
Étude de la réparation des fissures multiples par collage de patchs en composite

Yamina Chelahi Chikr

*Laboratoire de mécanique physique des matériaux (LMPM),
Université Djillali Liabes, cité Ben M'Hidi, BP 89, Sidi Bel Abbès, Algérie
ychelahi@yahoo.com*

RÉSUMÉ. *La présente étude porte sur l'analyse, par la méthode des éléments finis, d'abord, du comportement d'une structure fissurée réparée et non réparée par un patch, ensuite, de l'effet d'interaction entre deux fissures débouchantes se propageant dans des sens opposés. Le facteur d'intensité de contraintes (FIC) et les contraintes adhésives seront calculés ; les déplacements transversal et longitudinal d'une fissure pour une longueur invariable seront étudiés, ainsi que l'effet d'une fissure orientée sur un plan incliné par rapport à la fissure principale. Les résultats obtenus montrent clairement que l'effet d'interaction est déterminant lorsque ces fissures sont très proches voisines l'une de l'autre. Dans ce cas, la distribution des contraintes de cisaillement dans la couche adhésive le long de la ligne virtuelle est analysée aussi par la méthode des éléments finis.*

ABSTRACT. *Using the finite element method, the present study deals first, with the behavior of a cracked structure repaired and not repaired by a patch, then the interaction effect between two surface cracks moving in opposite directions. The stress intensity factors (SIFs) and adhesive stresses will be estimated; the transverse and longitudinal displacements of a crack for an invariable length will be studied, as well as the effect of a crack oriented on a plane inclined with respect to the main crack. The results obtained clearly indicate that the interaction effect is decisive when these cracks are very close to each other. In this case, the distribution of shear stresses in the adhesive layer along the virtual line is also analyzed using the finite element method.*

MOTS-CLÉS : *éléments finis, fissures, déplacements, interaction, facteur d'intensité de contraintes (FIC), contraintes adhésives.*

KEYWORDS: *finite elements, cracks, displacements, interaction, stress intensity factors (SIFs), adhesive stresses.*

DOI: 10.3166/rcma.2017.00025 © 2017 Lavoisier

1. Introduction

Les problèmes d'amorçage et de propagation des fissures de fatigue dans les ailes d'avion constituent une source d'ennuis permanente pour les professionnels du domaine. Les recherches accomplies sur ce domaine visent, dans un premier temps, à tenter de comprendre le phénomène de propagation des fissures pour prédire la durée de vie des structures aéronautiques. Actuellement, de nouvelles techniques développées pour réduire la vitesse de propagation de la fissure consistent en l'assemblage d'une plaque en composite par collage ou rivetage sur la région fissurée qui atténue l'intensité des contraintes en pointe de fissure. Si le rivetage reste moins désiré du fait d'une répartition de contraintes autour de rivet, il n'en demeure pas moins que l'utilisation du collage connaît un développement considérable. Le choix des composites échoit à leur faible densité.

De nombreuses recherches utilisant le « bore-époxy » et le « graphite-époxy » pour réparer les fissures et remplacer la zone sensible des fuselages ont été menées depuis 1977. Par conséquent, le comportement des fissures réparées par collage de composites et prédit une amélioration de l'efficacité de ce type de réparation.

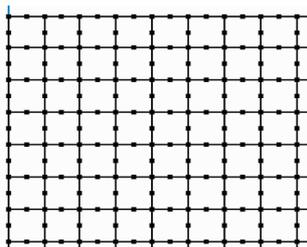
2. Présentation du logiciel

Nous avons utilisé pour nos calculs le logiciel de calcul par éléments finis, FRANC 2D/L (*fracture analysis code bi-dimensional*), développé par le groupe de recherche en mécanique de la rupture (CFG) à l'université Cornell aux États-Unis d'Amérique sous la direction du professeur A. Ingraffea. Cet outil a été spécialement élaboré en vue de la résolution des problèmes bidimensionnels de la mécanique de la rupture. Il a été catalogué par le centre de recherche Langley à la NASA (figure 1).

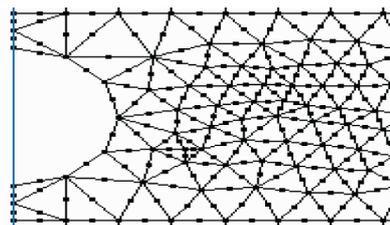
3. Résultats et discussions

3.1. Interaction entre deux fissures en cours de propagation

Dans ce paragraphe, nous allons étudier l'effet d'interaction entre deux fissures qui débouchent et se propagent dans des sens opposés. On calcule le facteur d'intensité de contraintes (FIC) en tête de fissure et les contraintes adhésives.



Les éléments à 8 nœuds



Les éléments à 6 nœuds

Figure 1. Représentation du maillage utilisé en FRANC 2D

3.1.1. Modèle géométrique

Nous avons utilisé une plaque rectangulaire en aluminium de dimensions : hauteur $H_p = 254$ mm, largeur $W_p = 254$ mm, épaisseur $e_p = 3$ mm et dont les propriétés mécaniques sont les suivantes :

- module de Young $E_p = 72$ GPa et un coefficient de Poisson $\nu_p = 0,33$;
- la plaque est sollicitée en traction uniaxiale dans la direction verticale « y » sous la contrainte appliquée d'amplitude $\sigma = 69$ MPa ;
- on suppose l'existence de deux fissures débouchantes de longueur (a) réparées par un patch en boron-époxy de dimension ;
- hauteur $H_r = 127$ mm, largeur $W_r = 127$ mm et épaisseur $e_r = 2$ mm. Le boron-époxy est considéré comme un matériau orthotrope ayant les propriétés suivantes :
 - module de Young longitudinal $E_{rL} = 181\ 000$ MPa,
 - module de Young transversal $E_{rT} = 10\ 300$ MPa,
 - module de Cisaillement $G_r = 5,46$ MPa,
 - coefficient de Poisson longitudinal $\nu_{rL} = 0,3$,
 - coefficient de Poisson transversal $\nu_{rT} = 0,028$;
- propriétés de l'adhésif :
 - le module de cisaillement $G_a = 420$ MPa et l'épaisseur $e_a = 0,2$ mm (figure 2).

