

Modèle numérique pour la simulation de la propagation des fissures de fatigue en mode I des plaques en aluminium réparées par patch en matériaux composites

ERROUANE L.^a, SEREIR Z.^a, CHATEAUNEUF A.^b, BENNEGADI L.M.^a

Laboratoire Structures De Composite et Matériaux innovants. Département de Génie Maritime, Faculté de Génie mécanique, BP 1505 El M'naouer, USTO, Oran, Algérie,

b Clermont Université, Université Blaise Pascal, Institut Pascal, BP10448, F-63000 Clermont-Ferrand, France
CNRS, UMR6602, Institut Pascal, F-63171 Aubière, France

Email : herrouane@yahoo.fr

Email : serzou@hotmail.com

Résumé :

Par la présente étude, une simulation numérique dynamique en 3D a été effectuée pour prédire le facteur d'intensité des contraintes à la pointe de fissure ainsi que la durée de vie en fatigue d'une plaque en aluminium 2124-T3 réparée par un patch en composite. Par la suite, une étude d'optimisation a été menée pour estimer la durée de vie adéquate justifiant une forme optimale du patch en composite. Considérant les variables de conception telle que, la hauteur, la largeur et l'épaisseur du patch, en plus de l'épaisseur d'adhésif, une importante réduction du volume de patch peut être réalisée en appliquant le modèle développé. La sensibilité des paramètres optimaux du patch est étudiée sous différentes tailles de fissures. Différentes séquences d'empilement et propriétés mécaniques du patch sont également considérées afin de réduire la concentration de contraintes au voisinage de la pointe de fissure, en aboutissant à une forte réduction du volume.

Mots-clés : Optimisation, Durée de vie, Patch en composite, Fatigue, Plaque fissurée, Réparation,

1 Introduction

La naissance des fissures dans une structure métallique dans n'importe quel domaine telles que les structures aéronautiques et les structures marines, est une préoccupation majeure des opérateurs de maintenance [1]. Les opérations de remplacement de la structure endommagée sont très longues et coûteuses. Afin d'éviter ses opérations, des patchs métalliques rivetés sont généralement appliqués pour reprendre une partie des efforts. Néanmoins cette solution, donne naissance à des concentrations de contraintes autour des rivets, devenant de nouveaux points de fragilisation et surtout pour les structures aéronautiques qui sont soumises en service à des sollicitations mécaniques donnant lieu à des états de contraintes généralement multiaxiaux et à amplitude variable, ce qui provoque un phénomène d'endommagement par fatigue [2]. Dans ce cas là, il est évident de faire un contrôle continu de suivi de sa propagation souvent nécessaire afin d'intervenir avant que celle-ci n'atteigne une taille critique. Une technique plus récente consiste à coller un patch composite sur la zone endommagée à l'aide d'une couche d'adhésif Baker A. [3, 4, 5]. L'essai de fatigue visait à évaluer la demande de réparation des ailes endommagées, comme une mesure préventive de la formation de fissures. Un travail expérimental préliminaire indique qu'il s'agit d'un modèle prometteur pour prédire le comportement de fissures croissantes sur un nombre limité de variables, y compris: les décollements artificiels, la croissance de décollement, l'épaisseur de la colle et la température d'essai. Un autre paramètre nécessaire pour compléter la capacité prédictive des données de fatigue c'est le taux de croissance de décollement dans le système adhésif / patch [6]. [7] et [8] ont présenté une approche analytique en utilisant la technique d'analyse successive par éléments finis pour caractériser le comportement de la propagation des fissures de fatigue des plaques d'aluminium pré-fissurées et renforcées sur un côté par patch en composite. Ils ont remarqué que, le taux de la propagation de la fissure sur les deux faces (réparé et non réparé) n'est pas uniforme en raison de l'asymétrie et de la présence de l'effet de flexion hors- plan. La propagation de la fissure n'est pas uniforme à travers l'épaisseur par rapport de sa position initiale du panneau pour une réparation asymétrique et la forme de la pointe de fissure et un paramètre important qui influe sur le facteur d'intensité des contraintes et a la vitesse de la propagation de fissure [9] et que la réparation sur un seul côté des panneaux minces en utilisant du patch en verre / époxy est plus efficace que les panneaux épais. En mode mixte [10] ont constaté que pour une fissure inclinée à 45° dans un panneau en aluminium épais réparé par patch asymétrique en verre / époxy, cette technique de réparation en verre / époxy est efficace dans la prolongation de la vie

