

# Effet de la forme géométrique du patch sur la réduction du FIC en mode I

Ouinass Damel, Zenasni Ramdane and Sahnoun Mohamed

Laboratoire de modélisation numérique et expérimentale des phénomènes mécaniques

Département de Génie Mécanique-Université de Mostaganem-Algeria.

[douinass@netcourrier.com](mailto:douinass@netcourrier.com)

**Abstract** Dans ce papier, la méthode des éléments finis est appliquée pour analyser le comportement d'une fissure centrale réparée par un patch composite en boron/époxy. Les effets des propriétés mécaniques et géométriques du patch sur la variation du facteur d'intensité de contraintes à la pointe de la fissure ont été mis en évidence. Les résultats obtenus montrent que le facteur d'intensité de contraintes à la pointe de la fissure réparée par un patch octogonal de hauteur  $2c/3$  est réduit de 5% par rapport à celle réparée par un patch octogonal de taille  $c$ . Pour un patch de hauteur de  $c/3$  la réduction est de l'ordre de 7%. Les propriétés adhésives doivent être optimisées pour augmenter la performance de la réparation de structure par le renfort.

**Keywords-** Patch octogonal en composite, Fissures et adhésifs, Facteur d'intensité de contraintes (FIC), Analyse par élément finis.

## I. INTRODUCTION

Récemment, l'utilisation des adhésifs est acceptée comme un processus de réparation des structures pour augmenter la durée de vie des composants endommagés. Les pièces métalliques ou composites sont collées à une seule face ou aux deux à la fois de la pièce fissurée pour étendre sa durée de vie de service [1-4].

La réparation des fissures par collage de patch en matériau composite a prouvé son efficacité pour réduire l'intensité de contraintes en têtes de fissures, autrement dit pour réduire la vitesse de propagation des fissures. Cette méthode est employée pour réparer les composants d'avions vétustes. De nombreuses recherches ont été menées pour développer la technologie de collage des patches en composites dans les structures aéronautiques.

Alan Baker fut l'un sinon le pionnier de ces recherches au laboratoire de recherche aéronautique et maritime de la Royal Australian Air Force [5,6].

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 [7-11]. Une étude a été réalisée sur la réparation d'une fissure émanant d'entaille semi-circulaire latérale par un patch en composite semi-circulaire [12].

Le but de cette étude est l'analyse du comportement d'une fissure renforcée dans une plaque d'aluminium en mode I par la méthode des éléments finis. Le patch en composite soumis à l'analyse est le boron/époxy utilisé avec beaucoup de succès dans la réparation aéronautique. Les effets de module de cisaillement de l'adhésif, l'épaisseur de l'adhésif et l'épaisseur du patch sur les variations du facteur d'intensité de contraintes sont examinés.

## II. MODELE GEOMETRIQUE

Dans cette modélisation, on considère une plaque rectangulaire mince en aluminium ayant les dimensions suivantes : longueur  $H_p = 203.2mm$ , largeur  $w_p = 152.4mm$  l'épaisseur  $e_p = 1mm$ . On suppose une fissure de longueur  $2a = 20mm$  située au milieu de la plaque et perpendiculaire au plan de sollicitation. La plaque considérée est sollicitée en traction uniaxiale dans la direction verticale  $y$  sous la contrainte appliquée d'amplitude  $\sigma = 120MPa$ . Les caractéristiques mécaniques et géométriques de la plaque et du patch sont respectivement notées par les indices  $p$  et  $R$ .

La fissure est réparée par un patch en matériau composite en boron/époxy considéré comme matériau orthotrope de dimension : Grands axes  $c = h = 60mm$ , et épaisseur  $e_R = 1mm$ . Les propriétés du matériau du patch sont: le module d'Young  $E_R$  et le coefficient de poisson  $\nu_R$ . Les propriétés adhésives sont : Le module de cisaillement  $G_a$  et l'épaisseur  $e_a = 0.127mm$ . Etant donné que la géométrie du chargement est symétrique, la demi structure est suffisante pour l'étude

numérique. La figure 1 montre la symétrie du modèle géométrique de la structure utilisée.