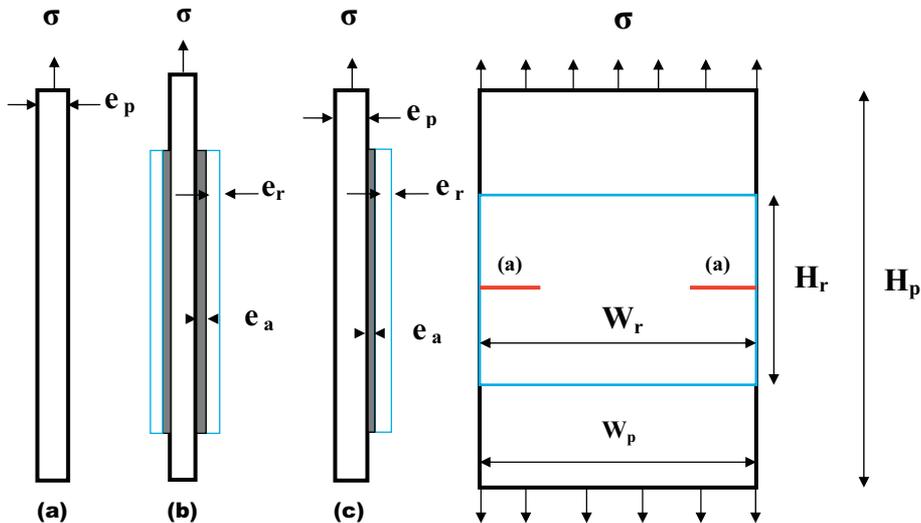


Figure 2. Modèle géométrique et les trois configurations de renforcement : (a) sans l'utilisation du patch ; (b, c) avec l'utilisation du patch (simple et double patch)

3.1.2. Modélisation par éléments finis

L'analyse par éléments finis de la configuration représentée sur la figure 3 a été réalisée en utilisant le logiciel Franc 2D/L. La structure est maillée par des éléments isoparamétriques quadrilatéraux à huit nœuds. La zone commune de la plaque et du patch doit avoir un maillage identique. Sur la figure 3, nous avons représenté le maillage de la structure fissurée, réparée et non réparée, par un patch. Le maillage est raffiné pour augmenter la résolution. On remarque que la région adjacente au front de la fissure est maillée avec des éléments singuliers pour affiner les résultats.

3.1.2.1. Calcul du FIC

La figure 4 illustre la variation du FIC en tête d'une fissure. En raison de symétrie, la seconde fissure présente le même FIC. On remarque que la réduction du FIC, consécutive à la présence du patch, est très importante en particulier lorsque la longueur de la fissure augmente. On relève un taux de réduction de l'ordre 64 %. Ce taux est conforme au résultat trouvé dans la littérature (Adams et Wake, 1984 ; Baker, 1999 ; Baker *et al.*, 2002 ; Cognard, 2004 ; Dillard et Pocius, 2002 ; Fredell *et al.*, 1994 ; Madani, 2007 ; Megson, 1999 ; Messler, 2004 ; Nicholas, 1997 ; Ouinas, 2005 ; Ouinas *et al.*, 2007). L'effet d'interaction entre les deux fissures est très clair en l'absence de réparation.

En effet, le FIC augmente brutalement lorsque les deux têtes de fissures s'approchent l'une de l'autre. Concernant les fissures réparées, on remarque une réduction plus importante dans l'utilisation de la technique du double patch et du simple patch ; elle est de l'ordre de 15 %. L'effet d'interaction entre les fissures est visible par les deux techniques. Le FIC augmente légèrement lorsque les deux fissures sont au voisinage l'une de l'autre. Dans le cas d'une seule fissure, le FIC prend une allure asymptotique lorsque la longueur de la fissure augmente. On remarque aussi que l'effet d'interaction

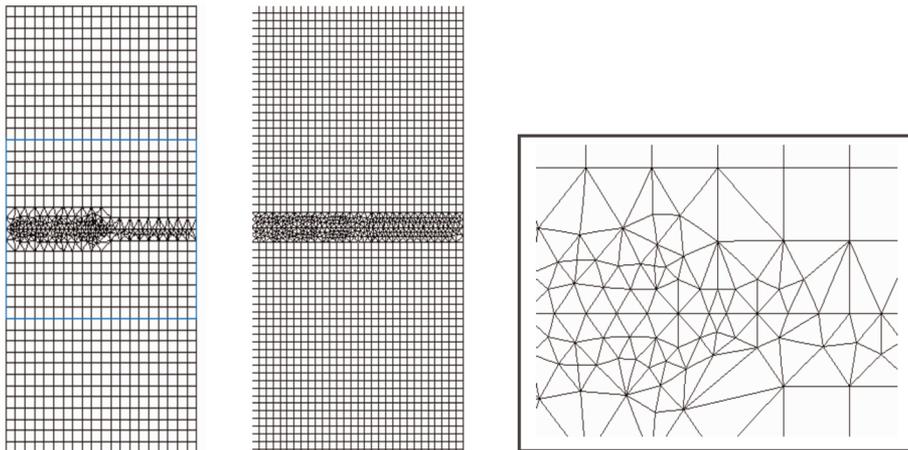


Figure 3. Maillage par éléments finis de la plaque et du patch et au voisinage de la pointe de fissure

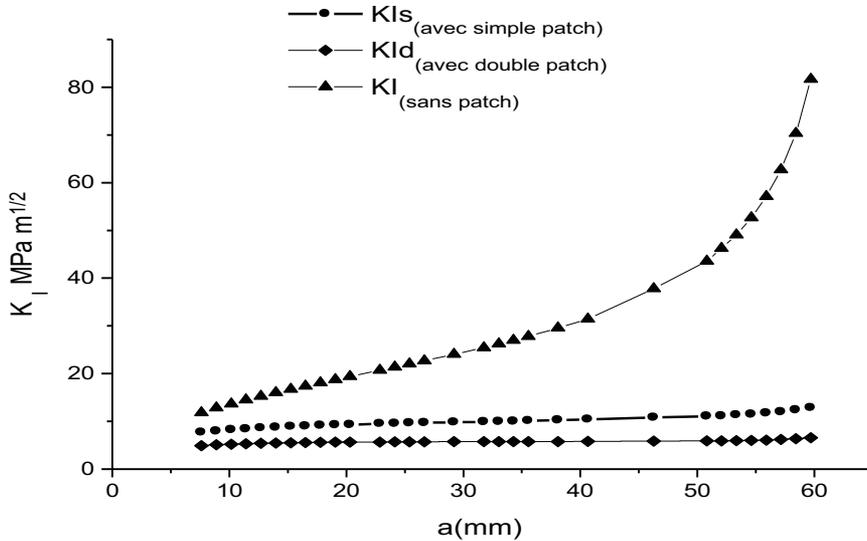


Figure 4. Variation du FIC en tête d'une fissure réparée et non réparée

est plus marqué dans le cas d'un seul patch. Ceci est dû au fait que les contraintes absorbées par un seul patch sont moins importantes.