de la propagation de fissure. Un modèle progressif de la rupture basé sur la méthode des éléments finis a été développé par Papanikos et al. [11] pour étudier les effets géométriques du patch sur l'initiation de décollement au niveau de l'interface et de la propagation induite par le chargement mécanique. Le décollement est dû à la cohésion ou une défaillance d'adhésion causée par une forte contrainte de cisaillement. Il a été constaté qu'en fonction de l'épaisseur du patch, le décollement initie soit au niveau du bord supérieur des patchs (étant catastrophique pour la réparation) ou au niveau des faces fissurées (moins catastrophique). D'après Mall et Conly [12], une flexion significative hors plan des panneaux épais ainsi que des propagations de fissures non uniforme entre les faces réparées et non réparées par patch des panneaux épais, a été observée en raison de la réparation asymétrique. Dans le cas de panneaux minces avec flexion négligeable, cette augmentation a été plus de dix fois. L'étude expérimentale et théorique du comportement en fatigue des plaques en acier renforcées par fibres de carbone polymère (CFRP) avec différents degrés de dommages a été réalisée par Yu Q.Q. et al. [13]. Par l'application des plaques en CFRP pour le renforcement des plaques en acier endommagée en fatigue, la durée de vie des échantillons renforcés a été prolongée d'environ 97% à 186%. Ils ont remarqué que les formes des pointes de fissures sont symétriques et asymétriques sur les surfaces endommagées en raison de la différence de comportement de collage des échantillons testés. L'un des principaux inconvénients de l'utilisation de patchs composites dans la réparation de panneaux métalliques est le développement des contraintes thermiques résiduelles dues à des cycles de durcissement de la réparation collée [14]. Les résultats de FEM et expérimentaux ont montré que les contraintes résiduelles thermiques dues à différentes températures de durcissement quand les patchs FML sont utilisés n'affectent pas de manière significative la forme de la pointe de fissure. Enfin, il peut être conclu que l'utilisation de patchs FML avec un coefficient de dilatation thermique correspondant à des panneaux d'aluminium entraîne la réparation relativement efficace; d'un faible niveau de contraintes résiduelles thermiques, même pour des températures de durcissement élevées.

Par le présent travail, une simulation numérique dynamique en 3D a été effectuée pour prédire le facteur d'intensité des contraintes à la pointe de fissure ainsi que la durée de vie en fatigue d'une plaque en aluminium réparée par un patch en composite. Par la suite, une étude d'optimisation a été menée pour estimer une durée de vie adéquate justifiant une forme optimale du patch en composite.

2 Modèle numérique de fatigue pour les plaques réparées par patch

Un modèle numérique a été effectué sur la base d'un modèle expérimental réalisé par HOSSEINI TOUDESCHKY [15]. Selon la figure 1, une plaque en aluminium 2024-T3 contenant une fissure centrale en mode I réparée asymétriquement par patch verre/époxy a été modélisée pour estimer l'évolution de la propagation des fissures sous des sollicitations de fatigue. Par la suite, une estimation de la durée de vie de cette plaque a été accomplie après une étude d'optimisation du volume de patch. Les caractéristiques géométriques et mécaniques de la plaque en Aluminium et le patch ont été regroupées aux tableaux 1 e.2. L'analyse de la propagation des fissures de fatigue a été effectuée à l'aide du logiciel ANSYS pour une taille de fissure initiale $a_{init} = 5\text{mm}$ capable se propager jusqu'à une taille finale critique $a_{fin} = 14\text{mm}$. Le facteur d'intensité des contraintes est calculé à chaque incrément de la taille de cette fissure. Selon la figure 2, la symétrie du chargement et de la géométrie a été mise à profit, par l'emploi du 1/4 de la géométrie de la plaque réparée. Des éléments Solid 95 ont été utilisés, pour le maillage de la plaque en aluminium et le film d'Adhésif. Par

contre pour le patch en composite, on a opté pour des éléments Solid46 avec la possibilité de stratification.

