

Analyse du FIC d'une fissure émanant d'entaille sur le comportement du stratifié

Sahnoun Mohamed, Ouinas Damel et Zenasni Ramdane

Laboratoire de modélisation numérique et expérimentale des phénomènes mécaniques

Département de Mécanique, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, 27000.

Email: m.sahnoun@netcourrier.com

Abstract Le processus de renforcement des structures utilisant le collage des composites est une méthode efficace et économique pour augmenter la durée de vie des structures endommagées. Dans cette étude, nous utilisons la méthode des éléments finis pour analyser le comportement d'une structure stratifiée en matériau composite en calculant le facteur de concentration de contraintes et le facteur d'intensité de contraintes en tête de fissure en mode I. Les effets des propriétés mécaniques des couches du stratifié, de la couche adhésive sur le comportement de l'assemblage sont mises en évidence. Les résultats montrent que les facteurs de concentration et d'intensité de contraintes sont affectés par l'orientation des fibres et de l'effet de la présence du défaut géométrique. L'augmentation de celui-ci amplifie les concentrations de contraintes à la pointe de la fissure.

Keywords- Composite laminé, Fissure, Facteur de concentration de contraintes (FCC), Facteur d'intensité de contraintes (FIC), Analyse par éléments finis.

I. INTRODUCTION

Un avion est soumis aux charges structurales et aérodynamiques graves, qui peuvent résulter des atterrissages et décollages répétés, des impacts d'oiseau et dégradation dû à l'environnement telle que la corrosion sous contrainte. Ces charges peuvent causer des endommagements ou affaiblissement ou le vieillissement de la structure des avions en affectant ces capacités de supporter la charge.

Par conséquent, une réparation ou un renforcement de la partie endommagée de la structure pour reconstituer l'efficacité structurale et pour assurer ainsi l'aptitude du service continu d'un avion. L'industrie aérospatiale a montré l'intérêt considérable pour l'utilisation des matériaux composites avancés utilisés pour renforcer ou réparer les structures métalliques fissurées par des adhésifs.

Alan Baker fut l'un sinon le pionnier de ces recherches au laboratoire de recherche aéronautique et maritime de la Royal Australian Air Force [1-3]. Parmi les auteurs utilisant la MEF dans le calcul du FIC dans le cas des fissures renforcées, on

peut citer [4-7]. Une étude a été réalisée sur la réparation d'une fissure émanant d'entaille semi-circulaire latérale par un patch en composite semi-circulaire [8]. Ouinas et al. [9,10] ont montré l'influence du disbond sur l'amplification des concentrations de contraintes aux fonds d'entailles et du FIC au niveau de pointes de fissures. Les critères de la rupture ont été appliqués à un point pour prévoir l'échec cohésif [11] et hors plan pour prévoir l'échec adhésif [12] en utilisant la méthode des éléments finis.

Dans notre étude, deux cas ont été analysés : le premier consiste à faire une analyse de deux couches en composite adhésivement collées et le second, comprend trois couches dont la couche du milieu est en alliage d'aluminium. Dans cette analyse, l'effet d'entaille, l'évolution du facteur de concentration de contraintes et la variation du facteur d'intensité de contraintes d'une fissure émanant d'entaille sont mis en évidence. Le défaut géométrique est caractérisé par la concentration de contraintes qui favorise la naissance et la propagation de la fissure. A cet effet, l'influence de l'orientation des fibres du matériau composite, le module de cisaillement de l'adhésif, l'épaisseur de l'adhésif et l'épaisseur du stratifié sur les variations du FCC et du FIC sont examinés en utilisant la méthode des éléments finis.