3.1.2.2. Calcul des contraintes adhésives

La figure 5 illustre la réparation des contraintes adhésives dans les cas du simple et du double patch. On remarque nettement que les contraintes adhésives sont beaucoup plus faibles dans le cas du double patch. Ce comportement est dû à la double absorption des contraintes dans le cas du double patch symétrique.

4. Interaction entre deux fissures de longueur fixes

Cette partie porte sur l'étude de l'effet d'interaction entre une fissure (a) et une fissure (b) réparées et non réparées, situées dans la même structure (figure 6). À cet effet, on considère deux cas selon le déplacement de la fissure (b) par rapport à la fissure (a) :

- déplacement transversal de la fissure (b) ;
- déplacement longitudinal de la fissure (b).

L'effet d'interaction fissure (a)-fissure (b) est analysé. La taille des deux fissures est supposée invariable. Seule l'interdistance « d » entre ces deux fissures varie comme l'indique la figure 6. Sur cette figure, nous présentons le modèle géométrique de la plaque fissurée dans les deux cas :

- avec et sans patch, et présence d'une fissure (b), de longueur $b = 25,4$ mm ;
- située à une distance « d » de la pointe de la fissure (a).

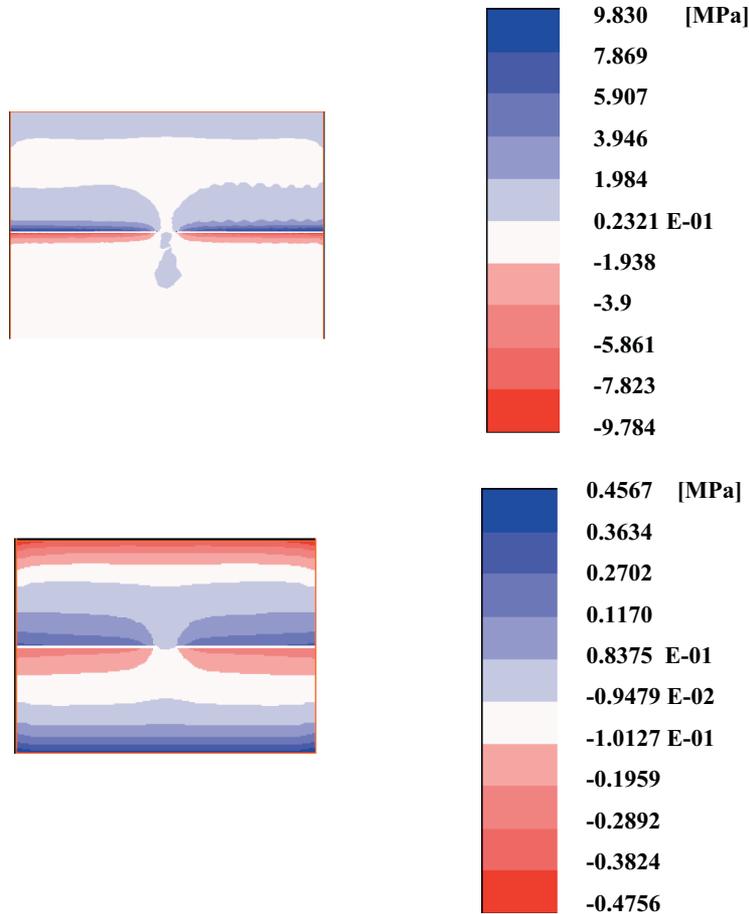


Figure 5. Contour des contraintes tangentielles dans l'adhésif pour des fissures réparées avec : (1) simple patch ; (2) double patch

Ainsi, cette figure représente les maillages des fissures par des éléments isoparamétriques quadrilatéraux à six nœuds et un maillage par des éléments spéciaux en têtes des fissures (a) et (b). La longueur de la fissure (a) est égale à 12,7 mm.

5. Déplacement horizontal de la fissure (b) par rapport à la fissure (a)

5.1. Analyse et résultats

5.1.1. Calcul du FIC

On considère utile de calculer le FIC à la première pointe de la fissure (a), notée (1). La figure 7 présente la variation du FIC en pointe (1) en fonction de l'interdistance (d) entre les deux fissures. On remarque que le FIC augmente lorsque la distance (d)

