [5] Griffith A.A, The phenomena of ruptures and flow in solids, transactions. Royal soc. London, serie A, p.163-198. (1920).