

Renforcement des fissures tridimensionnelle émanant d'entaille circulaire par patch en composite

H.I. BELOUFA^a, D. OUINAS^a

^a Laboratoire de modélisation numérique et expérimentale des phénomènes mécaniques
Département de Génie Mécanique-Université de Mostaganem-Algérie
douinas@netcourrier.com
imane.h91@hotmail.fr

Résumé :

Des patches en matériaux composites sont classiquement utilisés dans l'aéronautique pour la réparation des structures métalliques présentant des dommages de type fissures, criques ou impacts. Une alternative à la réparation de ces structures consiste à les renforcer préventivement, avant que les défauts n'apparaissent. Dans cette étude, la méthode des éléments finis est utilisée pour analyser l'effet de la présence d'une fissure émanant d'entaille sur le comportement d'une plaque en aluminium tridimensionnelle, réparée et non par un patch rectangulaire en composite (boron/époxy). 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. L'influence des épaisseurs de la couche adhésive et du patch en composite, l'effet de la géométrie du patch et la longueur de la fissure sur le facteur d'intensité de contraintes sont aussi examinés. 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=80mm. La réduction maximale du FIC obtenue par un patch en composite de fibres dans la direction y est d'environ 92% par rapport à la plaque d'aluminium non réparée. Une couche d'adhésive plus mince permet de transmettre des contraintes élevées vers le patch de réparation. Il est préférable d'utiliser un patch en composite constitué de plusieurs plis pour réparer les structures fissurées.

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

Abstract:

Bonded composite patches are used as structural repairs in several fields of application such as civil engineering for damaged concrete structures or aeronautics for components which exhibit damages, defects or impacts. A similar case of application consists in using patches for the prevention of defect propagation. In this study, the finite element method is used to analyze the effect of the presence of cracks emanating from a circular notch edge, on the behavior of an aluminum plate in three-dimensional, repaired and not repaired by a rectangular patch composite (boron / epoxy). The patch is adhered with an adhesive layer on the damaged portion by calculating stress intensity factors (SIF) to the tip of the crack in mode I. The influence of the thicknesses of the adhesive layer and the patch composite, the

effect of the geometry of the patch and the length of the crack on the stress intensity factor are also highlighted. The results obtained show that, the SIF crack tip repaired by the patch composite of a height 35mm is reduced by 22% compared to the repaired by a 10mm height patch. This value remains constant up to the height $h=80\text{mm}$. The maximum reduction in composite fiber patch in the y direction is about 92% compared with the unrepaired aluminum plate. A thinner adhesive layer can transmit high stress to the repair patch. It is preferable to use a composite patch contains several layers to repair cracked structures.

Keywords: Patch Composite, Cracks, Circular notch, Adhesive layer, The stress intensity factor (SIF), Finite element method.

1 Introduction

La naissance des fissures dans une structure métallique dans n'importe quel domaine telles que les structures aéronautiques et les structures marines, est une préoccupation majeure des opérateurs de maintenance [1].

La réparation de ces fissures par collage avec un patch en matériaux composite, a attesté son efficacité pour réduire le facteur d'intensité de contraintes (FIC) aux pointes de la fissure, et offrir de nombreux avantages, d'amélioration du comportement de la fatigue, de la corrosion réduite et une bonne performance qui conduisent à améliorer la vie de la structure endommagée [2-7].

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 [8-11]. Une étude a été réalisée sur la réparation d'une fissure émanant d'entaille circulaire par un patch en composite semi-circulaire [12].

L'objet de cette étude est d'analyser le comportement d'une fissure émanant d'entaille avec et sans le renforcement par un patch en composite d'une plaque en aluminium en mode I en utilisant la méthode des éléments finis. Le patch de réparation est le boron/epoxy qui est utilisé avec beaucoup de succès par de nombreux chercheurs [12-17]. Les effets des épaisseurs de la couche adhésive et du patch en composites sur les variations de facteur d'intensité de contraintes sont ainsi examinés.

2 Modèle géométrique

On considère une plaque rectangulaire mince en aluminium avec une entaille 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. La plaque considérée est sollicitée en traction uni-axiale dans la direction verticale "y" sous la contrainte appliquée d'amplitude $\sigma = 100\text{MPa}$.