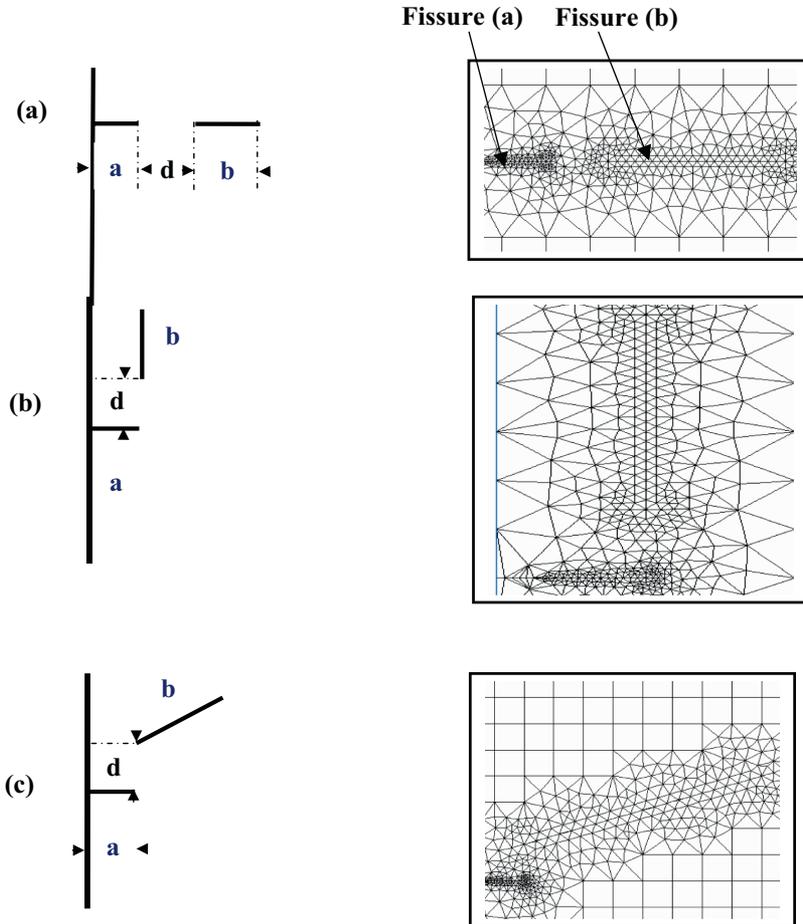


Figure 6. Représentation schématique des fissures (a) et (b) : (a) fissure (b) sur le prolongement à la fissure (a) ($\theta = 0^\circ$) ; (b) fissure (b) perpendiculaire à la fissure (a) ($\theta = 90^\circ$) ; (c) fissure (b) incliné à la fissure (a) ($\theta \leq 90^\circ$)

diminue, c'est-à-dire que l'interaction entre les deux fissures est visible pour les deux cas avec et sans réparation. La réduction du FIC par le patch pour une interdistance $d = 10,16$ mm est de l'ordre de 44 %. Ce taux de réduction diminue légèrement lorsque l'interdistance (d) augmente.

6. Déplacement vertical de la fissure (b) par rapport à la fissure (a)

6.1. Analyse et résultats

6.1.1. Calcul du FIC

Nous calculons le FIC en première pointe de la fissure (a) (pointe notée (1)). La figure 8 montre la variation du FIC en pointe (1) en fonction de l'interdistance (d) entre

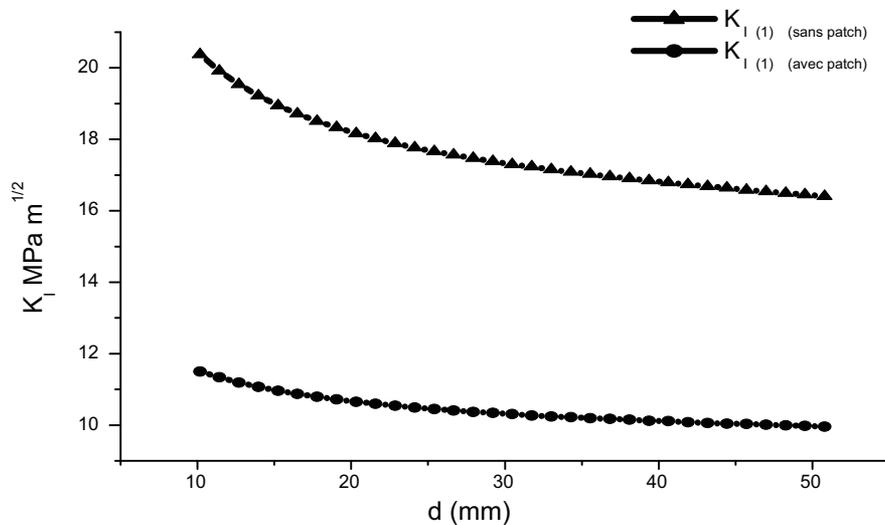


Figure 7. Variation du FIC en pointe (1) en fonction de la distance « d » entre les deux fissures

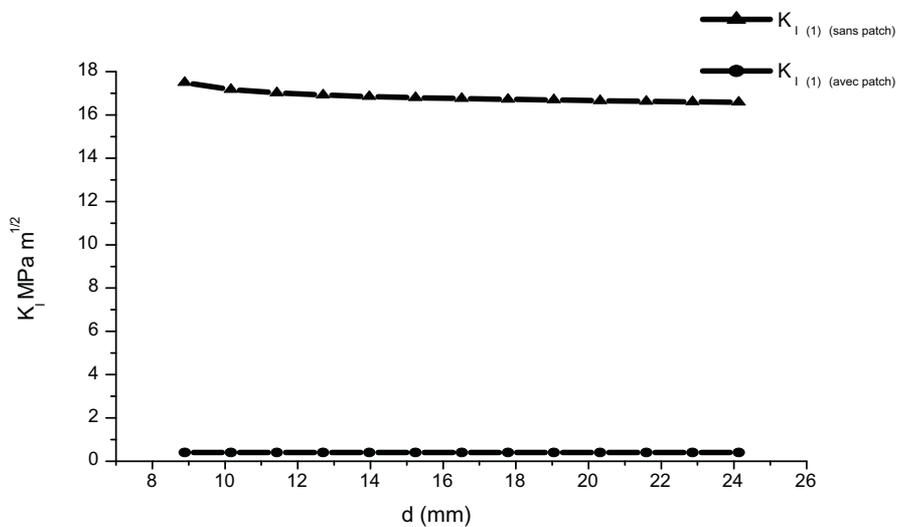


Figure 8. Variation du FIC en pointe (1) en fonction de l'interdistance « d » entre les deux fissures

les deux fissures. Ainsi, le FIC augmente lorsque la distance « d » diminue, c'est-à-dire que l'interaction entre les deux fissures est visible pour les deux cas avec et sans réparation ; la réduction du FIC par le patch pour une interdistance $d = 8,89$ mm est de l'ordre de 97 %. Ce taux de réduction diminue légèrement lorsque l'interdistance (d) augmente.

7. Déplacement incliné de la fissure (b) par rapport à la fissure (a)

7.1. Analyse et résultats

7.1.1. Calcul du FIC

Le calcul du FIC est représenté à la première pointe de la fissure (b), notée (2). La figure 9 illustre la variation du FIC en fonction de l'orientation de la fissure (b). Un changement d'orientation entraîne une diminution de ce facteur. Le K_I est maximal pour un angle de 0° et minimal pour un angle de 90° dans les deux cas : avec et sans patch. Les lèvres de la fissure (b) sont favorablement orientées par rapport aux sollicitations. La réduction du FIC par effet du patch pour un angle θ ($^\circ$) = 0° est de l'ordre de 80 %. Ce taux de réduction diminue légèrement lorsque l'angle d'inclinaison augmente.