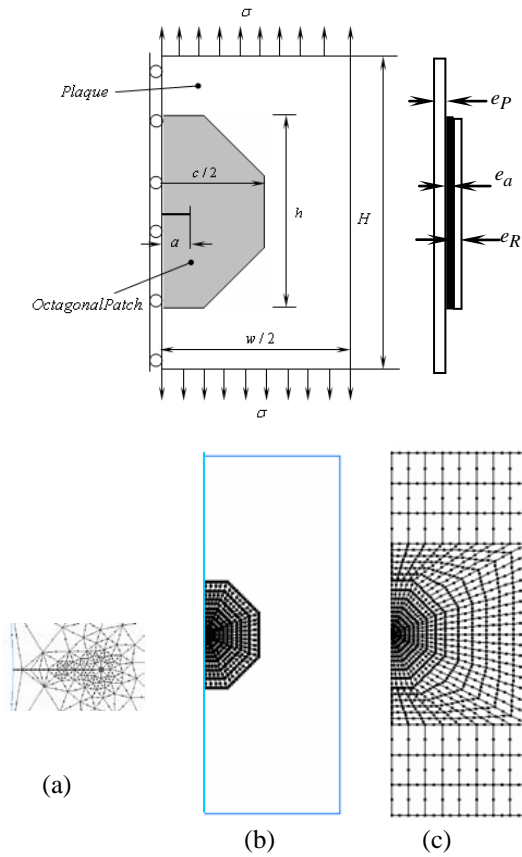


Figure 1. Modèle géométrique et le maillage de la structure (Plaque et patch octogonal).

- a- Fissure centrée.
- b- Patch collé sur la fissure.
- c- Plaque fissurée au milieu.

Les caractéristiques mécaniques des matériaux (plaque et patch) et de l'adhésif sont reportées dans le tableau 1.

TABLE 1. PROPRIETES MECANIQUES

| Property  | Aluminum         | Boron/epoxy       | Adhésif |
|---|------------------|-------------------|---------|
| $E_1 (MPa)$                                     | $7.2 \cdot 10^4$ | $208 \cdot 10^3$  |         |
| $E_2 (MPa)$                                     |                  | $25.4 \cdot 10^3$ |         |
| $\nu_{12}$                                      | 0.33             | 0.1677            | 0.32    |
| $G_{12} (MPa)$                                  |                  | $7.2 \cdot 10^3$  | 965     |
| $G_{13} (MPa)$                                  |                  | $7.2 \cdot 10^3$  |         |
| $\alpha (10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$ | 22.7             | 4.5               | 50.0    |

Nous avons employé un code des éléments finis bidimensionnel nommé FRANC2D/L (FRacture ANALysis Code) pour le travail de modélisation numérique. Ce code a été à l'origine développé à l'Université Cornell et modifié pour

des multicouches à l'Université Kansas. Il est basé sur la théorie de mécanique de rupture linéaire et non-linéaire élastique [13]. Une modélisation tridimensionnelle par éléments finis où le développement de modèles mathématiques pour ce type de structure est généralement très complexe.

### III. EFFET DU MATERIAU DU PATCH

Les paramètres de la rupture sont influencés par la rigidité du patch, la taille de la région d'attachement et la résistance de l'adhésif [12]. La matière du patch influence directement la variation du facteur d'intensité de contraintes. Pour mettre en évidence, le processus de réparation d'une fissure centrale, nous avons choisi deux patches de formes géométriques identiques ayant des propriétés mécaniques différentes.