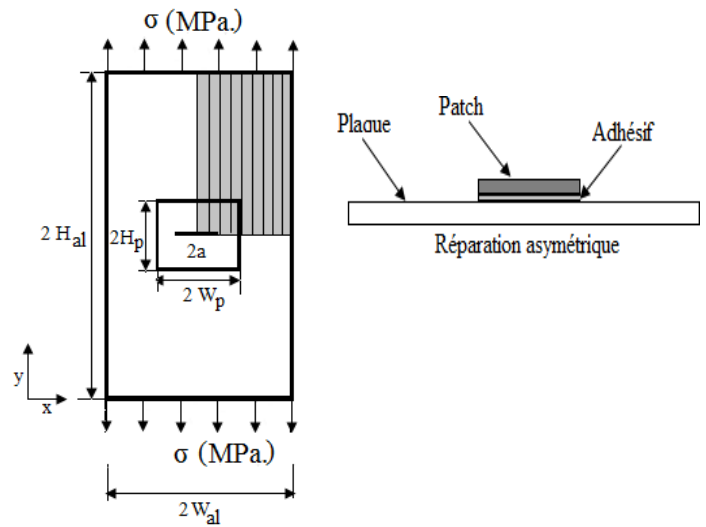


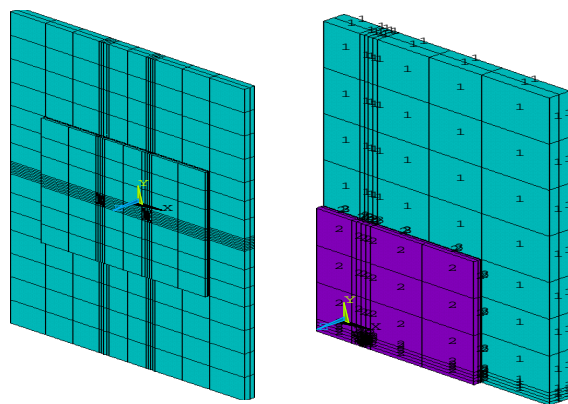
FIG 1. Modèle de la géométrie proposé par HOSSEINI [15].

$2W_{al}$ (mm)	$2H_{al}$ (mm)	T_{al} (mm)	$2W_p$ (mm)	$2H_p$ (mm)	$2T_p$ (mm)	h_c (mm)
50	100	2.29	35	40	0.18 / plis	0.1

Tableau 1. Caractéristiques géométriques de la plaque, Adhésif et du patch en composite [HOSSEINI-TOUDESCHKY H., 2007].

Matériaux	E1 (Gpa)	E2, E3 (Gpa)	ν_{12}, ν_{13}	ν_{23}	G12, G13 (Gpa)	G23 (Gpa)
Aluminium 2024T3	71.3	/	0.33	/	/	/
Glass/Epoxy	50	14.5	0.33	0.33	2.56	2.24
Adhésif	1.89	/	0.33	0.33	/	/

Tableau 2. Propriétés mécaniques d'alliage d'aluminium 2024-T3, Adhésif et du patch en composite.



Le modèle complet de la géométrie.

Le 1/4 de la géométrie

FIG 2. Modèle typique de la géométrie d'étude.

Le modèle a été sollicité par l'application un chargement cyclique de traction au bord supérieur dans la direction y, simulant en mode I. Après génération du maillage, application des conditions aux limites et les modes de chargement cycliques, les valeurs de $K_{I_{max}}$ et $K_{I_{min}}$ à la pointe de la fissure ont été déterminées. Ainsi, ΔK a été calculé pour chaque taille de fissure. En utilisant la loi de Paris, le nombre de cycles correspondant à chaque taille de fissure a été convenablement estimé. Les mêmes charges cycliques ont été appliquées aux plaques fissurées avec ou sans patch selon un rapport de charge préconisé $R = 0.05$ et une contrainte maximum appliquée de 118 MPa. Conformément aux essais expérimentaux de HOSSEINI [15], les constantes matérielles de la loi de Paris pour notre plaque d'Aluminium d'une épaisseur 2.29 mm sont : $m = 3.2828$ et $C = 3.63 E^{13}$. Selon la littérature,