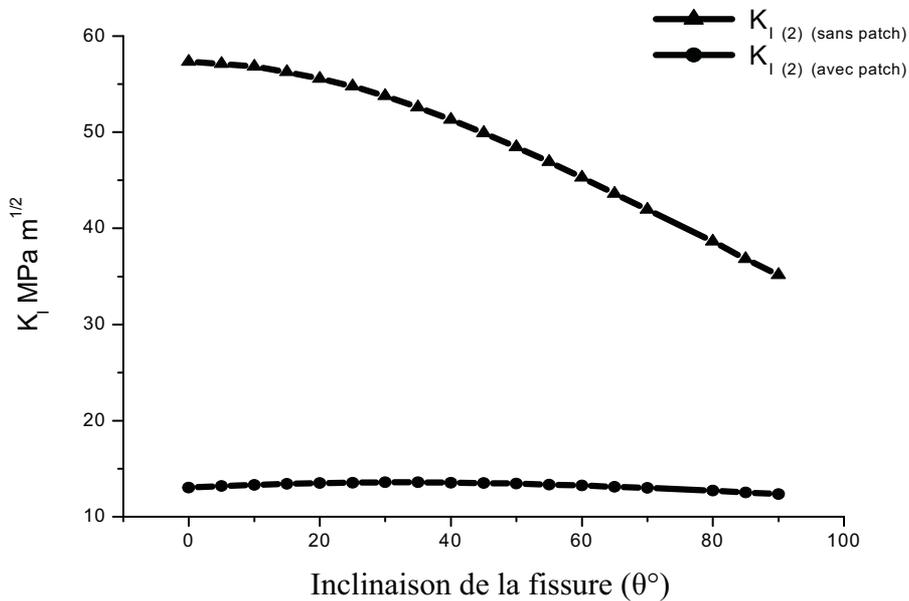


Figure 9. Variation du FIC en pointe (2) en fonction de l'angle d'inclinaison de la fissure (b) réparée et non réparée par un patch

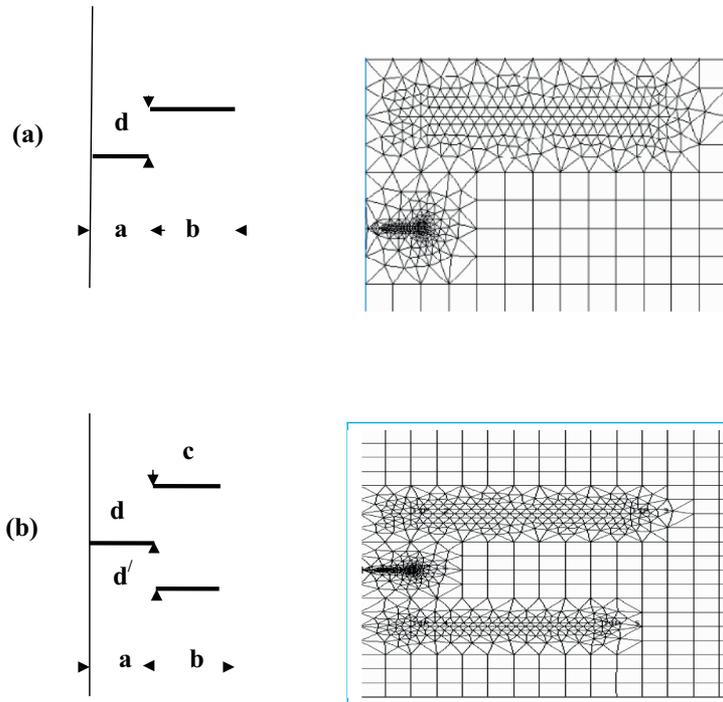


Figure 10. Représentation schématique de la fissure. (a) fissure (b) parallèle à la fissure (a) ; (b) deux fissures notées (b) et (c) parallèles par rapport à la fissure (a)

7.1.2. Interaction entre deux fissures

À cet effet, on note deux cas dans l'étude de l'effet d'interaction (figure 10) :

- fissure (b) parallèle à la fissure (a) ;
- deux fissures notées (b) et (c) parallèles par rapport à la fissure (a).

8. Analyse et résultats

8.1. Cas d'une fissure (b) parallèle à la fissure (a)

8.1.1. Calcul du FIC

Nous avons étudié l'effet d'interaction entre deux fissures séparées par une interdistance « d ». Le calcul du FIC est représenté à la première pointe de la fissure (a), notée (1).

La figure 11 montre la variation du FIC en pointe (1) en fonction de l'interdistance « d » entre les deux fissures. On remarque que le FIC augmente lorsque la distance (d) diminue et l'interaction entre les deux fissures est visible pour les deux cas avec et sans

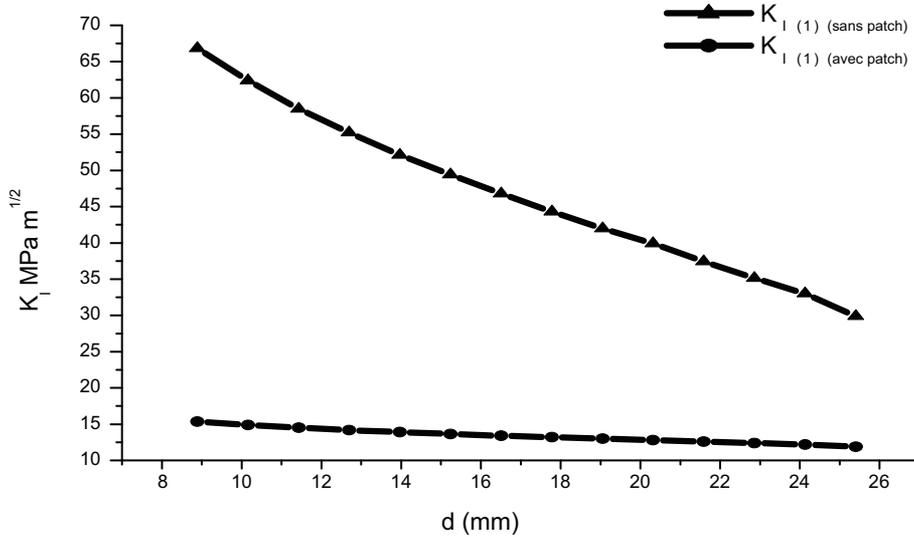


Figure 11. Variation du FIC en pointe (1) en fonction de la distance « d » entre les deux fissures

réparation. La réduction du FIC par le patch pour une interdistance $d = 8,89$ mm est de l'ordre de 78 %. Ce taux de réduction diminue légèrement lorsque l'interdistance (d) augmente.