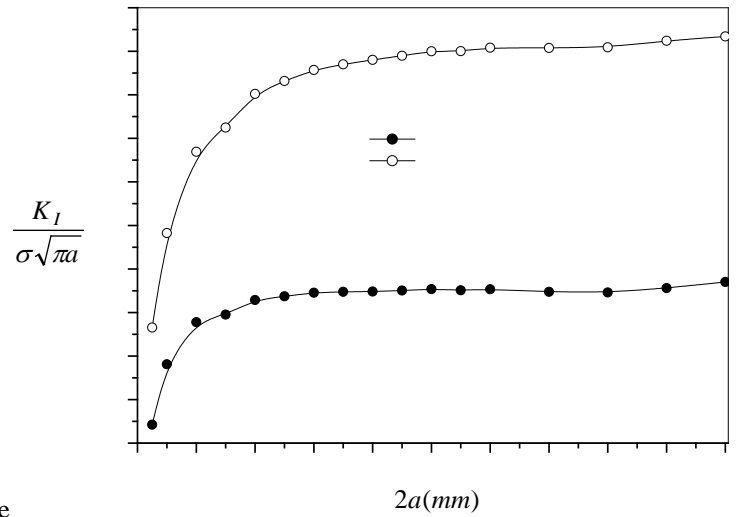


Figure 2. Influence des caractéristiques mécaniques du patch sur la variation du FIC.

La Fig. 2 illustre l'effet des propriétés mécaniques du patch sur la variation du facteur d'intensité de contraintes. On remarque que pour les petites longueurs de la fissure le facteur d'intensité de contraintes augmente sensiblement jusqu'à une longueur de la fissure ( $2a = 10mm$ ). Au-delà de cette longueur le facteur d'intensité de contraintes converge vers une valeur stable. Cette convergence est plus rapide lorsque le matériau du patch est métallique. La différence du facteur d'intensité de contraintes de la fissure réparée par les deux patches (composite et métallique) prend de l'ampleur avec l'augmentation de sa taille.

### IV. EFFET DE L'ORIENTATION DES FIBRES DU MATERIAU COMPOSITE

Pour mettre en évidence l'effet de la direction des fibres du matériau composite du patch sur la réparation de la fissure centrale, nous avons considéré deux cas. Le premier consiste à prendre les fibres possédant les caractéristiques mécaniques les plus élevés dans la direction de la fissure, c'est-à-dire que  $E_1$  soit dans la direction des abscisses (orientation 1). Dans le

second cas, ces fibres sont perpendiculaires à la fissure,  $E_1$  soit parallèle à l'axe des ordonnées (orientation 2). Les résultats obtenus sont représentés sur la Fig. 3.

On remarque que l'application du même matériau composite du patch dans le processus de réparation de fissure donne des résultats différents. L'allure du facteur d'intensité de contraintes de la fissure réparée par le patch d'orientation (2) converge rapidement par rapport aux patches métalliques et composites d'orientation (1). La réduction du facteur d'intensité de contraintes est d'autant mieux lorsque l'orientation des fibres les plus rigides sont perpendiculaires à l'avancée de la fissure. La réduction maximale du patch en composite d'orientation (2) est de l'ordre de 30% par rapport au patch métallique. Elle passe du simple au double par rapport au patch composite d'orientation (1).

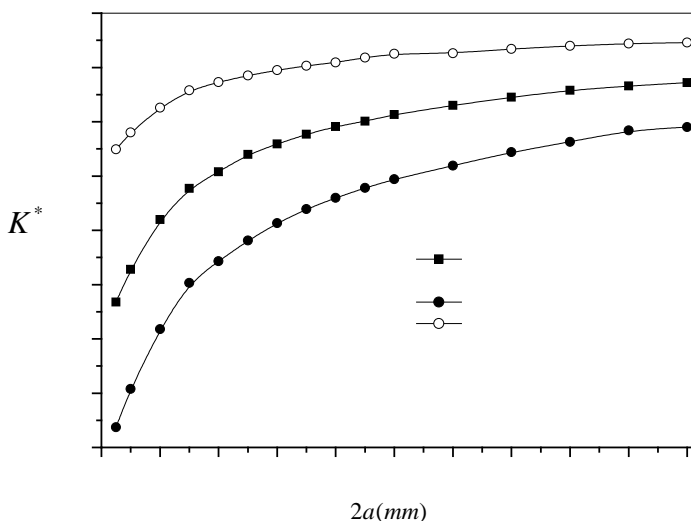


Figure 3. Effet de l'orientation des fibres du patch octogonal sur la réduction du FIC.