plusieurs algorithmes sont utilisés pour estimer la durée de vie des structures sollicitées en chargement de fatigue. Mais, l'approche commune consiste à intégrer la loi de Paris. Puisque ΔK varie avec la croissance des fissures dans des situations pratiques, l'algorithme d'Euler est souvent utilisé :

$$N^{(j+1)} = N^{(j)} + \Delta N^{(j)} = N^{(j)} + \frac{\Delta a^{(j)}}{c[\Delta K(a^{(j)})]^m} \dots\dots(1)$$

En d'autres termes, quand le $\Delta a^{(j)}$ est pré-défini comme une constante à chaque étape, une valeur globale de KI le long de chaque front de fissure doit être évaluée pour l'estimation de $\Delta N^{(j)}$ correspondant à chaque étape [WOO-YONG Lee et al. 2004].

3 Validation du modèle numérique

Une double validation de notre modèle a été présentée aux figures 3 et 4. La validation a été

faite avec le modèle expérimental de HOSSEINI [HOSSEINI-TOUDESCHKY H. ,2007], d'une plaque en Aluminium centralement fissurée avec ou sans patch. Des deux figures, il est clair que nos résultats sont en bonne concordance avec ceux de la littérature. Le nombre de cycles est proportionnel à la propagation de la taille de fissure. Selon la figure 4, la présence d'un patch à 04 couches nous assure une durée de vie supplémentaire. Par exemple pour une fissure extrême de 14 mm, la durée de vie passe de 21479 cycles pour une plaque sans patch à 34479 cycles en présence d'un patch de 04 couches. Soit une augmentation de la durée de vie d'environ 38%. Le tableau .3 résume les principaux résultats des nombres de cycles pour une fissure extrême de 14 mm, obtenus par notre modèle numérique et les modèles expérimentaux et numériques de HOSSEINI pour différentes épaisseurs des patches.

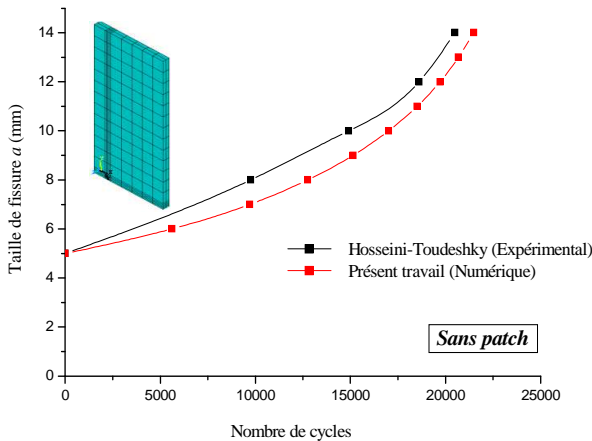


FIG 3. Comparaison du taux de croissance de fissure de fatigue pour les plaques non réparées.

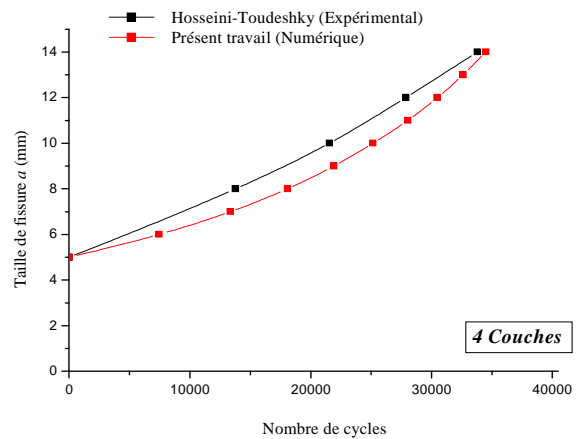


FIG 4. Comparaison du taux de croissance de fissure de fatigue pour les plaques réparées par patch à quatre plis.

Le tableau.3, représente une comparaison entre les résultats expérimentaux et le résultat des éléments finis obtenu par Ansys.

