

IV.1. 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 un côté ou aux deux côtés de la pièce fissurée pour étendre sa durée de vie de service [79-84]. Cette méthode a été employée pour réparer quelques composants d'avions vétustes. Les structures d'avion sont renforcées de tôles minces de métal plus dur. Quand une fissure est découverte à l'intérieur de la structure, le patch est collé sur la partie de la région fissurée. Pour appliquer cette technique à un problème pratique, on prend en considération beaucoup d'aspects, tel que l'analyse de contraintes statiques et résistance à la fatigue, préparation superficielle, choix de l'adhésif, etc. Un aspect important dans le collage d'un patch est de prévoir des tensions, des facteurs d'intensité de contraintes et la force de cisaillement.

En employant l'approche de la mécanique de la rupture linéaire élastique, Rose [85] a montré que le facteur d'intensité de contraintes n'augmente pas infiniment avec l'augmentation de la longueur de la fissure pour une plaque contenant une fissure centrale réparée par collage d'une pièce de renforcement. Il a aussi expliqué que la raison de ce comportement asymptotique était due au mécanisme de rapprochement fissure/pièce de renforcement, tel que la charge appliquée pourrait être entièrement transmise à travers la fissure avec seulement un déplacement fini relatif entre les faces de la fissure. En attendant, le facteur d'intensité de contraintes des fissures renforcées dans des structures a été obtenu selon la supposition d'une distribution continue de contraintes agissant entre les faces de la fissure [86-87]. Quelques chercheurs ont évalué l'effet de joint, avec la croissance d'une fissure centrale soumise à une charge uniforme [88-89].

Le patch fournit la redistribution alternative de contraintes; ainsi, la distribution de contraintes originales est transférée au renfort par l'attachement. La vie de fatigue et les contraintes résiduelles de la tôle réparée dépendent de l'efficacité de l'attachement, comment transférer la charge de la tôle fissurée à la pièce de réparation [90]. L'avantage principal de l'adhésif sur les méthodes d'attachement restantes comme les rivets ou les boulons, fournit plus d'uniformité de la redistribution de la charge en réduisant au minimum les concentrations de contraintes.

La méthode d'attachement par adhésif a été étudiée par plusieurs auteurs. Les travaux de réparation indiquent que l'épaisseur des tôles fissurées soit très petite, pour que la dimension

du problème soit plane. Ces problèmes ont été résolus en employant la théorie elasto-statique bidimensionnelle. Jones et al. [91] ont proposés une matrice de rigidité pour l'attachement adhésif-patch employée en conjonction avec la matrice de rigidité standard. Tarn et Shek [92] ont fait une modélisation de cisaillement de l'adhésif en employant la FEM et BEM pour leurs calculs. Young A et al., [93] ont employé la méthode des frontières « BEM » pour la modélisation de l'adhésif liant la tôle fissurée et le patch.

Cette étude porte sur la méthode de réparation en employant des patches semi-circulaires, adhésivement collées sur une plaque fissurée au bord. Dans ce travail, la méthode des éléments finis est appliquée pour analyser le comportement d'une fissure réparée par un renfort. La connaissance de la distribution des contraintes au voisinage des fissures a une importance pour l'analyse de leur réparation en présence du décollement sous le patch. Les effets des propriétés mécaniques et géométriques sur la variation du facteur d'intensité de contraintes à la pointe de la fissure en mode I ont été mis en évidence.

IV.2. Modèle géométrique

Dans cette modélisation, on considère une plaque rectangulaire mince en alliage d'aluminium ayant les dimensions suivantes : longueur $H = 200mm$, largeur $w = 100mm$ et l'épaisseur $e_p = 2mm$. On suppose une fissure de longueur $a(mm)$ située à l'extrémité de la plaque.

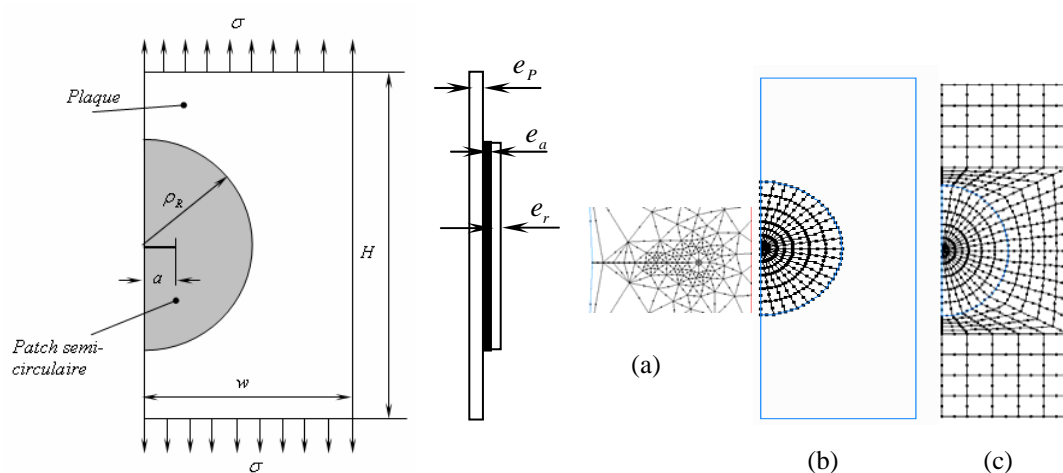


Figure IV.1. Modèle géométrique et maillage de la structure (plaque et patch), (a) Fissure à bord, (b) Patch collé sur la fissure et (c)- Plaque fissurée.

