

Comportement d'une fissure 3D émanant d'entaille circulaire renforcée par patch composite

Hadja Imane BELOUFA¹, Djamel OUINAS¹, Mostapha TARFAOUI²

¹Laboratoire de Modélisation Numérique et Expérimentale des Phénomènes Mécaniques
Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, 27000, Algérie

²Laboratoire de Brestois de Mécanique et des Systèmes (LBMS)
ENSTA Bretagne, 2 Rue François Verny, 29806 Brest Cedex 9, France.
imane.h91@hotmail.fr

Résumé - La technique de réparation par collage d'une structure endommagée est utilisée pour réduire le facteur d'intensité de contraintes K_I en tête de fissure. La propagation de la fissure peut être arrêtée ou réduite de manière significative en augmentant ainsi la durée de vie de la structure. Dans cette étude, la méthode des éléments finis est utilisée pour analyser l'effet de la présence d'une fissure émanant d'entaille circulaire sur le comportement d'une éprouvette en aluminium tridimensionnelle, réparée et non par un patch en composite. Le patch est collé avec une couche adhésive sur la partie endommagée en calculant les facteurs d'intensité de contrainte (FIC) aux pointes de la fissure en mode I. Les résultats obtenus montrent que, le FIC à la pointe de la fissure réparée par le patch en composite d'une hauteur 35mm, est réduit de 22% par rapport à celui réparée par un patch de hauteur 10mm. Cette valeur demeure constante jusqu'à la hauteur $h=80$ mm.

Mots Clés : Patch en composite, Fissure, Entaille circulaire, Facteur d'intensité de contraintes (FIC), Méthode des éléments finis.

Nomenclature

<i>FIC</i>	Facteur d'intensité de contraintes, $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$.	<i>H</i>	Hauteur, mm.
K_I	Facteur d'intensité de contraintes en mode I, $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$.	<i>W</i>	Largeur, mm.
<i>a</i>	Taille de la fissure, mm.	<i>e</i>	Épaisseur, mm.
σ	Contrainte, MPa.	<i>d</i>	Diamètre, mm.

1. Introduction

Les patchs composites sont actuellement très largement utilisés pour réparer des pièces métalliques en aéronautique [1,2]. Pour des raisons évidentes de sécurité, une pièce endommagée se doit être remplacée avant toute défaillance, ce qui peut entraîner des coûts très élevés. Une autre solution consiste à réparer une pièce endommagée sans la changer. Enfin une alternative à la réparation est le renforcement préventif par patchs composites. Ces derniers permettent de soulager une zone fortement sollicitée en réorientant le flux des efforts.

Ainsi les patchs composites sont utilisés non seulement comme un moyen de réparation mais comme un renforcement préalable des structures. L'efficacité du renfort dépend évidemment du nombre de plis du patch composite [3], de sa forme [4] et de sa taille [5].

Il est bien connu que la méthode des éléments finis donne avec une grande précision les facteurs d'intensité de contraintes en pointe de fissure. Parmi les auteurs utilisant la méthode de calcul du

facteur dans le cas des fissures renforcées, on peut citer [6-9]. Une étude a été réalisée sur la réparation d'une fissure émanant d'entaille par un patch en composite semi-circulaire par Ouinas and al. [10], qui a démontré l'efficacité de l'utilisation du patch en composite dans la réparation.

L'objet de cette étude est d'analyser le comportement d'une fissure émanant d'entaille circulaire avec et sans le renforcement par un patch en composite en mode I en utilisant la méthode des éléments finis. Le patch de réparation est le bore/époxyde qui est utilisé avec beaucoup de succès [11-16]. Les effets des épaisseurs de la couche adhésive et du patch composite sur les variations de facteur d'intensité de contraintes sont ainsi examinés.

2. Modèle géométrique

On considère une éprouvette rectangulaire mince en aluminium trouée avec une entaille circulaire centrale ($d=6\text{mm}$), ayant les dimensions suivantes : longueur $H = 200\text{mm}$, largeur $W = 20\text{mm}$ et l'épaisseur $e_p = 1\text{mm}$.

On suppose l'existence de deux fissures émanant d'entaille et perpendiculaire au plan de sollicitation. L'éprouvette considérée est sollicitée en traction uni-axiale dans la direction verticale "y" sous la contrainte appliquée d'amplitude $\sigma = 100\text{MPa}$.

La fissure est réparée par un patch en matériau composite en bore/époxyde dont les dimensions sont: hauteur variable h , largeur $w=20\text{mm}$, et l'épaisseur e_R .