#### V. INFLUENCE DU MODULE DE CISAILLEMENT DE L'ADHESIF $G_a$

La Fig. 4 montre la variation du facteur d'intensité de contraintes en fonction de la variation du module de cisaillement de l'adhésif. En effet, la diminution du facteur d'intensité de contraintes est inversement proportionnelle à l'augmentation du module de cisaillement de l'adhésif, mais la décroissance du facteur d'intensité de contraintes qui est fonction de  $G_a$  a tendance à s'annuler lorsque  $G_a$  augmente indéfiniment. On remarque que la réduction du FIC obtenue par le patch d'orientation (2) est beaucoup plus importante que celle obtenue par le patch d'orientation (1).

En réalité, une augmentation du module de l'adhésif réduit la contrainte adhésive, qui peut produire l'échec d'adhérence. Par conséquent, le choix de l'adhésif pour la réparation de fissures doit être optimisé pour permettre la transmission des tensions vers le patch et éviter l'échec adhésif en raison de l'augmentation des tensions dans la couche adhésive.

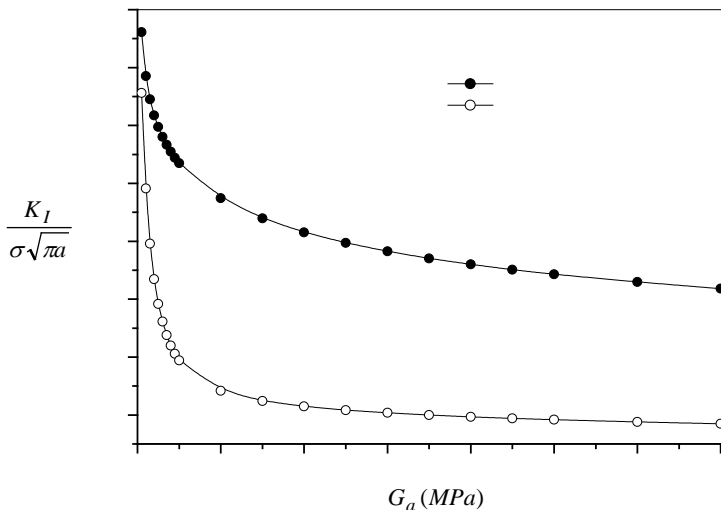


Figure 4. Variation du FIC en fonction du module de cisaillement de l'adhésif.

#### VI. INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE L'ADHESIF

L'effet de l'épaisseur de l'adhésif joue un rôle déterminant sur la stabilité des fissures renforcées par patch. Sur la Fig. 5 on montre la réduction du FIC en fonction de la longueur de fissure pour différentes valeurs de l'épaisseur de l'adhésif ( $e_a$ ). On peut voir dans cette figure qu'une réduction de l'épaisseur de l'adhésif diminue la valeur du facteur d'intensité de contraintes, ce qui signifie qu'une faible épaisseur de l'adhésif est souhaitable pour réparer les fissures. Cet effet fut mis en valeur par Turaga et Ripudaman [11]. Une grande épaisseur renforce l'adhésion mais réduit la capacité d'absorption du champ de contraintes du patch

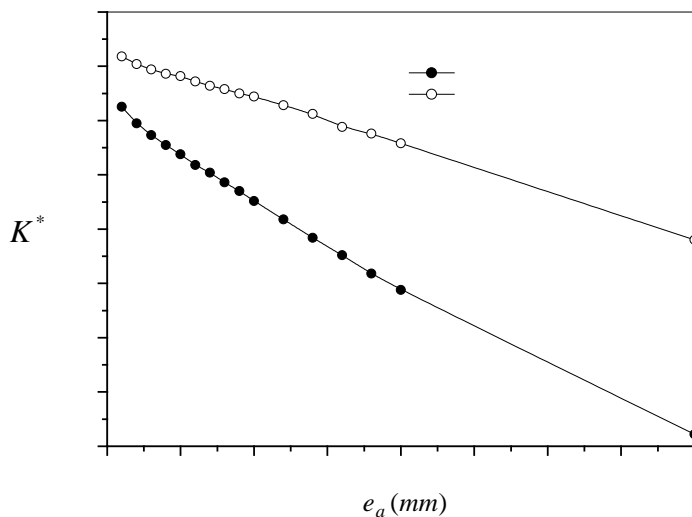


Figure 5. Influence de l'épaisseur de l'adhésif sur la variation du FIC.