La plaque considérée est sollicitée en traction uniaxiale dans la direction verticale "Y" sous la contrainte appliquée d'amplitude $\sigma = 120 \text{ MPa}$. Une pièce (patch) en matériau composite (bore/époxyde) est collée sur la fissure comme l'indique la Figure IV.1. La dimension de la pièce est : diamètre $d_r = 2\rho_r = 80 \text{ mm}$, épaisseur $e_r = 2 \text{ mm}$. Les propriétés du matériau du patch sont regroupées dans le tableau 1. Les propriétés adhésives sont : Le module de cisaillement G_a et l'épaisseur e_a .

Les caractéristiques mécaniques du matériau étudié sont reportées dans le tableau suivant :

Propriétés	Aluminum AlCu4Mg1Mn	Boron/époxy	Adhésif
$E_1(\text{MPa})$	$7.2 \cdot 10^4$	$208 \cdot 10^3$	
$E_2(\text{MPa})$		$25.4 \cdot 10^3$	
ν_{12}	0.33	0.1677	0.32
$G_{12}(\text{MPa})$		$7.2 \cdot 10^3$	965
$G_{13}(\text{MPa})$		$7.2 \cdot 10^3$	
$\alpha(10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$	22.7	4.5	50.0

Tableau IV.1. Caractéristiques mécaniques de l'assemblage.

On considère que le comportement de la fissure est instable. Les caractéristiques mécaniques et géométriques de la plaque et du patch sont notées par les indices p et r respectivement.

De nombreux matériaux présentent des hétérogénéités microstructurales importantes telles que les inclusions, les cavités et les microfissures,...etc. Le comportement élastique des matériaux est très affecté par la présence de défauts qui peuvent entraîner l'affaiblissement de la structure et provoquer sa destruction. Dans les zones à fortes concentrations de contraintes dues aux effets géométriques ou métallurgiques, des microfissures apparaissent; ces microfissures se développent et coalescent les unes avec les autres jusqu'à ce qu'elles forment une fissure de taille macroscopique qui se propage jusqu'à la ruine de la structure [94]. Puisque le rôle du patch est de recevoir les concentrations de contraintes entourées du défaut à travers l'adhésif, il est considéré par ailleurs comme un défaut géométrique (entaille).

Pour réparer la configuration instable nous employons un patch semi-circulaire et nous l'attachons soit sur un côté soit sur les deux côtés de la plaque. Le transfert de tensions et de déformations de la plaque vers le patch est assumé pour que les déplacements et les tensions à l'interface de la plaque et du patch soient continus.

Pour déterminer les contraintes locales, nous avons utilisé des éléments quadrilatéraux à 8 nœuds avec un maillage dense au voisinage de la fissure et au niveau du patch (voir Figure IV.1). La résolution a été faite en état de contraintes planes.

IV.3. Modélisation par éléments finis

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 multi-couches à l'Université Kansas et est basé sur la théorie de la mécanique de rupture linéaire et non-linéaire élastique [95].

Dans notre étude, des hypothèses simplificatrices sont posées pour permettre la résolution du problème. Ces hypothèses sont :

- Chaque couche est considérée comme une structure bi-dimensionnelle dans un état de contraintes planes.
- Les couches peuvent être assemblées deux à deux par une couche d'adhésif.
- La couche adhésive est homogène, linéaire, élastique et isotrope.
- L'adhésif travaille uniquement en cisaillement et la déformation est uniforme à travers l'épaisseur de l'adhésif.

Les contraintes de cisaillement dans l'adhésif sont données par la relation ci-après :

$$\tau = \frac{G_a}{e_a} (u_1 - u_2)$$

Où u_1 et u_2 représentent les déplacements de la plaque et du patch.

IV.4. Facteur de concentration de contraintes du patch

Il est connu que la concentration de contraintes de cisaillement et de décollement se produit au niveau des bords libres. La déformation maximale est atteinte à ce niveau. Pour mieux illustrer la variation du champ de contraintes dans le patch collé sur la fissure, nous avons tracé la variation du facteur de concentration de contraintes dans le patch pour différentes longueurs de la fissure émanant du bord de la plaque (Voir Figure IV.2).