Les propriétés de la couche adhésive sont : le module de cisaillement $G_a=965\text{MPa}$ et l'épaisseur e_a . Les caractéristiques mécaniques des matériaux de l'assemblage sont reportées dans le Tableau 1. La Figure 1 montre le modèle géométrique de la structure utilisée.

Dans le calcul on a employé le code commercial des éléments finis ABAQUS V.6.14-2.

Tableau 1 : Propriétés Mécaniques.

Propriété	Éprouvette Al	Boron/epoxy	Couche Adhésif
E_1 (GPa)	72	208	
E_2 (GPa)		25.4	
ν_{12}	0.33	0.1677	0.32
G_{12} (GPa)		7.2	0.965
G_{13} (GPa)		7.2	
G_{23} (GPa)		4.13	

Nous avons utilisé pour l'éprouvette 8924 éléments hexaédriques quadrilatéraux et 59636 nœuds de type C3D20R et en présence de la fissure centrale, le nombre des éléments quadrilatéraux augmente en augmentant la taille de la fissure avec un maillage raffiné au voisinage de cette fissure, comme le montre la Figure 1.

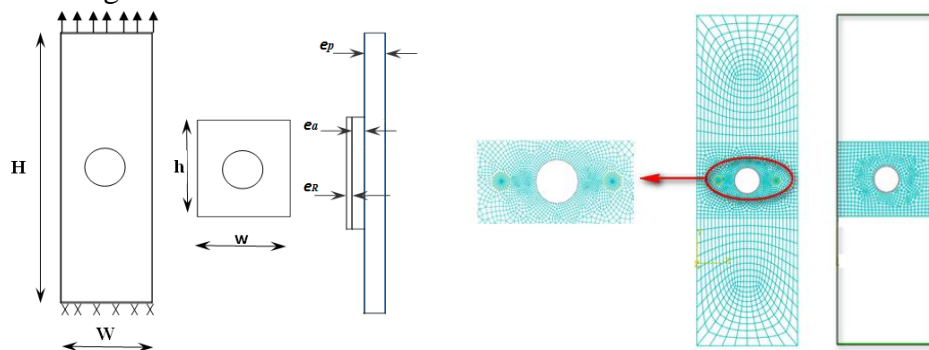


Figure 1 : Modèle géométrique et maillage de la structure (Éprouvette et patch).