L'allure du facteur de réduction diminue linéairement relativement à l'augmentation de l'épaisseur de l'adhésif. Lorsque l'épaisseur  $e_a = 2mm$  la réduction obtenue est de l'ordre 74% et 87% respectivement au simple et double patch

en boron/époxy d'orientation (2). Cette réduction dépasse 85% lorsque l'épaisseur est inférieure à 0.5mm ( $e_a \leq 0.5mm$ ).

### VII. INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DU PATCH

La Fig. 6 montre l'effet de l'épaisseur du patch sur la variation du facteur d'intensité de contraintes de la fissure pour un simple et double patch. On peut voir que l'accroissement de l'épaisseur du patch réduit le facteur d'intensité de contraintes en pointe de fissure de façon proportionnelle. Le double patch permet une meilleure absorption des contraintes transmises par la fissure que le simple patch. Le taux de réduction du facteur d'intensité de contraintes dépend non seulement de l'épaisseur du patch mais également de sa nature. On note cependant que les épaisseurs du patch inférieures à 1.5mm engendrent une forte diminution de FIC. Au delà de cette valeur le FIC semble indépendant de l'épaisseur du patch.

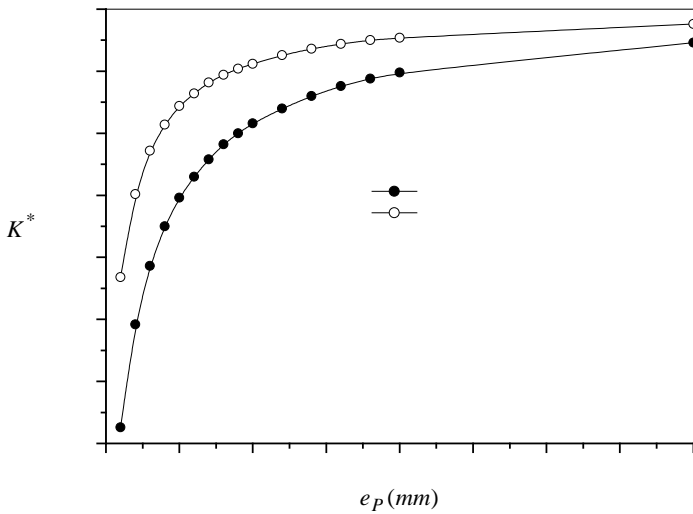


Figure 6. Effet de l'épaisseur du patch sur la variation du FIC.

Ceci confirme que le choix du patch épais améliore leurs performances. Pour une meilleure distribution des contraintes, il est préférable d'utiliser un patch en composite formé de plusieurs plis pour réparer les fissures.

### VIII. EFFET DE LA GEOMETRIE DU PATCH

La géométrie du patch joue un rôle important sur la variation du facteur d'intensité de contraintes. Pour mettre en évidence, le processus de réparation d'une fissure centrale de longueur  $2a$  ; trois patches octogonaux de formes géométriques différentes ont été choisis. La figure 7 illustre l'effet géométrique du patch sur la variation du facteur d'intensité de contraintes. Les allures du FIC correspondent aux différentes tailles du patch octogonal.

On remarque que pour les petites longueurs de fissure ( $2a < 10mm$ ) la différence des valeurs du facteur d'intensité de contraintes est quasi nulle. Au delà de la longueur de la fissure  $2a \geq 10mm$  la différence prend de l'ampleur avec l'accroissement de la taille de la fissure.

Les résultats obtenus montrent que le FIC à la pointe de la fissure réparée par un patch de hauteur  $h = 2c/3$  est réduit de 5% par rapport à celle réparée par un patch octogonal de taille  $c$ . Pour un patch de hauteur de  $h = c/3$  la réduction maximale est de l'ordre de 7% [14].