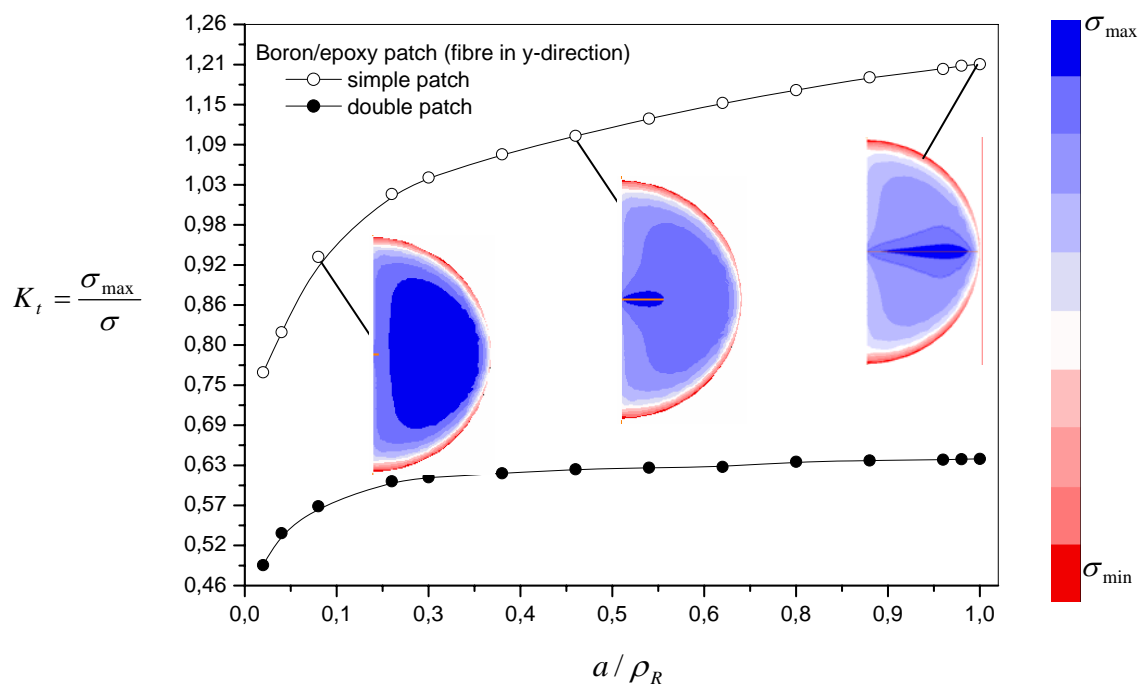


Figure IV.2. Variation du facteur de concentration de contraintes du patch en boron/époxy en fonction de la taille de la fissure centrée.

Le diamètre du patch est de $d_R = 80mm$. On constate que l'énergie de déformation créée en têtes de fissure est de plus en plus importante avec l'importance de sa longueur. Le facteur de concentration de contraintes augmente proportionnellement avec la taille de la fissure. Les contraintes maximales règnent autour de la fissure et diminuent proportionnellement en s'éloignant de celle-ci. Les contraintes minimales sont concentrées autour du bord du patch.

On remarque que les niveaux de concentrations de contraintes illustrées autour de la fissure confirment le transfert réalisé par plaque vers le patch. Les contraintes maximales se trouvent sur les lèvres de la fissure; les contraintes minimales se décroissent vers la périphérie du patch. Le facteur de concentration de contraintes augmente indéfiniment avec l'augmentation de la taille de la fissure réparée par un seul patch, pour le double patch en boron/époxy la stabilisation du facteur K_t apparaît à partir du rapport $a / \rho_R = 0.3$. Ouinas [96] indique un rapport de $a / \rho_R = 0.25$ pour un renforcement d'une fissure centrale avec un patch circulaire en boron/époxy.

IV.5. Influence du module de cisaillement de l'adhésif sur le facteur K_t du patch

Le module de cisaillement de l'adhésif est une caractéristique importante influençant les propriétés mécaniques de l'assemblage ou la réparation des fissures [96]. Dans le cas de renforcement des parties faibles de la structure sans la présence de fissure, l'adhésif transmet le maximum de tensions au patch. La figure IV.3 montre l'influence du module de cisaillement de l'adhésif sur l'évolution du facteur de concentration de contraintes pour un simple et double patch. L'épaisseur de l'adhésif est de $e_a = 0.127mm$.

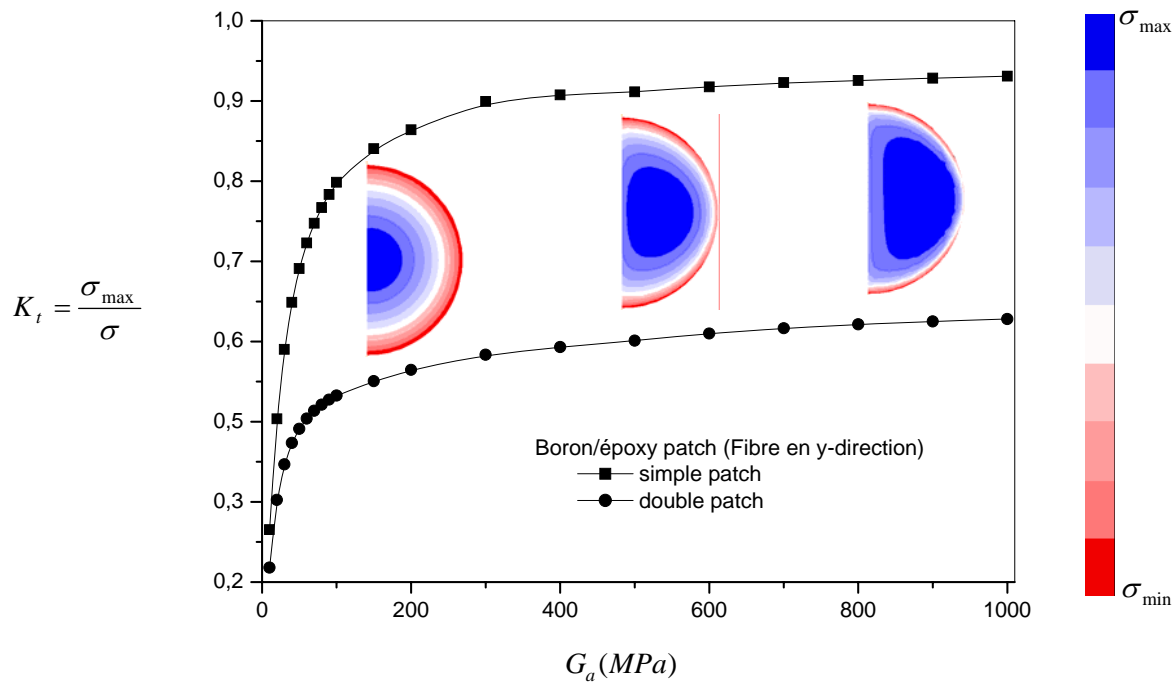


Figure IV.3. Variation du facteur de concentration de contraintes en fonction de la variation du module de cisaillement de l'adhésif G_a .