8.2. Cas de deux fissures parallèles à la fissure principale

8.2.1. Calcul du FIC

Précédemment, nous avons calculé le FIC en première pointe de la fissure (a) (pointe notée (1)). La figure 12 présente la variation du FIC en pointe (1) en fonction de la distance « d » entre les deux fissures. Ainsi, le FIC augmente lorsque la distance « d » diminue ; c'est-à-dire que l'interaction entre les deux fissures est marquée pour les deux cas : avec et sans patch ; la réduction du FIC par le patch pour une interdistance ($d = 8,89$ mm) est de l'ordre de 80 %.

Ce taux de réduction diminue légèrement lorsque l'interdistance (d) augmente.

9. Analyse des contraintes de cisaillements dans la couche adhésive

L'analyse est complétée par l'étude de la distribution des contraintes de l'adhésif par rapport à la première ligne virtuelle. On considère : $G_a = 420$ MPa ; $e_a = 0,2$ mm.

L'étude des contraintes de cisaillement permet d'estimer le risque de rupture dans la couche adhésive. Les figures montrent la distribution des contraintes de cisaillement τ_{yz} dans la couche adhésive le long d'une ligne virtuelle.

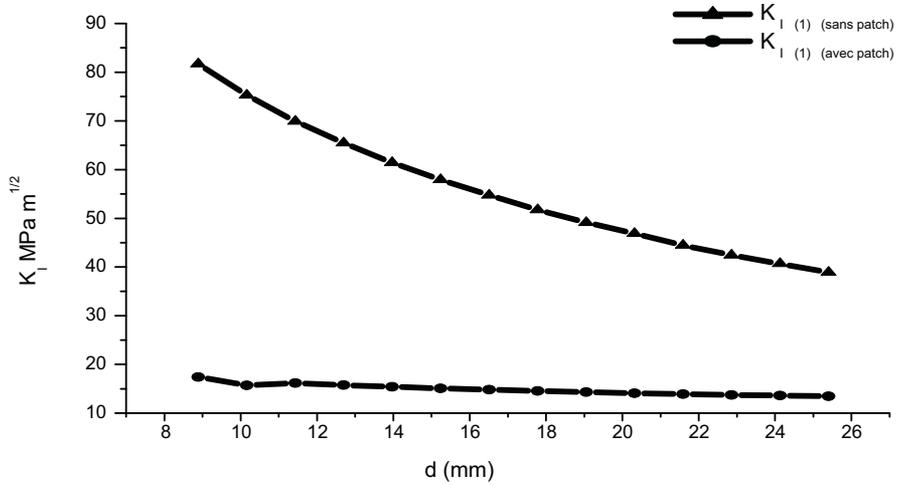


Figure 12. Variation du FIC en pointe (1) en fonction de la distance « d » entre une fissure réparée et une autre non réparée

La figure 13 présente la distribution des contraintes de cisaillement dans la couche adhésive pour le cas de deux fissures se propageant dans des sens opposés dans le cas du simple patch. La contrainte maximale est située à un point adjacent en tête de fissure. Le niveau de contrainte est relativement fort car la contrainte maximale est de l'ordre de 5,75 MPa. On peut dire que l'effet d'interaction entre les deux fissures a une influence significative sur le risque de rupture de l'adhésif entre le patch et la plaque réparée.

La figure 14 illustre la distribution des contraintes de cisaillement dans la couche adhésive pour le cas de deux fissures se propageant dans des sens opposés dans le cas du double patch. Aussi, la contrainte maximale est localisée à un point adjacent en tête de fissure. Le niveau de contrainte est relativement faible lorsque la contrainte maximale τ_{yz}

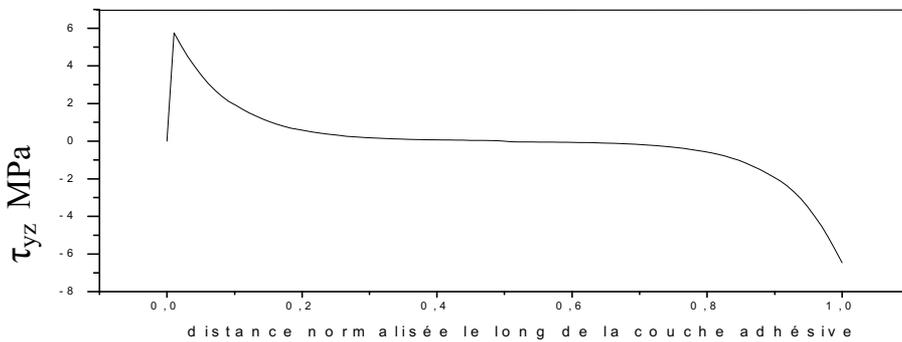


Figure 13. Distribution des contraintes de cisaillement τ_{yz} dans la couche adhésive dans le cas du simple patch

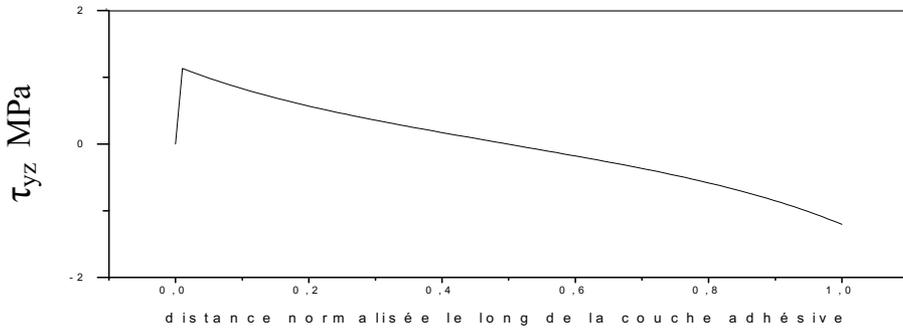


Figure 14. Distribution des contraintes de cisaillement τ_{yz} dans la couche adhésive dans le cas du double patch

τ_{yz}^{\max} est de l'ordre de 1,13 MPa. Cette contrainte est environ dix fois moins importante que la limite à la rupture de l'adhésif. Par conséquent, l'effet d'interaction entre les deux fissures n'augmente pas le risque de rupture de l'adhésif entre le patch et la plaque réparée.

La figure 15 montre la distribution des contraintes de cisaillement dans la couche adhésive pour le cas d'une fissure se déplaçant horizontalement à la fissure principale. Il existe quatre pics de contraintes maximales. Mais le niveau de contrainte est très faible car la contrainte maximale est de l'ordre de 0,65 MPa. On peut dire que l'effet d'interaction entre les deux fissures a une influence négligeable sur le risque de rupture de l'adhésif entre le patch et la plaque réparée.