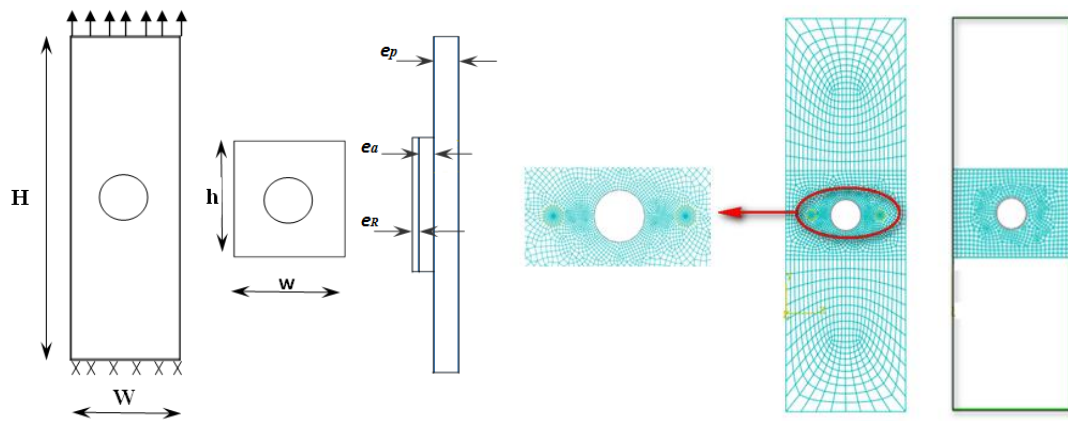
La fissure est réparée par un patch en matériau composite en boron/époxy dont les dimensions sont: hauteur h , largeur $w=20\text{mm}$, et l'épaisseur e_R .

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 Tab. 1 et La Fig. 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

Tab. 1. Propriétés Mécaniques.

Propriété	Plaque AL	Boron/epoxy	Couche Adhésif
E_1 (MPa)	$72 \cdot 10^3$	$208 \cdot 10^3$	
E_2 (MPa)		$25.4 \cdot 10^3$	
ν_{12}	0.33	0.1677	0.32
G_{12} (MPa)		$7.2 \cdot 10^3$	965
G_{13} (MPa)		$7.2 \cdot 10^3$	
G_{23} (MPa)		$4.13 \cdot 10^3$	

**Fig. 1.** Modèle géométrique et maillage de la structure (Plaque et patch).

3 Effet de la hauteur du patch à différent orientations du pli

Les paramètres de la rupture sont influencés par la rigidité du patch, la taille et la surface de la zone de contact plaque-patch et la résistance d'adhésif [18]. Le matériau du patch influence directement la variation de FIC. Une plaque en aluminium qui contient une entaille circulaire centrale, a été choisi 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 emmenant d'entaille, réparée tout en conservant les mêmes caractéristiques mécaniques de la plaque et du patch.

Sur la Fig. 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 ; à savoir 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 $a=1.5\text{mm}$, sa peu être due du l'effet d'entaille centrale sur le FIC. Le FIC d'une fissure de taille 5mm est de l'ordre 60% plus important en comparaison avec une taille de $a=0.5\text{mm}$.