Le témoignage de la figure IV.3 indique que le facteur de concentration de contraintes est fortement dépendant du module de cisaillement de l'adhésif lorsque $G_a \leq 300MPa$. Au de là de cette valeur la du facteur K_t est stable pour le simple et double patch et la capacité d'absorption de ce dernier prend de l'importance en vue de l'élargissement de la zone maximale de contraintes. Les contraintes minimales disparaissent avec l'accroissement du module de cisaillement de l'adhésif.

IV.6. Effet de l'orientation des fibres du patch sur le FIC

Pour mettre en évidence l'effet de la direction des fibres du matériau composite du patch semi-circulaire sur la réparation de la fissure, nous avons considéré deux cas. Le premier

consiste à prendre les fibres dans la direction de la fissure (x-direction), c'est-à-dire que E_1 soit dans la direction des abscisses. Dans le second cas, ces fibres sont perpendiculaires à la fissure, E_1 soit parallèle à l'axe des ordonnées (y-direction).

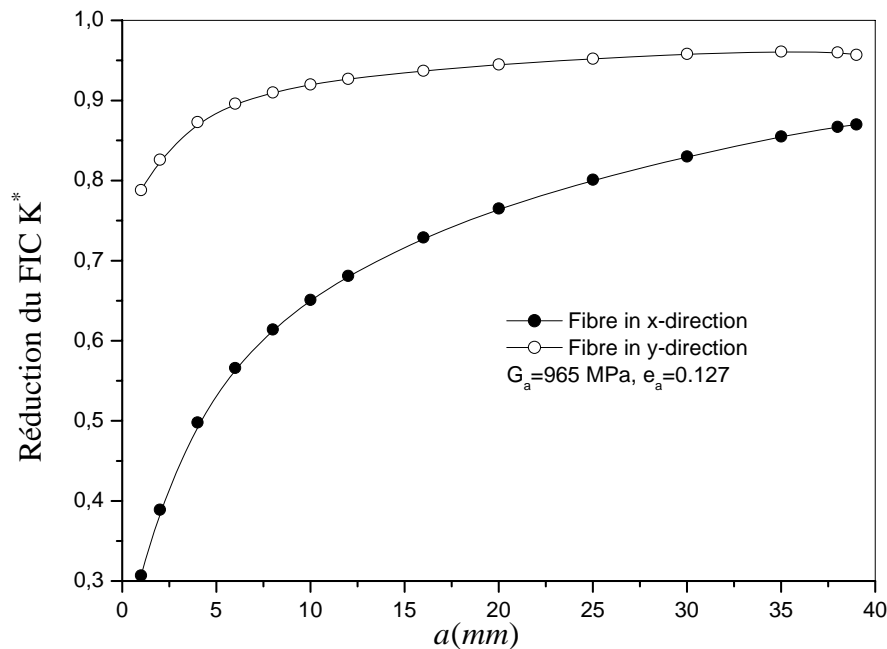


Figure IV.4. Effet de l'orientation des fibres du patch sur la réduction du FIC.

Les résultats obtenus sont représentés sur la figure IV.4. Sur cette dernière nous avons représenté la variation du facteur adimensionnel de la réduction du facteur d'intensité de contraintes en fonction de la longueur de la fissure. Le facteur de la réduction du FIC est défini par [97,98] :

$$K^* = 1 - \frac{K_{rép}}{K_{nrép}}$$

$K_{rép}$ et $K_{nrép}$ FIC d'une fissure respectivement réparée et non réparée.

On remarque que la bonne orientation fibres du patch par rapport à la fissure dans le processus de réparation conduit à des différents FIC en pointe de fissure. L'allure du facteur d'intensité de contraintes de la fissure réparée par le patch des fibres en y-direction converge rapidement à partir de $2a \geq 10 \text{ mm}$ par rapport au patch en composite dont les fibres sont en x-direction. La réduction du facteur d'intensité de contraintes s'améliore à mesure que

l'orientation des fibres les plus rigides soient perpendiculaires à l'avancée de la fissure. La réduction maximale obtenue par le patch dont les fibres sont en y-direction est presque trois fois plus grande par rapport au patch en composite de fibre en x-direction.

IV.7. Étude du décollement le long de la ligne centrale du patch

Une étude [99] sur la vie en fatigue du décollement, celle du décollement de grande largeur centrale (Full-Width Disbond: FWD) a montré que ce phénomène est plus nuisible à la vie en fatigue d'une éprouvette réparée quand ce dernier est davantage en contact avec la partie réellement endommagée.

Ces résultats expérimentaux montrent que la zone la plus sensible au décollement est celle qui contient la région fissurée. Ce comportement nous a conduit à s'intéresser plus particulièrement l'étude de l'évolution du facteur d'intensité de contraintes en prenant en considération le décollement le long de la largeur centrale du patch, celle qui couvre la fissure. Ce facteur est noté K_d . Nous avons représenté sur la figure IV.5 la zone de décollement de l'éprouvette réparée.