3. Effet de la hauteur du patch à différentes orientations des plis

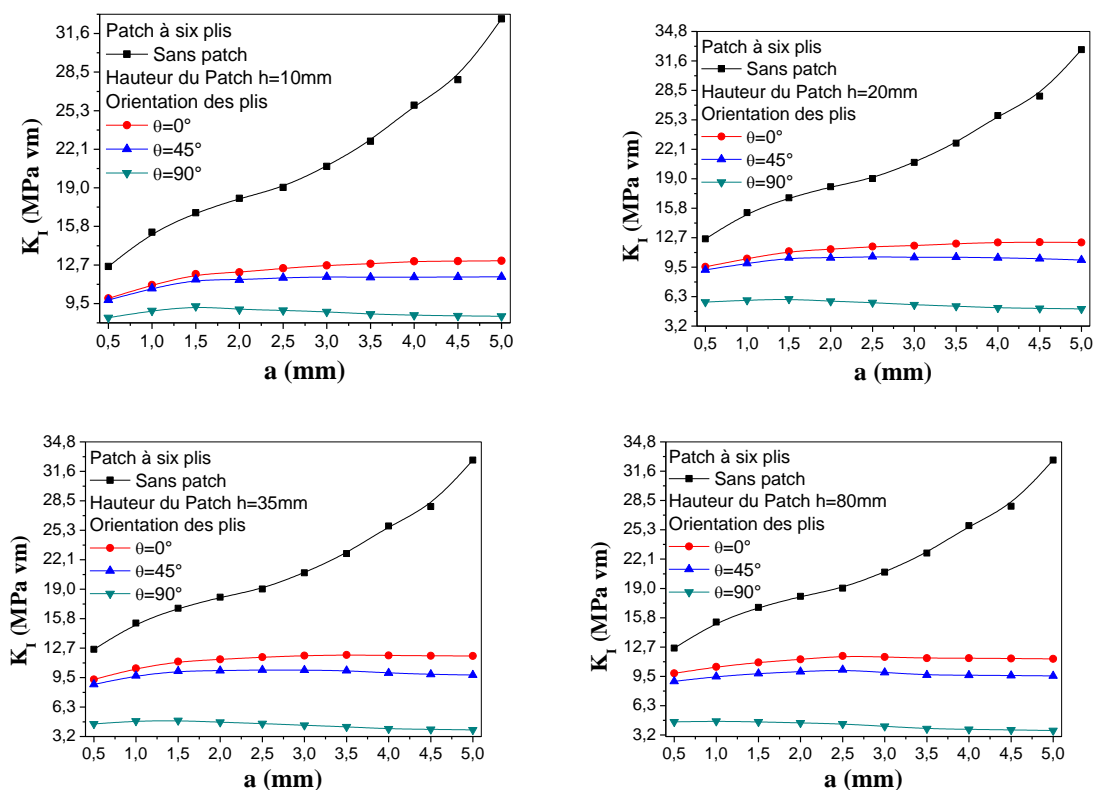


Figure 2 : Evaluation du FIC en fonction de la taille de la fissure pour différentes hauteurs du patch.

Le matériau du patch influence directement la variation du FIC. Une éprouvette en aluminium qui contient une entaille circulaire centrale, a été choisie, réparée avec un patch en composite dont les propriétés mécaniques sont constantes tout en variant la forme géométrique. L'analyse consiste à faire varier la longueur de la fissure émanant d'entaille, réparée tout en conservant les mêmes caractéristiques mécaniques de l'éprouvette et du patch.

Sur la Figure 2, on montre la variation du FIC en fonction de la longueur de la fissure pour différentes orientations des plis du patch ($\theta=0^\circ, 45^\circ$ et 90°) de hauteurs $h=10\text{mm}$, 20mm , 35mm et 80mm . Le patch considéré comporte 6plis.

Lorsque la hauteur du patch $h=10\text{mm}$, il est à noter que le FIC croît avec l'accroissement de la longueur de la fissure lorsque les fibres sont orientés à 0° et 45° . Par contre nous remarquons une légère diminution lorsque les fibres du patch sont orientées à 90° à partir d'une taille de fissure $a=1.5\text{mm}$, ceci peut être due du l'effet d'entaille centrale sur le FIC.

L'évolution de la réduction du FIC par rapport à la longueur de la fissure pour des différentes hauteurs du patch est aussi représentée sur la Figure 3. Cette réduction est définie par [11]:

$$K_{RI} = 1 - \frac{K_p}{K_s} \quad (1)$$

Où K_p et K_s sont les FIC de la fissure avec et sans patch respectivement.

Lorsque le patch de renforcement à six plis a une hauteur $h=10\text{mm}$, la réduction du FIC atteint l'ordre de 20% et 24% respectivement pour les orientations des plis $\theta=0^\circ$ et 45° , elle augmente

jusqu'à 34% pour une orientation des plis à 90°. Par contre, la réduction du FIC est proportionnelle à l'augmentation de la hauteur du patch, ceci montre que l'accroissement de la surface de contact patch-éprouvette conduit à une réduction meilleure.