II. MODÈLE GÉOMÉTRIQUE

Dans cette modélisation, on considère un stratifié en boron/époxy avec une entaille semi-circulaire latérale (Fig. 1). Les dimensions de la plaque stratifiée sont : longueur $h = 280mm$, largeur $w = 180mm$ et l'épaisseur $e_s = 1mm$. L'assemblage considéré est sollicité en traction uniaxiale dans la direction verticale y sous la contrainte appliquée d'amplitude $\sigma = 100MPa$. Les plaques sont collées sur toute la hauteur de recouvrement par un adhésif FM 73 de module de cisaillement $G_a = 410MPa$ et d'épaisseur $e_a = 0.254mm$. Pour permettre d'analyser le comportement en rupture, une fissure

de longueur a est supposé initiée au fond de l'entaille. Les orientations de pli sont variées afin d'analyser leur effet sur l'évolution du facteur de concentration de contraintes au fond d'entaille et le facteur d'intensité de contraintes au fond de fissure.

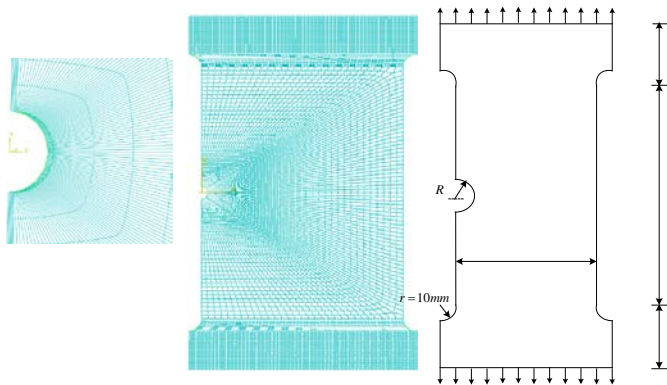


Figure 1. Modèle géométrique et maillage typique de l'assemblage à simple recouvrement

Les caractéristiques mécaniques du matériau composite avec l'orientation des fibres $\theta = 0^\circ$ sont :

Module de Young longitudinal $E_1 = 200GPa$.

Module de Young transversal $E_2 = 25GPa$.

Module de cisaillement $G_{12} = 7.2GPa$.

Coefficient de Poisson $\nu_{12} = 0.21$.

Dans le calcul nous avons employé le code commercial des éléments finis ABAQUS V.6.7.1. [13]. Nous avons utilisé 42852 éléments hexahedrales quadrilatéraux et 198247 nœuds de type C3D20R avec un maillage raffiné et structuré au voisinage de l'entaille comme le montre la Fig.1. En présence de fissure principale le nombre des éléments quadrilatéraux atteint 29617 de type CPS4R et 812 éléments triangulaires de type CPS3. La singularité en tête de fissure peut être intégrée dans la solution en remplaçant les éléments en tête de fissure par des éléments spéciaux quart-point [14].

III. FACTEUR DE CONCENTRATION DE CONTRAINTES AU FOND D'ENTAILLE

Dans ce paragraphe, le facteur de concentration de contraintes au niveau de l'entaille semi-circulaire latérale dans deux couches collées est déterminé. La Fig. 3 présente la variation du K_t au fond d'entaille dans chaque couche en fonction de la variation du rayon d'entaille. L'orientation des fibres de la première couche est $\theta = 0^\circ$ et celle de la deuxième couche est perpendiculaire à la première couche d'un angle $\theta = 90^\circ$. On peut voir que le facteur de concentration de contraintes augmente avec l'augmentation du rayon d'entaille de la deuxième couche ($\theta = 90^\circ$) et le taux d'augmentation de la première couche ($\theta = 0^\circ$) n'est pas très significatif. On note également que le facteur de concentration de contraintes est très important dans la deuxième couche où l'orientation de pli

est 90° en comparaison à la première couche. Dans la première couche le facteur K_t est inférieur à 0.3 et dans la deuxième couche il est supérieur à 2. Cela signifie qu'au fond d'entaille de la seconde couche il y a une concentration de contraintes et dans la première couche il y a une relaxation de contraintes. Ce comportement peut être expliqué par le fait qu'il y a une absorption de contraintes par la couche la plus résistante selon la direction longitudinale où les fibres sont parallèles à la direction de chargement. Le risque de naissance de fissure est alors plus important dans la deuxième couche.