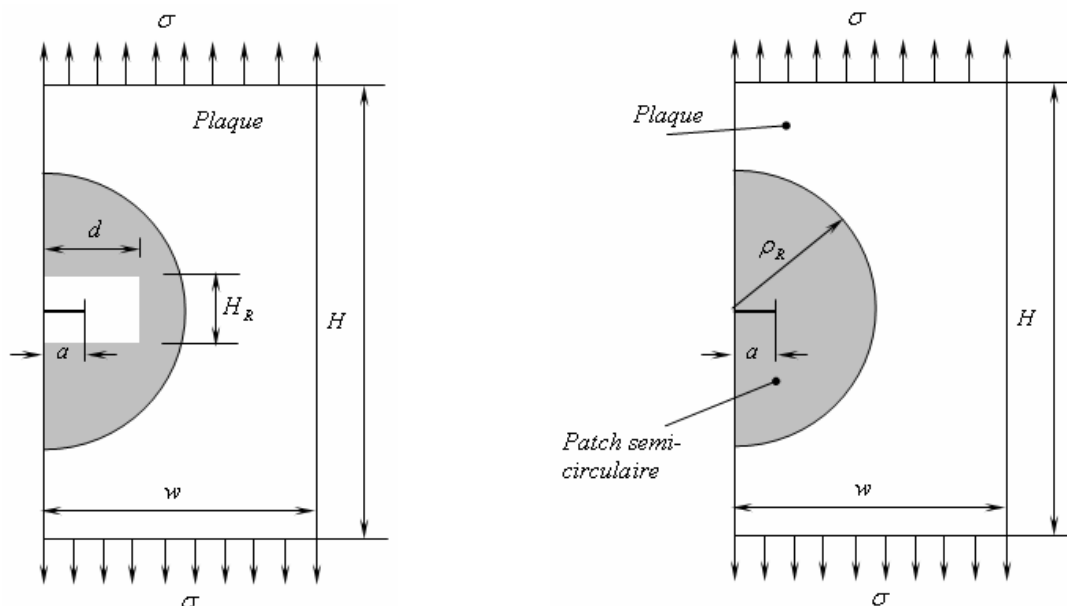


Figure IV.5. Modèle géométrique du décollement le long de la largeur centrale du patch W_r

L'étude consiste à suivre l'évolution du facteur d'intensité de contraintes K_d de la plaque réparée, lorsque la longueur de décollement (d) augmente tout en maintenant la hauteur H_d constante. Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure IV.6, qui montre l'évolution du FIC K le long de la largeur centrale du patch pour trois longueurs de fissure.

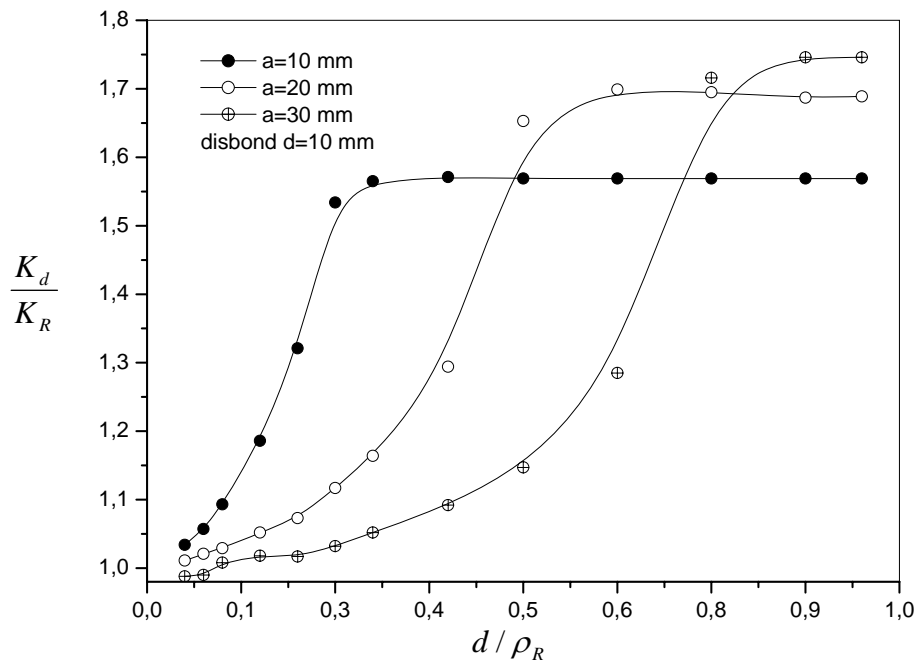


Figure IV.6. Evolution du facteur d'intensité de contraintes en fonction de la largeur du décollement pour trois longueurs de la fissure.

Nous constatons que, quelle que soit la taille de la fissure, le K_d croît progressivement au fur et à mesure que le décollement tend vers la pointe de fissure. L'optimum de K_d est atteint lorsque la distance entre la pointe de fissure et le décollement tend à une valeur nulle. Lorsque le décollement dépasse la pointe de fissure pour tendre vers la limite de la largeur du patch, le facteur K_d se stabilise. Le même comportement de K_d le long de la largeur du patch est remarqué pour les trois longueurs de la fissure. Le K_d caractérisant le décollement augmente avec la longueur de la fissure renforcée. Les décollements de grande largeur centrale ont montré une augmentation plus importante et plus significative de K_d de la plaque réparée. C'est donc la taille de la fissure et le mode de décollement qui détermine l'intensité de K_d .