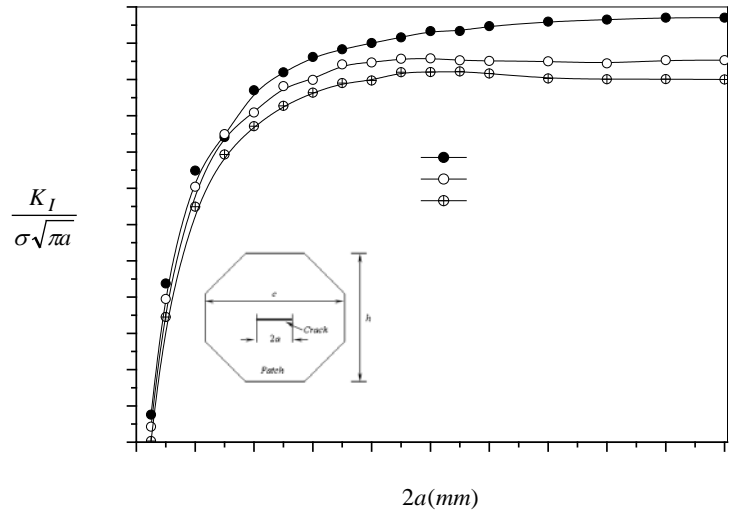


Figure 7. Influence de la taille du patch sur la variation du FIC.

### IX. CONCLUSIONS

Le travail que nous avons mené, nous a permis de traiter l'influence des propriétés des matériaux sur les valeurs des paramètres de rupture calculés pour une plaque sollicitée à une traction contenant une fissure centrale. La qualité du matériau du patch et sa géométrie dimensionnelle jouent un rôle essentiel dans la distribution des concentrations de contraintes aux voisinages et à la pointe de la fissure. A cet effet, on dégage les constatations suivantes :

- La présence d'un patch réduit considérablement la concentration de contraintes qui peut retarder la naissance de la fissure et par la suite l'augmentation de la durée de vie de la structure.
- 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.
- Le choix des propriétés adhésives pour la réparation de fissures avec le patch collé doit être optimisé.
- La réduction maximale relative du facteur d'intensité de contraintes  $K_I$  est de l'ordre de 78% et 87% respectivement pour le simple et double patch.
- Le choix de l'épaisseur du patch est un des meilleurs moyens pour augmenter la performance de la réparation des structures.
- Un patch octogonal réduit le facteur d'intensité de contraintes de 5% lorsque la hauteur  $h = 2c/3$ . Lorsque  $h = c/3$  la réduction passe à 7%.

## REFERENCES

- [1] AA. Baker, R. Jones, Bonded Repair of Aircraft Structures. Martinus Nijhoff: Dordrecht, 1988.
- [2] SN. Atluri. Structural Integrity & Durability, Tech Science Press, Forsyth, Georgia, USA, 1997.
- [3] WT. Chow, SN. Atluri, Composite patch repairs of metal structures: adhesive nonlinearity, thermal cycling, and debonding. AIAA J. 35(9): 1997, 1528–1535.
- [4] MR. Lena, JC. Klug, CT. Sun, Composite patches as reinforcements and crack arrestors in aircraft structures. J. Aircraft 35(2): 1998, pp 318–323.
- [5] AA. Baker, Growth characterisation of fatigue cracks repaired with adhesively bonded boron/epoxy patches. In: Proceeding of International Conference on Fracture, ICF-9, 1997, pp 117-28.
- [6] AA Baker, & R.J. Chester, Recent advances in composite repair technology for metallic aircraft components. In: Advanced composites 93. Chandra T, Dhingra AK, editors. Proceedings of the International Conference on Advanced composite Materials. 1993, pp 45-9.
- [7] 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.
- [8] T. Ting, R. Jones, WK. Chiu, IH. Marshal & JM. Greer, Composite repairs to rib Stiffened pannel. Comp. Struct., 47. 1999, pp. 737-743.
- [9] 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.
- [10] R. Jones, WK. Chiu, Composite repairs to crack in metallic components. Compos Struct. 1999, 62:431-43.
- [11] VRS. Turaga, & Ripidiman, Modeling of patch repairs to a thin cracked sheet. Engn. Fract. Mec. 74., 1999, pp.431-443.
- [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. Swenson, M. James, FRANC2D/L., (1998) A crack propagation simulator for plane layered Structures. Version 1.4 User –guide.
- [14] 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.