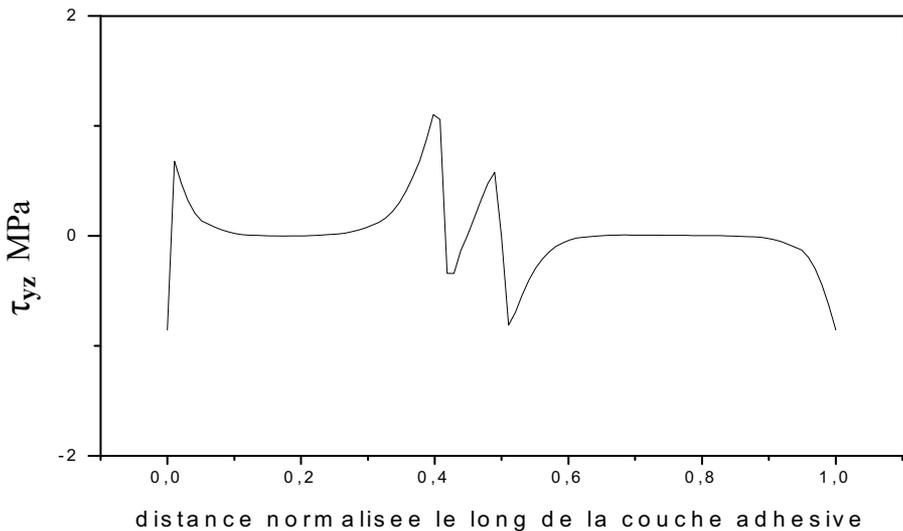


Figure 15. Distribution des contraintes de cisaillement τ_{yz} dans la couche adhésive dans le cas d'une fissure se déplaçant horizontalement par rapport à la fissure principale

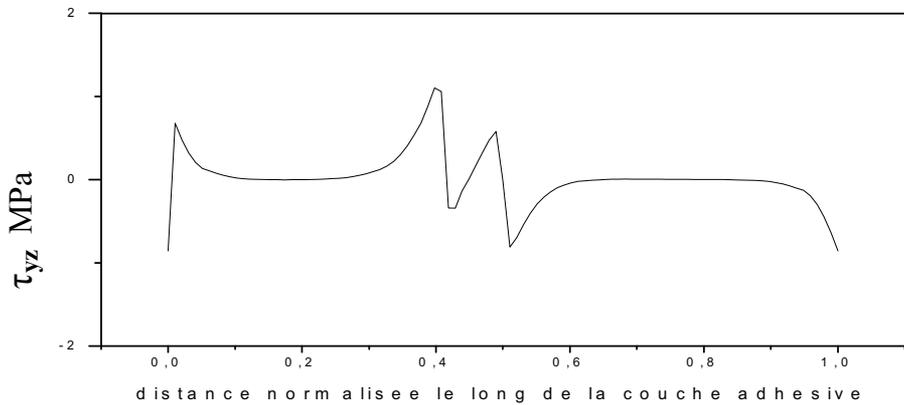


Figure 16. Distribution des contraintes de cisaillement τ_{yz} dans la couche adhésive dans le cas d'une fissure inclinée

La figure 16 présente la distribution des contraintes de cisaillement dans la couche adhésive dans le cas d'une fissure inclinée par rapport à la fissure principale. On remarque aussi quatre pics de contraintes maximales avec des intensités assez faibles. Ceci explique que l'interaction entre une fissure débouchante et une fissure inclinée n'a pas un effet significatif sur la variation des contraintes de cisaillement dans la couche adhésive.

La figure 17 présente la distribution des contraintes de cisaillement dans la couche adhésive dans le cas d'une fissure se déplaçant parallèlement à la fissure principale. Ainsi, le niveau des contraintes maximales ne dépasse pas 0,71 MPa. Cette valeur est assez faible pour provoquer la rupture de l'adhésif. On peut dire que l'effet d'interaction entre les deux fissures a une influence négligeable sur le risque de rupture de l'adhésif entre le patch et la plaque réparée.

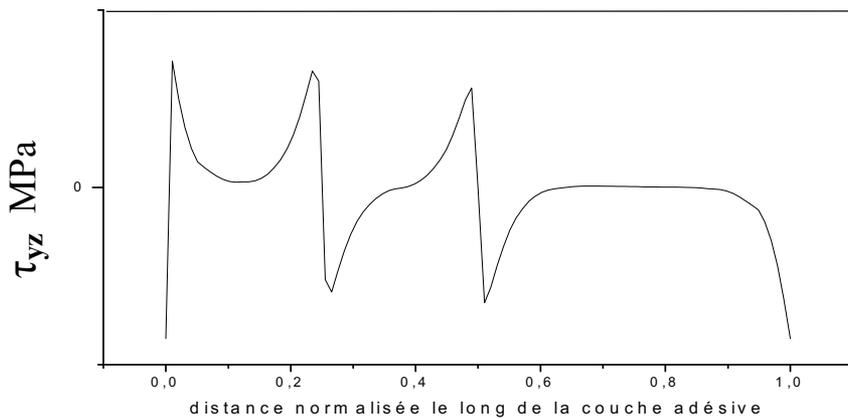


Figure 17. Distribution des contraintes de cisaillement τ_{yz} dans la couche adhésive dans le cas d'une fissure se déplaçant parallèlement à la fissure principale

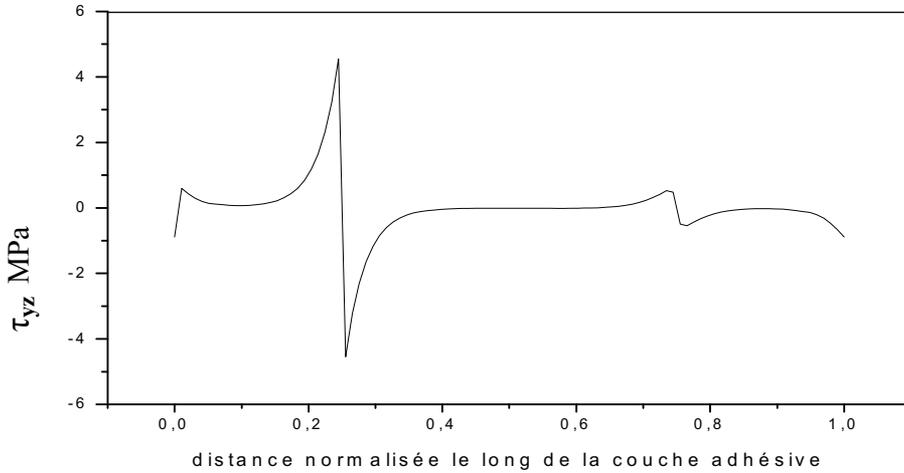


Figure 18. Distribution des contraintes de cisaillement τ_{yz} dans la couche adhésive dans le cas de deux fissures se déplaçant parallèlement à la fissure principale