Nombre de Couches	Modèle	Nombre de Cycles
Sans Patch	Présent Modèle Numérique	21479
	Modèle Expérimental (HUSSEINI)	20500
04 Couches	Présent Modèle Numérique	34479
	Modèle Numérique (HUSSEINI)	34526
	Modèle Expérimental (HUSSEINI)	33800
08 Couches	Présent Modèle Numérique	43188
	Modèle Numérique (HUSSEINI)	41300
	Modèle Expérimental (HUSSEINI)	38000
16 Couches	Présent Modèle Numérique	56082
	Modèle Numérique (HUSSEINI)	63757
	Modèle Expérimental (HUSSEINI)	68900

Tableau 3. Comparaison entre les résultats expérimentaux et le résultat des éléments finis obtenu par Ansys.

4 Etude paramétrique

Le but de cette partie est de mettre en évidence l'influence des paramètres géométriques sur le taux de propagation de la fissure et de la vie de fatigue des plaques fissurées et réparées par patch. D'après la littérature, le rapport entre la hauteur et la largeur du patch doit être soigneusement choisi afin de suffisamment couvrir la zone endommagée, ce qui permettra une bonne réduction de facteur d'intensité des contraintes. Afin de mettre en valeur l'effet la variation de la hauteur et de l'épaisseur du patch sur l'estimation de la durée de vie de notre plaque réparée, on a tracé les trois les figures 5,6 et

7. Il est clair que pour faible hauteur du patch $H_p=9.0$ mm (Figure 5), le nombre de cycles est assez réduit. De plus, l'augmentation du nombre de couches de 04 à 10 n'a pas un effet significatif sur l'évolution de la durée de vie de notre plaque. Par contre, lorsque la hauteur du patch $H_p=12.0$ mm (Figure 6) et 15 mm (Figure 7) devient plus importante, la durée de vie devient plus appréciable, surtout avec l'augmentation du nombre de couches. Ceci est interprété par le fait que la forme du patch a tendance à avoir une forme carrée (Patch stable) pour laquelle le facteur d'intensité des contraintes est minimal.

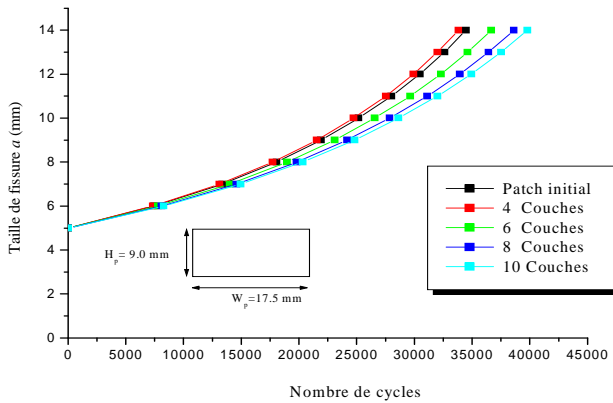


FIG 5. Variation de la taille de fissure en fonction du nombre de cycles pour une hauteur de patch $H_p=9.0$ mm.

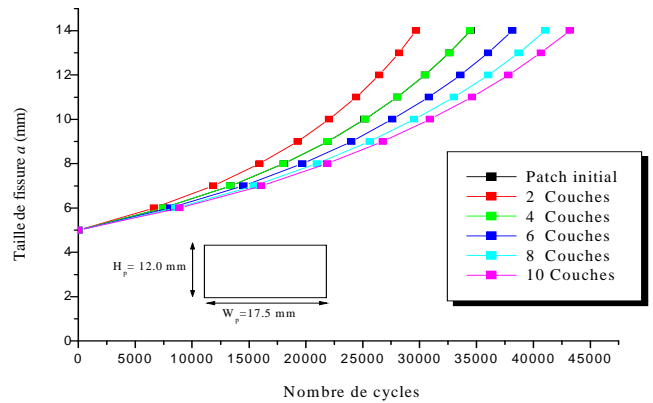


FIG 6. Variation de la taille de fissure en fonction du nombre de cycles pour une hauteur de patch $H_p=12$ mm.