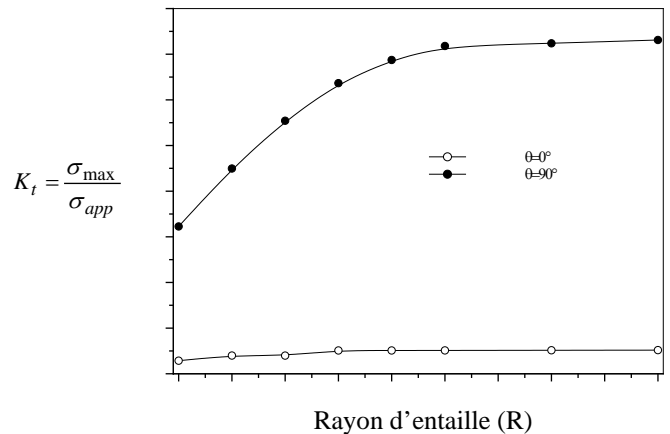


Figure 3. Variation du K_t en fonction du rayon d'entaille

Afin de confirmer les résultats de précédent, la variation du facteur K_t de concentration de contraintes est montrée dans Fig. 4 dans les deux couches en fonction de l'orientation des fibres de la seconde couche. L'angle θ de la première couche est maintenu constant, c'est-à-dire perpendiculaire à la direction des contraintes ($\theta = 0$). On peut noter que lorsque les deux angles d'inclinaison des fibres sont égaux à 0, le facteur K_t de concentration de contraintes pour les deux couches est identique quelque soit le rayon d'entaille. Le facteur de concentration de contraintes K_t est de l'ordre de 1.4 et 1.75 respectivement pour le rayon d'entaille $R = 2mm$ et $R = 8mm$. Ouinas et al. [8,15] indiquent que lorsque le rayon des entailles dans un matériau homogène varie entre 2.54 et 12.7mm, la variation du facteur de concentration de contraintes est comprise entre 2.86 et 3.016 pour les entailles circulaires et entre 3.068 et 3.3 pour les entailles semicirculaires.

La concentration de contraintes au fond d'entaille est plus importante dans le composite stratifié adhésivement collé par rapport à celle des matériaux isotropes si l'orientation de pli tend vers la direction de la contrainte appliquée. Elle est moins importante dans le stratifié en comparaison avec des matériaux isotropes si l'orientation de pli est perpendiculaire à la contrainte appliquée.

On peut également voir dans la Fig. 4 que le facteur K_t dans la première couche augmente asymptotiquement à mesure que l'angle de l'orientation de fibre dans la deuxième couche diminue. La valeur asymptotique est environ 1.4 et 1.75 pour les rayons $R = 2mm$ et $R = 8mm$ respectivement. La

contrainte au fond d'entaille de la première couche (1) diminue à mesure que l'orientation de pli de la deuxième couche augmente. En ce qui concerne la deuxième couche, on montre sur la Fig. 4 que le K_t augmente exponentiellement à partir de l'angle d'inclinaison des fibres $\theta = 45^\circ$ et se stabilise vers une valeur légèrement asymptotique lorsque l'angle des fibres est inférieur à 45° .