Dans la suite de notre étude, on se place dans ce contexte, c'est à dire dans les conditions les plus défavorables pour le renforcement à savoir un décollement de grande largeur centrale avec les mêmes tailles de fissures.

IV.8. Influence de la hauteur du décollement sur le FIC K_d

Dans ce paragraphe, nous étudions l'effet de la hauteur du décollement sur le facteur d'intensité de contraintes K_d . Le renforcement des plaques fissurées par des patches en composite réduit la vitesse de propagation de la fissure et augmente la durée de vie de la structure endommagée [98]. Par contre le décollement est un phénomène néfaste pour la structure renforcée. Dans ce cas le facteur d'intensité de contraintes est amplifié et sa valeur dépend des caractéristiques mécaniques des matériaux [98].

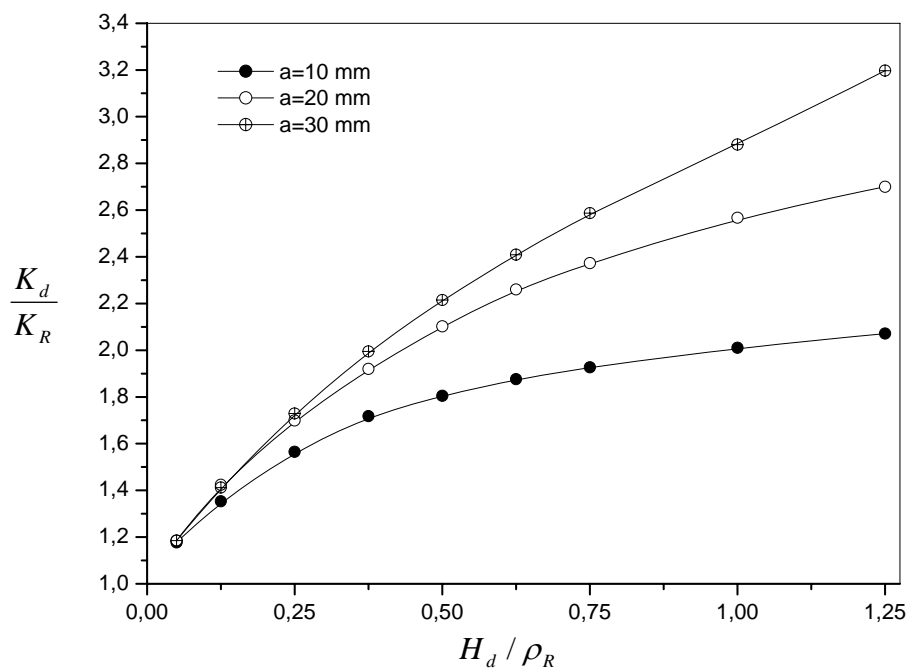


Figure IV.7. Variation du FIC en fonction de hauteur du décollement.

Sur la figure IV.7 nous avons illustré la variation de K_d en fonction de la hauteur de décollement H_d . Nous remarquons que le K_d croît avec l'augmentation de cette hauteur. Nous remarquons que le FIC K_d augmente quadratiquement avec l'augmentation de la

hauteur du décollement. En augmentant la longueur de la fissure, la relation reliant le FIC K_d avec la hauteur du décollement aura tendance à être linéaire.

IV.9. Influence de l'épaisseur de l'adhésif

Pour illustrer l'influence de la couche adhésive sur l'effet négatif du décollement nous avons représenté la variation du facteur adimensionnel de la réduction du facteur d'intensité de contraintes en fonction de l'épaisseur du film adhésif (e_a). On définit le facteur de la réduction du FIC par :

$$K_d^* = 1 - \frac{K}{K_d}$$

K_d et K FIC d'une fissure réparée avec et sans présence du décollement respectivement.

Pour montrer l'influence du décollement sur l'amplification des contraintes au niveau de la pointe de la fissure, nous avons tracé la variation du facteur de réduction du facteur d'intensité de contraintes K_d^* en fonction de l'épaisseur adhésive pour différentes hauteurs du décollement. Le diamètre du patch est égal à quatre fois la longueur de la fissure réparée (figure IV.8).

On peut voir dans cette figure qu'une réduction de l'épaisseur de l'adhésif augmente la valeur du facteur K_d^* , ce qui signifie qu'une faible épaisseur de l'adhésif est recommandée pour renforcer les fissures. On peut constater que les courbes présentent deux domaines distincts. La première partie le facteur K_d^* décroît rapidement vers l'épaisseur adhésive environ $e_a = 2mm$. Cette partie peut être décrite par la relation $K_d^* = \beta(e_a)^{-\alpha}$ tel que β et α sont des coefficients. La deuxième partie de la courbe $e_a > 2mm$, le facteur K_d^* varie linéairement en fonction de l'épaisseur adhésive.

On remarque aussi que la réduction est amplifiée en augmentant la hauteur du décollement H_d . Dans ce cas, il apparaît clairement que le décollement entraîne une amplification du

facteur d'intensité de contraintes et par conséquent l'augmentation de la cinétique de propagation de la fissure.