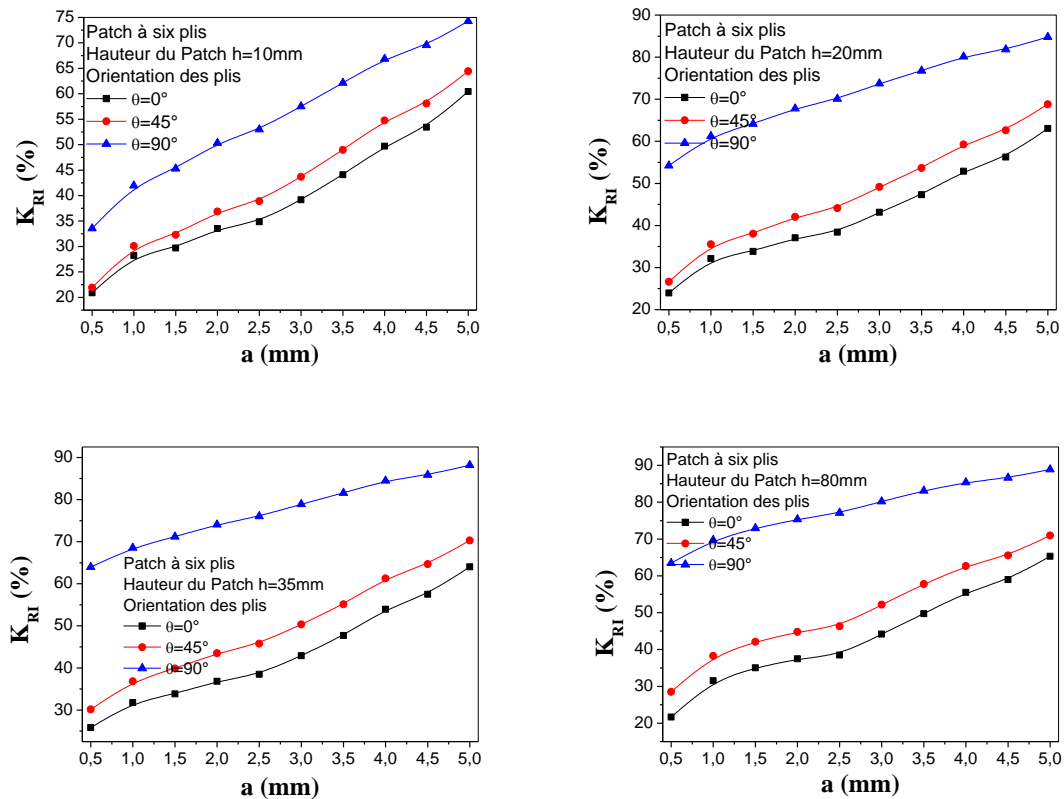


Figure 3 : Evaluation du FIC en fonction de la taille de la fissure 'a' pour différentes hauteurs du patch.

Quand la hauteur du patch à six plis égale 35 mm, la réduction du FIC atteint 64% lorsque l'orientation des fibres est perpendiculaire à la propagation de la fissure, qui demeure constante avec l'augmentation de la surface de contact éprouvette-patch jusqu'à la hauteur h=80mm. La réduction est maximale pour la plus grande taille de la fissure et est de l'ordre 92%. Elle égale 64% et 70% pour les orientations des fibres 0° et 45° successivement.

4. Influence de l'épaisseur de l'adhésive

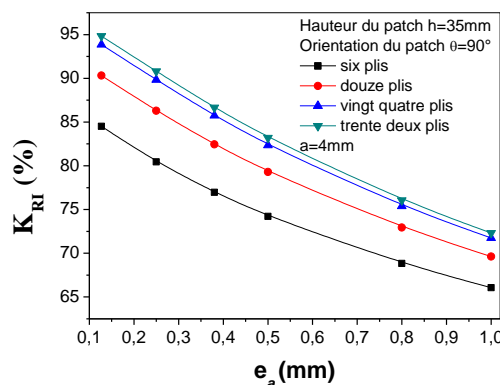


Figure 4: Evaluation de la réduction du FIC en fonction d'épaisseur de couche adhésive (a=4mm).

La réduction de FIC K_I en fonction de l'épaisseur de la couche adhésive, est représentée sur la Figure 4. On peut constater dans cette figure, que l'accoisement de l'épaisseur de la colle diminue la valeur du facteur d'intensité de contraintes, ce qui signifie qu'une faible épaisseur de la couche adhésive est souhaitable pour réparer les structures endommagées.

Une grande épaisseur renforce l'adhésion mais réduit la capacité d'absorption du champ de contraintes par le patch de réparation. Sur la Figure 4 où l'orientation des plis (six plis) est perpendiculaire à la propagation de la fissure, la réduction du FIC varie entre 65% au 85% lorsque l'épaisseur de la couche adhésive croît de 0.127mm à 1mm, pour une taille de fissure $a=4\text{mm}$. En augmentant le nombre de plis, la valeur de réduction du FIC devient plus importante, elle peut atteindre 95%.

5. Influence de l'épaisseur du patch

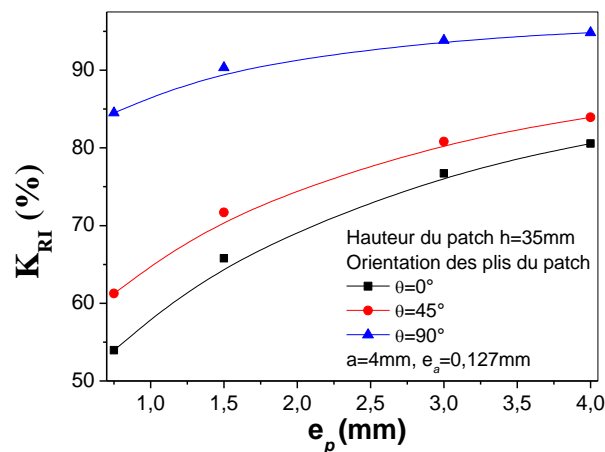


Figure 5 : Evaluation de la réduction du FIC en fonction d'épaisseur du patch ($a=4\text{mm}$).