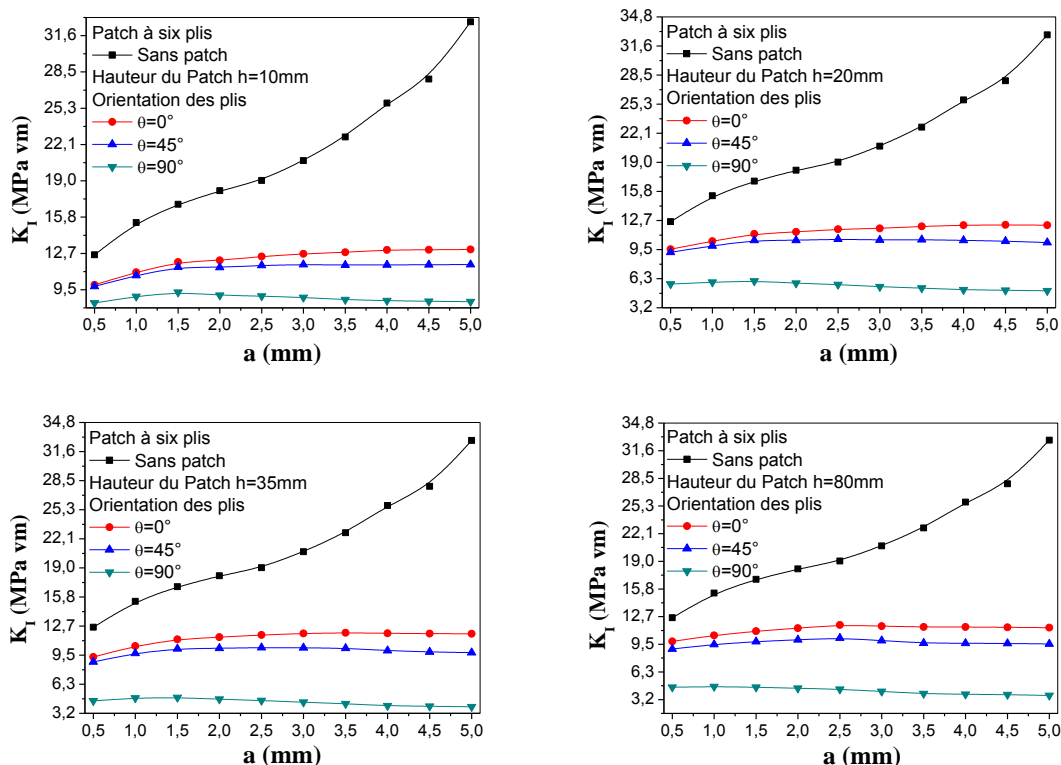


Fig.2. Evaluation de Facteur d'intensité de contrainte FIC en fonction de la taille de la fissure pour différentes hauteurs du patch.

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 Fig. 3. Cette réduction est définie par [13]:

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

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

Lorsque le patch de renforcement $h=10\text{mm}$ à six plis, 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° . La même constatation est notée pour différents, hauteur h du patch en composite, lorsque le FIC augmente avec la longueur de la fissure. 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-plaque conduit à une réduction meilleure.

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 l'avancé de la fissure, qui demeure constante avec l'augmentation de la surface de contact plaque-patch jusqu' à la hauteur $h=80\text{mm}$. La réduction est maximale pour la plus grande taille de la fissure et est de l'ordre 89%. Elle égale 46% et 70% pour les orientations des fibres 0° et 45° successivement.