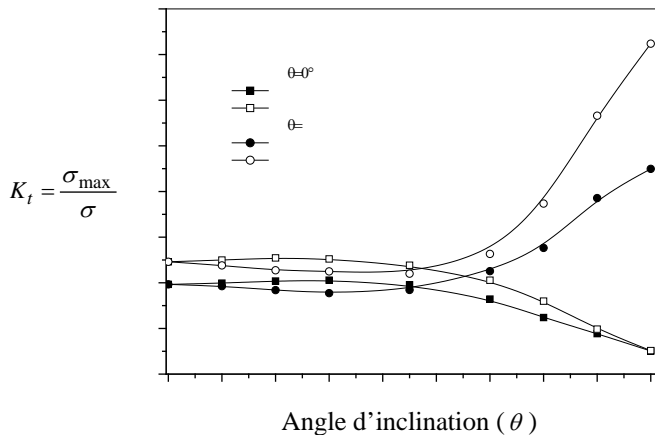


Figure 4. Variation du K_t en fonction de l'angle d'orientation des fibres

IV. EFFET DU MODULE DE CISAILLEMENT DE L'ADHESIF

Le module de cisaillement de l'adhésif est une caractéristique importante influençant les propriétés mécaniques de l'assemblage. Dans le cas des structures laminées, l'adhésif transmet le maximum de tensions aux couches. La Fig. 5 montre l'influence du module de cisaillement de l'adhésif sur l'évolution du facteur de concentration de contraintes K_t dans les deux couches collées en présence de différentes entailles semi-circulaires de rayons $R = 2mm$ et $R = 8mm$. Les orientations de fibres dans la première et deuxième couche sont respectivement $\theta = 0$ et $\theta = 90^\circ$. L'épaisseur de l'adhésif est de $e_a = 0.256mm$.

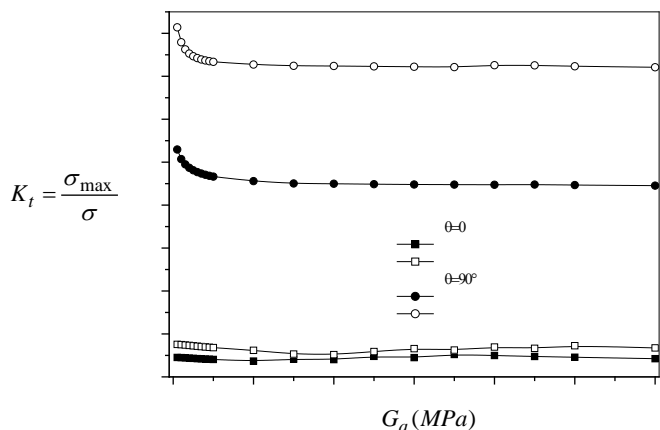


Figure 5. Variation du facteur de concentration de contraintes en fonction de la variation du module de cisaillement de l'adhésif G_a .

Le témoignage de la Fig. 4 indique que le facteur de concentration de contraintes est fortement dépendant du module de cisaillement de l'adhésif lorsque $G_a \leq 200MPa$ dans les deuxièmes couches de $\theta = 90^\circ$. Au-delà de cette valeur, le facteur K_t est stable quelque soit le rayon d'entaille. On peut noter qu'il y a un effet du module de cisaillement de l'adhésif sur le facteur de concentration de contraintes au fond d'entaille dans les deux plaques collées. C'est dû au fait que le transfert d'effort entre les deux couches dans tout l'adhésif est important. La différence des contraintes entre les deux couches est importante avec l'importance du rayon d'entaille semi-circulaire. Dans ce cas la différence du facteur K_t est de l'ordre de 2.75 et 4.45 pour les rayons d'entailles $R = 2mm$ et $R = 8mm$ respectivement.

V. EFFET DE L'ÉPAISSEUR DE L'ADHESIF

L'épaisseur de la couche d'adhésif représente un paramètre géométrique important sur la rupture des structures laminées et devient de plus en plus adhésive lorsque l'épaisseur augmente. La résistance du joint diminue lorsque l'épaisseur du film adhésif augmente. L'analyse par la méthode des éléments finis, nous a permis de déterminer la variation de la contrainte maximale au fond d'entaille en fonction de l'épaisseur de la couche adhésive pour deux entailles semi-circulaires $R = 2mm$ et $R = 8mm$ (Fig. 6). Également le facteur de concentration de contraintes est déterminé dans deux couches de l'assemblage de fibres perpendiculaires.