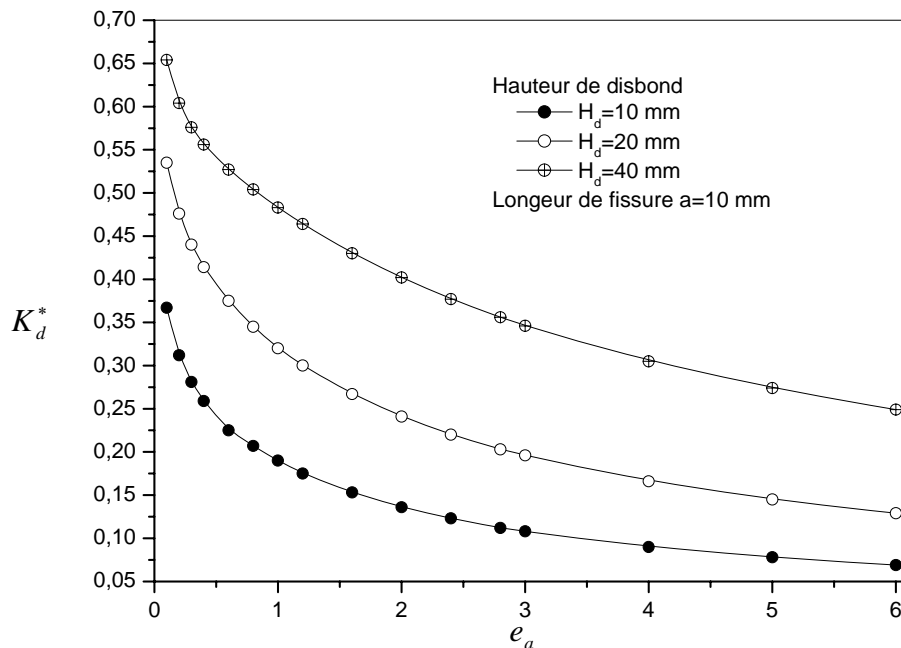


Figure IV.8. Variation du FIC en fonction de l'épaisseur adhésive e_a

On remarque que l'allure du paramètre de réduction K_d^* de la fissure réparée est inversement proportionnelle à la couche adhésive. Cet accroissement est beaucoup plus marqué lorsque l'épaisseur de l'adhésif tend à une valeur minimale.

IV.10. Influence de l'épaisseur du patch

La qualité du patch et ses propriétés mécaniques et géométriques sont essentiels dans le renforcement des structures endommagées. Pour mieux illustrer l'influence de l'épaisseur du patch de renforcement sur le comportement en rupture de la plaque fissurée, nous avons représenté sur la figure IV.9 la variation du FIC en fonction de l'épaisseur du patch semi-circulaire avec la présence du décollement. On remarque que l'augmentation de l'épaisseur du patch permet une meilleure relaxation du champ de contraintes autour de la zone endommagée et par conséquent un ralentissement de la cinétique de la fissure.

La figure IV.9 indique que la réduction du FIC augmente avec l'augmentation de l'épaisseur du patch pour des auteurs de disbond supérieures à la taille de la fissure. Un comportement

inverse se produit lorsque la longueur de la fissure dépasse la hauteur de décollement. Pour une hauteur du FWD disbond est égale à deux et trois fois la longueur de la fissure, la réduction du patch dépasse 50% et 60% respectivement lorsque l'épaisseur du patch est supérieure à 1mm. La plus faible réduction du FIC est obtenue pour une hauteur de décollement réduite.

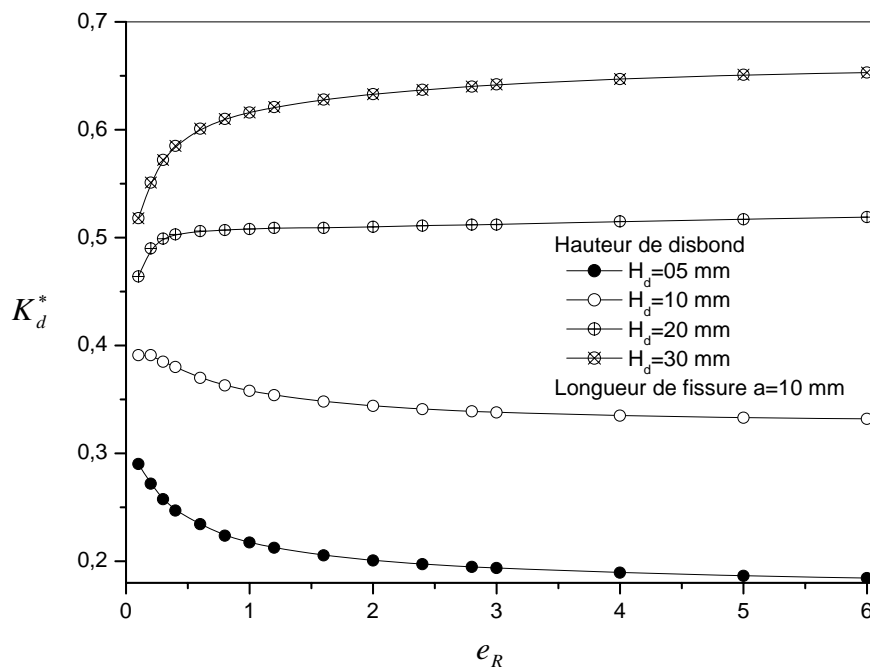


Figure IV.9. Variation du FIC en fonction de l'épaisseur du patch.