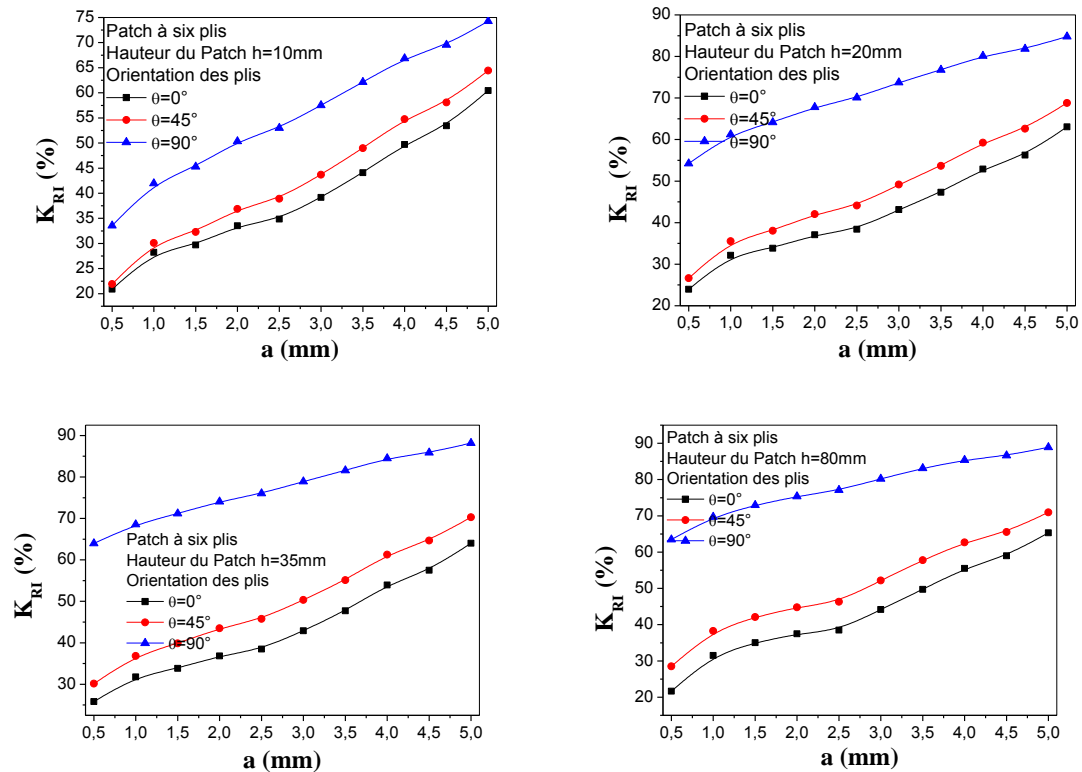


Fig. 3. Evaluation de la réduction de Facteur d'intensité de contrainte FIC en fonction de la taille de la fissure a pour différentes hauteurs du patch.

4 Influence de l'épaisseur de l'adhésive

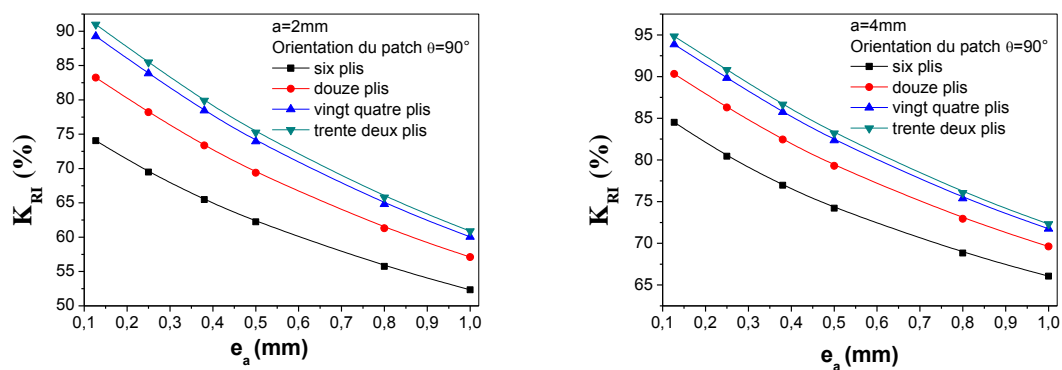


Fig. 4. Evaluation de la réduction du FIC en fonction d'épaisseur de couche adhésive.

La réduction de FIC en fonction de la longueur de la fissure pour différents valeurs de l'épaisseur de la couche adhésive, est représentée sur la Fig. 4. On peut constater dans cette figure, que l'accroissement de l'épaisseur de la colle diminue la valeur du facteur d'intensité de contraintes.

Sur la Fig. 4. Ou l'orientation des plis (six plis) est perpendiculaire à l'avancé de la fissure, la réduction du FIC varie entre 52% et 75% lorsque l'épaisseur de la couche adhésive accroît de 0.127mm au

1mm, avec une taille de fissure $a=2\text{mm}$; par contre elle augmente de 65% au 85% lorsque la longueur de la fissure égale à $a=4\text{mm}$.

En augmentant le nombre de plis, la valeur de réduction du FIC devient plus importante, elle peut atteindre 95%. Donc une faible épaisseur de la couche adhésive est souhaitable pour réparer les structures endommagées.

5 Influence de l'épaisseur du patch

La Fig. 5. Montre l'effet de l'épaisseur du patch sur la variation du facteur de réduction d'intensité de contraintes en fonction de la longueur de la fissure.