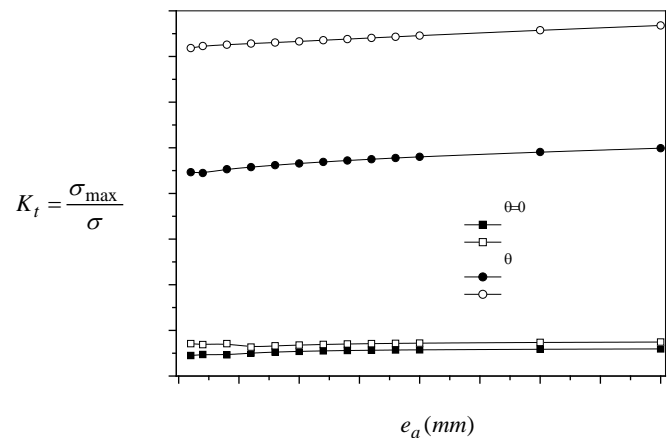


Figure 6. Variation du facteur de concentration de contraintes en fonction de la variation de l'épaisseur de l'adhésif e_a .

On constate que le facteur de concentration de contraintes est quasi-stable lorsque l'épaisseur de l'adhésif augmente. Par conséquent, le facteur de concentration de contraintes est de plus en plus important avec l'importance de du rayon d'entaille semi-circulaire surtout dans les couches dont les fibres sont parallèles à la direction de la contrainte appliquée. On peut conclure que les effets de l'épaisseur de l'adhésive sur la variation du facteur de concentration de contraintes au fond d'entaille dans les stratifiés sont négligeables. Ainsi, les

facteurs obtenus pour la couche orientée à 90° sont largement supérieurs par rapport à ceux obtenus pour la couche orientée à 0°.

VI. EFFET DE L'ÉPAISSEUR DE LA PLAQUE

Cette analyse traite l'influence de l'épaisseur des plaques sur l'ampleur du facteur de concentration de contraintes. La Fig. 7 montre l'effet de l'épaisseur des plaques en composite sur la variation du FCC avec la présence de l'effet d'entaille semi-circulaire. Le facteur de concentration de contraintes augmente exponentiellement avec la diminution de l'épaisseur des couches en composite. L'énergie élastique relâchée par la première couche entaillée ($\theta = 0$) sera absorbée par la seconde couche par le biais des caractéristiques de l'adhésif. On peut voir que l'accroissement de l'épaisseur des couches réduit le FCC au fond d'entaille de façon proportionnelle. On remarque que l'allure du facteur K_t augmente proportionnellement avec le décroissement de l'épaisseur des couches en composite quelque soit l'orientation des fibres. Cet accroissement est beaucoup plus marqué lorsque l'épaisseur des couches tend à une valeur nulle. Au-delà de l'épaisseur $e_p \geq 2$, le facteur de concentration de contraintes en présence d'entaille converge à une valeur asymptotique.

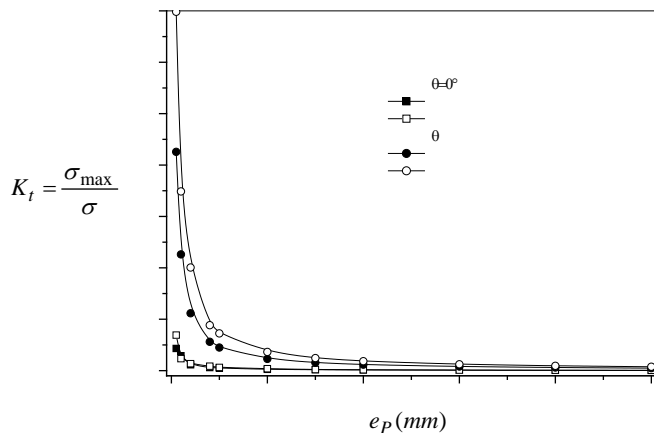


Figure 7. Variation du facteur de concentration de contraintes en fonction de la variation de l'épaisseur des couches du stratifié e_p .