La figure 18 présente la distribution des contraintes de cisaillement dans la couche adhésive dans le cas de deux fissures se déplaçant parallèlement à la fissure principale. La contrainte maximale $\tau_{yz \max}$ est de l'ordre de 4,55 MPa. On peut dire que le risque de rupture est plus fort dans ce cas et l'effet d'interaction a une influence significative sur le risque de rupture de l'adhésif entre le patch et la plaque réparée.

10. Conclusion générale

La présente étude consiste à analyser, par la méthode des éléments finis, l'effet d'interaction entre deux fissures. L'analyse de l'effet d'interaction entre deux fissures se propageant dans des sens opposés permet de tirer les conclusions suivantes :

- l'effet d'interaction entre deux fissures est très clairement observé dans le cas où celles-ci ne sont pas réparées ;
- le FIC augmente brutalement lorsque les deux têtes de fissures s'approchent l'une de l'autre ;
- pour des fissures réparées, la réduction du FIC est plus importante dans les cas des réparations par les techniques du double patch et du simple patch ;
- le FIC augmente légèrement lorsque les deux fissures sont proches voisines l'une de l'autre ;
- l'effet d'interaction entre deux fissures réparées par les deux techniques est visible ; de même que l'effet d'interaction entre deux fissures non réparées ;

– dans le calcul des contraintes adhésives, on remarque nettement que les contraintes adhésives sont beaucoup plus faibles dans le cas du double patch que celui du simple patch.

Les principaux résultats obtenus dans l'analyse de l'effet d'interaction deux fissures montrent que :

– les interdistances longitudinale et transversale entre les fissures déterminent leur effet d'interaction ;

– ce comportement est enregistré quel que soit l'état des fissures, réparées et non réparées, leur effet d'interaction est marqué ;

– le FIC augmente lorsque l'interdistance (d) diminue ;

– le taux de réduction diminue légèrement lorsque cette interdistance (d) augmente.

La dernière partie porte sur la distribution des contraintes dans la couche adhésive le long de la ligne virtuelle. Les résultats obtenus nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

– la contrainte de cisaillement maximale est localisée à un point adjacent à la tête de la fissure ;

– dans le cas du simple patch, l'effet d'interaction entre les deux fissures a une influence significative sur le risque de rupture de l'adhésif entre le patch et la plaque réparée ;

– par contre, dans le cas du double patch, l'effet d'interaction entre les deux fissures n'augmente pas le risque de rupture de l'adhésif entre le patch et la plaque réparée ;

– l'effet d'interaction entre les deux fissures a une influence négligeable sur le risque de rupture de l'adhésif entre le patch et la plaque réparée dans le cas d'une fissure se déplaçant horizontalement à la fissure principale ;

– l'interaction entre une fissure débouchante et une fissure inclinée n'a pas d'effet significatif sur la variation des contraintes de cisaillement dans la couche adhésive ;

– l'effet d'interaction entre les deux fissures à une influence négligeable sur le risque de rupture de l'adhésif entre le patch et la plaque réparée dans le cas d'une fissure se déplaçant parallèlement à la fissure principale ;

– l'effet d'interaction a une influence significative sur le risque de rupture de l'adhésif entre le patch et la plaque réparée dans le cas de deux fissures se déplaçant parallèlement à la fissure principale ;

– dans le cas d'une fissure se déplaçant verticalement par rapport à la fissure principale, il ne résulte aucune distribution des contraintes de cisaillement dans la couche adhésive, parce que la lèvres de la fissure qui se déplaçant verticalement est parallèle à l'axe de chargement. Ainsi, on peut dire que l'effet d'interaction entre les deux fissures est négligeable.

Bibliographie

- Adams R.D., Wake W.C. (1984). *Structural adhesive joints in engineering*. Elsevier Applied Science Publishers, London.
- Baker A. (1999). Bonded composite repair of fatigue-cracked primary aircraft structure. *J. Compos. Struct.*, vol. 47, p. 431-444.
- Baker A., Rose F., Jones R. (2002). *Advances in the bonded composite repair of metallic aircraft structures*. Elsevier, ISBN : 0-08-042699-9. vol. 1 et 2.
- Cognard J. (2004). *Science et technologie du collage*. Presse polytechnique et universitaires romandes, ISBN : 2-88074-410-5, disponible en bibliothèque.
- Dillard D.A., Pocius A.V. (2002). *The mechanics of adhesion*. Elsevier, ISBN : 0-444-51-140-7.
- Fredell R.S., van Barnveld W., Vlot A. (1994). Analysis of composite crack patching of fuselage structures: high patch modulus isn't the whole story. *Sampe Int. Symp.*, vol. 39.
- Madani K. (2007). *Étude numérique et expérimentale de la technique de réparation des structures aéronautiques par patch en composite, cas de l'aluminium 2024-T3 réparée par composite de carbone/epoxy*. Thèse, université du SBA-UDL, p. 32-214.
- Megson T.H.G. (1999). *Aircraft structures for engineering students*. 3rd ed. Elsevier.
- Messler R.W. Jr. (2004). *Joining of materials and structures*. Elsevier, ISBN : 0-7506-7757-0.
- Nicholas T. (1997). Critical issues in high cycle fatigue. *J. Fatigue*, vol. 21, p. 221-231.
- Ouinias D. (2005). *Étude du comportement en rupture des structures en bimatériaux. Applications aux collages*. Thèse, université du SBA-UDL, p. 15.
- Ouinias D., Bouiadjra B., Serier B., Said Bekkouche M. (2007). Comparison of the effectiveness of boron/epoxy and graphite/epoxy patches for repaired cracks emanating from a semicircular notch edge. *J. Compos. Struct.*, vol. 80, p. 514-522.