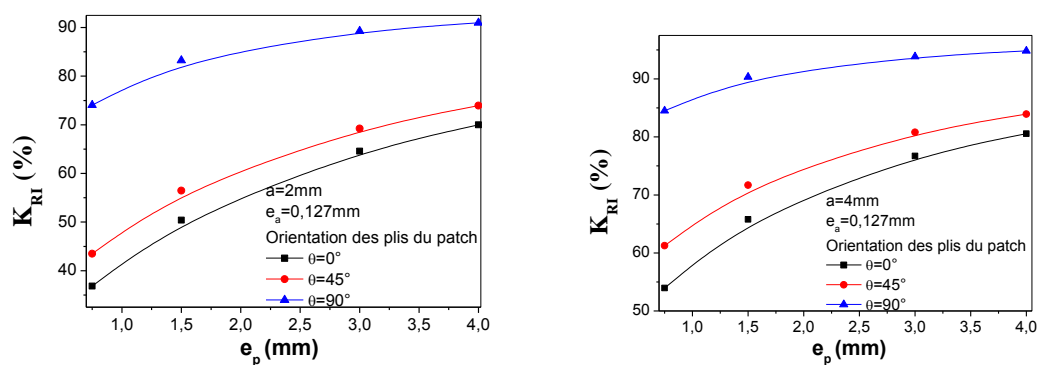


Fig. 5. Evaluation de la réduction du FIC en fonction d'épaisseur du patch.

On peut constater que, l'augmentation de l'épaisseur du patch de réparation réduit la valeur du FIC aux pointes de la fissure de façon proportionnelle. Il est à noter que, la réduction maximale avec une orientation des plis 90° , atteinte 90% et 94% pour une taille de fissure $a=2\text{mm}$ et 4mm respectivement. Ceci confirme que le choix du patch épais améliore les performances de la structure. Pour une meilleure distribution des contraintes, il est préférable d'utiliser un patch en composite qui contient de plusieurs plis pour réparer les structures fissurées.

Conclusion

Le but de cette étude était d'utiliser la méthode des éléments finis pour étudier la performance de la technique de réparation des structure par un patch en composite collé sur une plaque 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 fissures avec le patch collé doit être optimisé.
- 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 92% pour une hauteur de patch en composite égale 35mm qui demeure constante jusqu'à une hauteur $h=80$ mm du patch.
- Le choix des épaisseurs de la couche adhésives et du patch collé pour la réparation de fissures doivent être optimisés.

Références

- [1] CHAPUIS, B. OSMONT D, 2010. « Contrôle santé intégré par méthode ultrasonore des réparations composites collées sur des structures métalliques ». Laboratoire Ondes et Acoustique – ESPCI, Université Paris 7, CNRS UMR 7587.
- [2] AA. Baker, R. Jones, Bonded Repair of Aircraft Structures. Martinus Nijhoff: Dordrecht, 1988.
- [3] SN. Atluri. Structural Integrity & Durability, Tech Science Press, Forsyth, Georgia, USA, 1997.
- [4] Atluri SN. Structural integrity and durability. Forsyth, Georgia, USA: Tech Science Press; 1997.
- [5] Rose LRF. A cracked plate repaired by bonded reinforcement. Int J Fract 1982;18:135–44.
- [6] WT. Chow, SN. Atluri, Composite patch repairs of metal structures: adhesive nonlinearity, thermal cycling, and debonding. AIAA J. 35(9): 1997, 1528–1535.
- [7] MR. Lena, JC. Klug, CT. Sun, Composite patches as reinforcements and crack arrestors in aircraft structures. J. Aircraft 35(2): 1998, pp 318–323.
- [8] 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.
- [9] T. Ting, R. Jones, WK. Chiu, IH. Marshal & JM. Greer, Composite repairs to rib Stiffened pannel. Comp. Struct., 47. 1999, pp. 737-743.
- [10] 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.
- [11] R. Jones, WK. Chiu, Composite repairs to crack in metallic components. Compos Struct. 1999, 62:431-43.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Peter Chalkley, Andrew 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.
- [16] 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
- [17] Alan Baker, Growth characterisation of fatigue cracks repaired with adhesively bonded boron/epoxy patches, Advances in Fracture Research, 1997, Pages 117-128.
- [18] Ouinas D, Serier B, Bachir Bouiadjra B. 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) (Ed. Lavoisier).