VII. FACTEUR D'INTENSITE DE CONTRAINTES D'UNE FISSURE EMANANT D'ENTAILLE

Dans ce paragraphe, on analyse le comportement d'une fissure émanant d'entaille semi-circulaire dans le stratifié en composite composé de deux couches adhésivement collées. On considère deux cas, le premier consiste à supposer que la fissure se trouve dans la première couche du composite, c'est-à-dire l'orientation des fibres est perpendiculaire à la contrainte appliquée. Le second, la fissure se trouve dans la couche dont l'orientation des fibres est parallèle à la charge appliquée. La Fig. 8 présente la variation du facteur d'intensité de contraintes en mode I en fonction de l'avancée de la fissure émanant de différentes entailles dans la première couche (1) où l'orientation de pli est $\theta = 0$. On constate que le facteur

d'intensité de contraintes augmente exponentiellement avec la diminution de la longueur de la fissure. Le facteur K_I atteint son maximum pour la plus faible longueur de fissure. On remarque que l'effet de l'entaille disparaît à partir de la longueur de fissure $a = 20\text{mm}$ est cela quelque soit le rayon de l'entaille semi-circulaire.

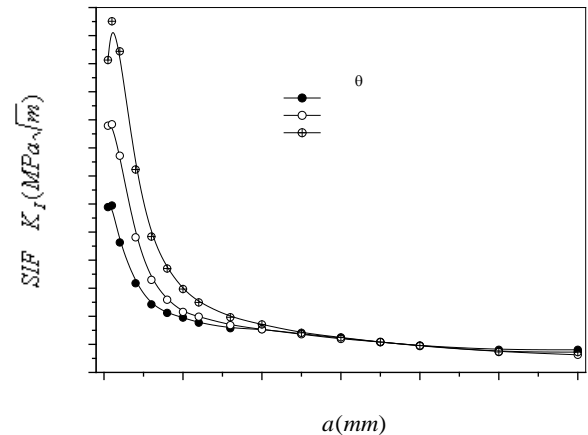


Figure 8. Variation du facteur d'intensité de contraintes en fonction de la longueur de la fissure émanant d'entaille de la couche 1 ($\theta = 0$).

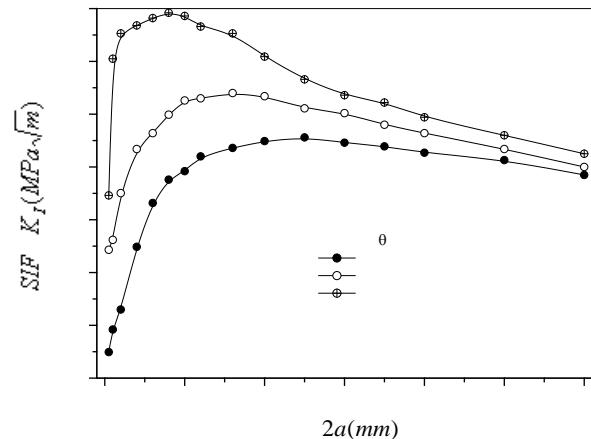


Figure 9. Variation du facteur d'intensité de contraintes en fonction de la longueur de la fissure émanant d'entaille de la couche 2 ($\theta = 90^\circ$).

La Fig. 9 représente la variation du facteur d'intensité de contraintes en mode I en fonction de la propagation de la fissure émanant de différentes entailles dans la seconde couche (2) où l'orientation de pli est $\theta = 90^\circ$. La Figure montre que le facteur d'intensité de contraintes est très important dans la deuxième couche (2) en comparaison avec la première (1). Cela signifie que l'effet des propriétés mécaniques sur la variation du FIC est très significatif. Ce dernier augmente sensiblement pour les trois cas de rayon d'entaille lorsque la taille de la fissure est inférieure à 15mm. En dépassant cette valeur, le FIC diminue avec l'accroissement de la fissure. Lorsque la fissure se propage de l'entaille elle reçoit une force motrice du champ de contraintes qui l'entoure et l'énergie est plus importante au voisinage de l'entaille. La diminution du

facteur d'intensité de contraintes influence directement la cinétique de la fissure.

On observe un comportement important en examinant les résultats de la Fig. 9. C'est le fait que les facteurs d'intensité de contraintes montrent un comportement décroissant au fur et à mesure que la longueur de la fissure augmente, quelque soit la position de la fissure dans le stratifié. Cet effet est dû à la présence de la couche adhésive. La présence de la couche adhésive conduit à une réduction du FIC à la pointe de la fissure dans les adhérents du stratifié.