IV.11. Influence du rapport $2a/d_R$

L'influence de la largeur du patch sur l'évolution du facteur d'intensité de contraintes peut être analysée par calcul de la variation de K en fonction du rapport a/d_R pour trois valeurs de la hauteur du décollement FWD $H_d = 10, 20$ et 30 mm. Le décollement pourrait être provoqué en excédant la capacité d'absorption du patch lorsque la fissure se développe sous la pièce de renforcement. Dans ce cas on étudie l'approche de la fissure vers l'extrémité du patch collé qui peut causer un échec de l'adhésif tout en produisant un décollement total.

La figure IV.10 montre que, la variation du FIC varie selon trois stades différents (I, II et III). Dans ce cas, la longueur de la fissure augmente et la largeur du patch décroît. Pour le premier

stade ($0 < a/d_R \leq 0.12$) au cours duquel se développe une déformation importante du patch à une vitesse de propagation de la fissure continûment croissante.

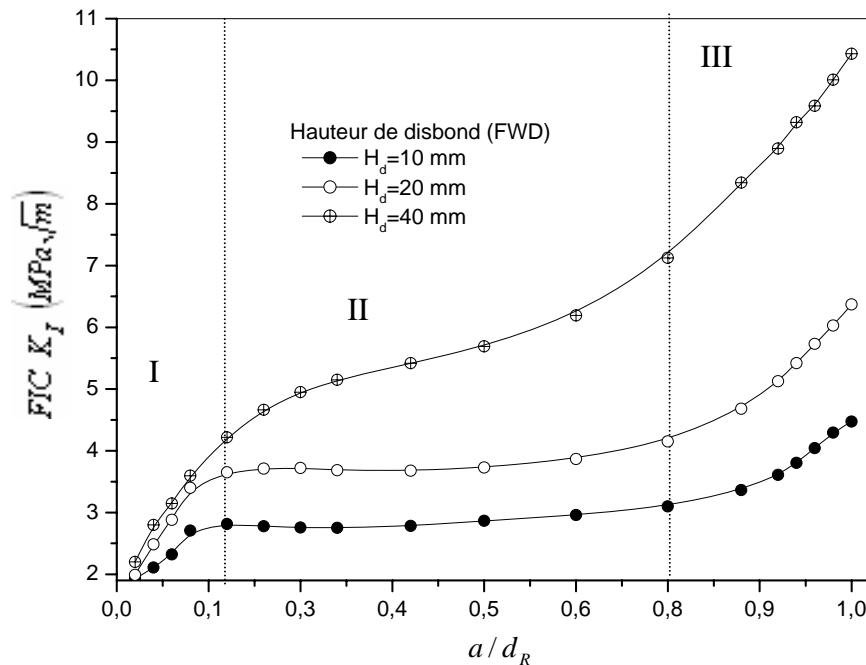


Figure IV.10. Variation du FIC en fonction du rapport $2a/d_R$.

On remarque que le FIC augmente sensiblement avec l'augmentation de la taille de la fissure. La vitesse de propagation de la fissure est importante, car elle reçoit une force motrice à partir de l'extrémité de la plaque. Dans le deuxième stade ($0.12 \leq a/d_R \leq 0.8$) on remarque qu'il y a une évolution quasi-stable regroupant du facteur d'intensité de contraintes et la taille de la fissure. Le patch influe considérablement sur la propagation de la fissure et produit sa retardation. La valeur du FIC croît avec l'accroissement de la hauteur du décollement. Lorsque la hauteur du décollement augmente, l'allure du FIC avec l'avancée de la fissure aura tendance de ce transformer d'une relation constante vers une allure progressive et linéaire. Le troisième stade ($0.8 \leq 2a/d_R \leq 1$) montre le relancement et l'accélération de la fissure immaîtrisable par le patch du renforcement. Dans ce stade, le patch n'a aucune influence sur la décélération de la fissure et le facteur d'intensité de contraintes atteint sa valeur maximale et cela quelque soit la hauteur du décollement (FWD). Ce dernier a un effet sur la redistribution de contraintes autour de la fissure et son effet est maximal sur la déformation du patch collé.

IV.12. Conclusion

Ce chapitre traite l'influence de l'orientation des fibres du matériau composite du patch semi-circulaire sur le facteur d'intensité de contraintes d'une plaque sollicitée en traction et contenant une fissure débouchante sur l'extrémité. La présence du décollement FWD à la pointe de la fissure a été mise en évidence. A cet effet, on dégage les constatations suivantes :

- La réduction du facteur d'intensité de contraintes du patch en boron/époxy de fibre 0° en y-direction par rapport à un patch de fibres en x-direction est de l'ordre 50%.
- La réduction du facteur d'intensité de contraintes prend de l'importance lorsque l'épaisseur de l'adhésif tend à une valeur nulle. Un comportement inverse se produit pour une épaisseur importante du patch, l'augmentation de celle-ci diminue l'effet négatif du décollement.
- La réduction du FIC augmente avec l'augmentation de l'épaisseur du patch pour des hauteurs de disbond supérieures à la taille de la fissure. Un comportement inverse se produit lorsque la longueur de la fissure dépasse la hauteur de FW disbond.
- Pour une hauteur du FWD disbond est supérieure à la longueur de la fissure $H_d \geq a$, la réduction du patch dépasse 50% lorsque l'épaisseur du patch est supérieure à 1mm.
- Les résultats montrent que le facteur d'intensité de contraintes est affecté par l'effet négatif du décollement. L'augmentation de celui-ci est proportionnelle à l'augmentation du FIC.
- Le patch n'a aucune influence sur la propagation de la fissure lorsque le rapport $2a/d_R$ dépasse 0.8.