La Figure 5 montre l'effet de l'épaisseur du patch sur la variation du facteur de réduction d'intensité de contraintes pour une taille de fissure $a=4\text{mm}$.

On peut constater que l'augmentation de l'épaisseur du patch de réparation réduit la valeur du FIC K_I aux pointes de la fissure de façon proportionnelle. Il est à noter que, la réduction maximale avec une orientation des plis 90° , atteint 94% pour une taille de fissure de 4 mm. Ceci confirme que le choix du patch épais améliore les performances de la structure.

6. Conclusion

Le but de cette étude est d'analyser la performance de la technique de réparation des structure par un patch en composite collé sur une éprouvette sollicitée à une traction contenant une fissure centrale. A cet effet, on dégage les constatations suivantes :

- Le facteur d'intensité de contraintes à la pointe de la fissure est inversement proportionnel à l'augmentation de la rigidité du patch et ses caractéristiques géométriques.
- Un patch de hauteur 35mm réduit le facteur d'intensité de contraintes de plus de 22% en comparaison avec un patch de hauteur 10mm.

- La réduction maximale relative du facteur d'intensité de contraintes K_I est de l'ordre de 94% pour une hauteur de patch en composite égale 35mm qui demeure constante jusqu'à une hauteur $h=80$ mm.
- Le choix de l'épaisseur de la couche adhésive pour la réparation des fissures doit être optimisé.

References

1. A.A. Backer, R. Jones, Bonded repair of aircraft structures. Martinus Nijhoff Publishers, 1998.
2. A.A. Backer, R. Jones, Advances in the bonded composite repair of metallic aircraft structures. Elsevier, 2002.
3. H. Toudeshky, G. Sadeghi, H.R. Daghyani, Experimental fatigue crack growth and crack-front shape analysis of asymmetric repaired aluminium panels with glass epoxy composite patches. Composite Structures. 71, 2005, 401-406.
4. J.D Mathias, X. Balandraud, M. Grédiac, Applying a generic algorithm to the optimization of composite patches. Computers and Structures. 84, 2006, 823-834.
5. K.H. Chung, & X.H. Yang, A study of the fatigue crack growth behaviour of thick aluminium panels repaired with a composite patch. Composite Structures. 60, 2003, 1-7.
6. B. Bachir Bouiadjra, M. Belhouari & B. Serier, Computation of the stress intensity factor for repaired cracks in mode I and mixed mode. Comp. Struct. 54, 2002, pp.401-406.
7. T. Ting, R. Jones, WK. Chiu, IH. Marshal & JM. Greer, Composite repairs to rib Stiffened pannel. Comp. Struct., 47, 1999, pp. 737-743.
8. R.J. Callinan, LR.F. Rose & C.H. Wang, Three dimensional stress analysis of crack patching. In: Proceedings of international Conference on Fracture, ICF-9, 1997, pp.2151-8.
9. R. Jones, WK. Chiu, Composite repairs to crack in metallic components. Compos Struct. 1999, 62:431-43.
10. D. Ouinas, B. Serier and B. Bachir Bouiadjra, Computation of the stress intensity factors for repaired cracks at notch with bonded composite semi-circular patch in mode I and mixed mode., 4th International Forum on Advanced Material Science and Technology 4-7 juillet 2004, UTT, Troyes, France.
11. D. Ouinas, B. Bachir Bouiadjra, B. Serier and M. Belhouari, Analysis of cracked aluminium plate repaired with bonded composite octagonal patch. Congress International 15 May 2005.
12. B. Bachir Bouiadjra, D. Ouinas, B. Serier, N. Benderdouche , Disbond effects on bonded boron/epoxy composite repair to aluminium plates. Computational Materials Science, Volume 42, Issue 2, April 2008, Pages 220-227.

13. P. Chalkley, A. Rider, Toughening boron/epoxy bonded joints using the resin film infusion technique, Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 34, Issue 4, April 2003, Pages 341-348.
14. T.E. Tay, F.S. Chau, C.J. Er, Bonded boron-epoxy composite repair and reinforcement of cracked aluminium structures, Composite Structures, Volume 34, Issue 3, March 1996, Pages 339-347.
15. A.A Baker, Growth characterisation of fatigue cracks repaired with adhesively bonded boron/epoxy patches, Advances in Fracture Research, 1997, pp, 117-128.
16. D. Ouinas , B. Serier , B. Bouiadjra, Calcul numérique des paramètres de rupture d'une plaque fissurée renforcée par un patch métallique circulaire en mode I et mode mixte. Revue des composite et des matériaux avancés 2003, 12(2).