VIII. EFFET DU MODULE DE CISAILLEMENT DE L'ADHESIF SUR LE FIC

Pour analyser l'effet du module de cisaillement sur la variation du facteur d'intensité de contraintes nous avons supposé une fissure émanant d'entaille semi-circulaire de longueur $a=2\text{mm}$. Les rayons d'entaille sont respectivement $R=2$ et 8mm . L'épaisseur de l'adhésif $e_a = 0.256\text{mm}$. La Fig. 10 montre la variation du facteur d'intensité de contraintes dans chaque couche du stratifié en fonction du module de cisaillement de l'adhésif. On observe que l'augmentation du module cisaillement de l'adhésif mène à une réduction du facteur d'intensité de contraintes à la pointe de la fissure dans les deux couches collées. Le taux de réduction est plus significatif dans la deuxième couche où l'orientation de fibre est de $\theta = 90^\circ$. Un effet sensible du module de cisaillement sur le facteur d'intensité de contraintes existe semblablement au facteur de concentration de contraintes au fond d'entaille. On peut conclure que des valeurs plus élevées du module de cisaillement améliore la résistance à la propagation de la fissure dans l'adhérent mais réduit cette résistance en adhésif. Donc le choix du module de cisaillement dans l'ensemble du stratifié doit être optimisé.

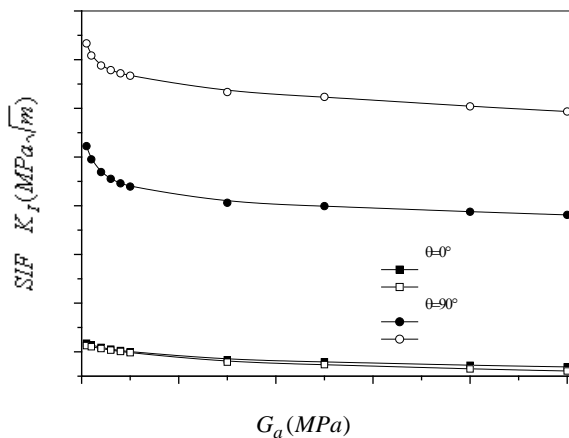


Figure 10. Variation du FIC en fonction de la variation du module de cisaillement de l'adhésif G_a .

I.X. EFFET DU MODULE DE CISAILLEMENT DE L'ADHESIF SUR LE FIC

Pour mettre en évidence l'effet de l'épaisseur de l'adhésif FM 73 nous avons tracé sur la Fig. 11 la variation du SIF d'une fissure émanant de différentes entailles dans les deux couches du stratifié. On note que le FIC a un comportement

inverse comparativement à son évolution en fonction du module de cisaillement. Pour la seconde couche, la variation de l'épaisseur adhésive a un effet important sur l'évolution de facteur d'intensité de contraintes. La variation du FIC n'est pas importante lorsque l'épaisseur de l'adhésif tend à une valeur double de celle des couches du stratifié. En effet, l'augmentation de l'épaisseur adhésive aboutit à un accroissement du facteur d'intensité de contraintes au fond de fissure. La réduction de l'épaisseur adhésive améliore la résistance à la propagation de fissure dans l'adhérent mais en contre partie elle réduit la résistance d'adhérence.

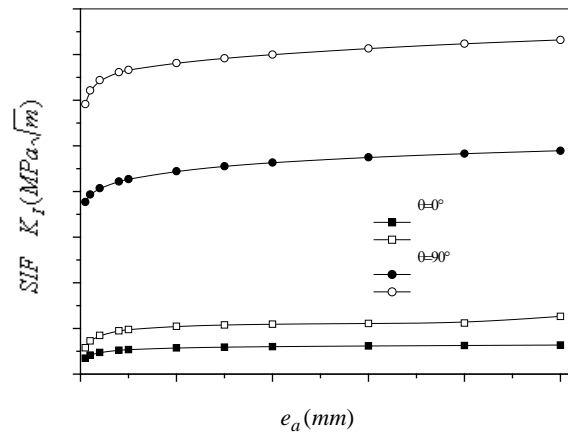


Figure 11. Variation du facteur d'intensité de contraintes en fonction de la variation de l'épaisseur de l'adhésif e_a .

X. CONCLUSION

Cet article traite l'influence de l'orientation des fibres du matériau composite du stratifié en présence d'entaille semi-circulaire sur la variation du facteur de concentration de contraintes et le facteur d'intensité de contraintes. Le module de cisaillement de l'adhésif, son épaisseur et l'épaisseur de couche du stratifié jouent un rôle essentiel sur la distribution des concentrations de contraintes aux voisinages de l'entaille 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 entraîne un retardement de la naissance de la fissure, et contribue à l'augmentation de la durée de vie de la structure.
- Le facteur de concentration de contrainte au font d'entaille n'est affecté par les propriétés de la couche adhésives, l'augmentation de celle-ci n'a pas des effets significatifs.
- Les concentrations de contraintes au fond de l'entaille sont plus importantes dans la couche où l'orientation des fibres sont parallèles à la charge appliquée, et vice versa, elles sont faible lorsque les fibres sont perpendiculaires.
- Le FCC K_I augmente proportionnellement avec le décroissement de l'épaisseur du pli en composite et cela quelque soit l'orientation des fibres. Cet accroissement est beaucoup plus marqué lorsque l'épaisseur tend à une valeur nulle. Donc, l'épaisseur du pli doit être optimisée.

• La mauvaise orientation des fibres du stratifié par rapport à l'avancée de la fissure influe sur la rentabilité de l'assemblage.

• Pour les faibles longueurs de fissure émanant d'entaille, le facteur d'intensité de contraintes est important, cette ampleur diminue avec l'augmentation de la taille de la fissure en convergeant vers une valeur asymptotique.

• Le FIC de la fissure émanant d'entaille est réduit lorsque l'angle de l'orientation de pli augmente. Un effet inverse se produit au fond d'entaille, le facteur de concentration de contraintes augmente.

R F R E N C E S

- [1] AA. Baker., Growth characterisation of fatigue cracks repaired with adhesively bonded boron/epoxy patches. In: Proceeding of International Conference on Fracture, ICF-9.1974, pp 117-28.
- [2] 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 Int. Conf. on Ad. Comp. Mat. pp 45-9, 1993.
- [3] AA. Baker., Repair of cracked or defective metallic aircraft components with advanced fibre composites Dan overview of Australian work. Comput. Struct. 2, 1984, pp. 153-81.
- [4] 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.
- [5] T. Ting, R. Jones., WK. Chiu., IH. Marshal, & JM. Greer, Composite repairs to rib Stiffened pannel. Comp. Struct., 47. 1999, pp. 737-743.
- [6] 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.
- [7] R. Jones. WK. Chiu, Composite repairs to crack in metallic components. Comp. Struct.; 1999, 62:431-43.
- [8] D.Ouinass, B. Bachir Bouiadjra and B.Serier., The effects of disbond on the stress intensity factor of aluminium panels repaired using composite materials. Journal of Composite Structures 80, 2007, pp 514-522.
- [9] D. Ouinas, A. Hebbar, Full Width disbonding Effect on Repaired Cracks in Aircraft Structural Panels with Bonded Composite Patches, Journal of Thermoplastic composite materials, Vol. 23, July 2010
- [10] D. Ouinas, Effect of disbonding between a composite patch and a cracked aluminium plate on the stress intensity factor. Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 29, No. 14, 2010.
- [11] L. Hollaway, A. Romhi, M. Gunn, Comp. Stuct. 19, 1990, 125-170.
- [12] R. Long, J. Comp. Mater. 25, 1991, 391-415.
- [13] ABAQUS Ver 6.7.1, User Guide, 2007.
- [14] R.D. Henshel, K.G. Shaw, Int. J. Numer. Methods Eng. 9, 1975, 495-507.
- [15] D. Ouinas, B. Serier and B.Bachir 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 composites et des matériaux avancés. Vol 13. n°2, 2003.