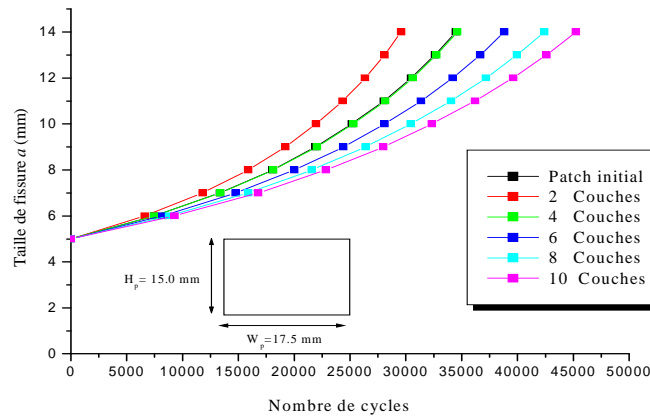


FIG 7. Variation de la taille de fissure en fonction du nombre de cycles pour une hauteur de patch $H_p=15$ mm.

Largeur du Patch	Nombre de plis	Patch initial	4 Plis	6 plis	8 plis	10 plis
9 mm	Volume du patch	252	113.4	170.1	226.8	283.5
	Nombre de cycles	34480	33827	36662	38617	39808
12 mm	Volume	75.6	151.2	226.8	302.4	378
	Nombre de cycles	29688	34449	38163	41075	43189
15 mm	Volume	94.5	189	283.5	378	472.5
	Nombre de cycles	29592	34618	38830	42392	45241

Tableau 4. Nombre de cycles en fonction du nombre de couches pour une hauteur du patch ($H_p = 19$ mm).

Une comparaison qualitative et quantitative a été présentée au tableau .4 pour mettre en valeur l'effet du rapport géométrique du patch sur la durée de vie de notre plaque en aluminium.

Il est nécessaire de trouver un bon compromis entre la hauteur et l'épaisseur du patch afin de garantir une meilleure réparation et une augmentation de la durée de vie des structures fissurées.

5 Durée de vie de la plaque réparée par un patch optimisé

La technique d'optimisation géométrique permet de trouver une meilleure forme possible du patch de réparation, ce qui assure un prix de revient minimal. Dans notre cas, la fonction coût ou objectif est le volume du patch. La fonction d'état est le facteur d'intensité des contraintes ou bien le taux de propagation de fissure qui est définie à partir de paramètres à ajuster les variables de conception qui sont hauteur H_p , largeur W_p et l'épaisseur du patch T_p . Avant d'établir le processus d'optimisation, il est impératif de définir les limites supérieures et inférieures des variables de conception et les variables d'état (Tableau 5). Donc, l'objectif principal revient à avoir un patch avec volume optimal qui assure une durée de vie convenable de la plaque réparée. Par conséquent un bon fonctionnement en fatigue pour un nombre de cycles relativement important. En partant d'une plaque réparée avec patch initial de volume $V=17.5*10*(4*0.18)$ mm³. Une étude d'optimisation a été faite pour avoir une forme optimale conformément à la figure 8. La figure 9 illustre le processus d'optimisation selon les trois cas donnés au tableau 6. Il est notable que le deuxième cas offre un meilleur volume optimal 122.5 mm³. Ce qui permet de réduire le volume initial (Valeur du volume initial) d'environ 50%.

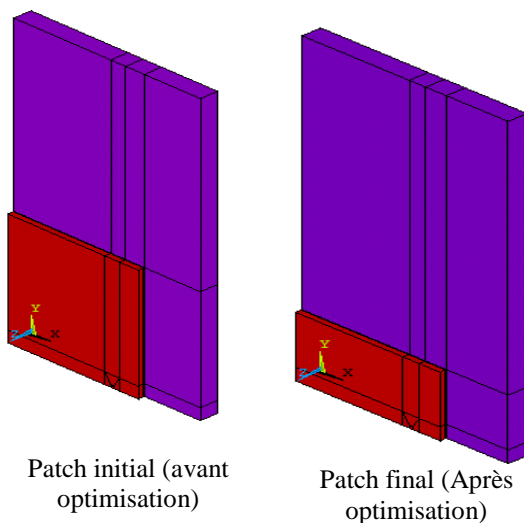


FIG 8. Configuration du patch de réparation avant et après l'optimisation.

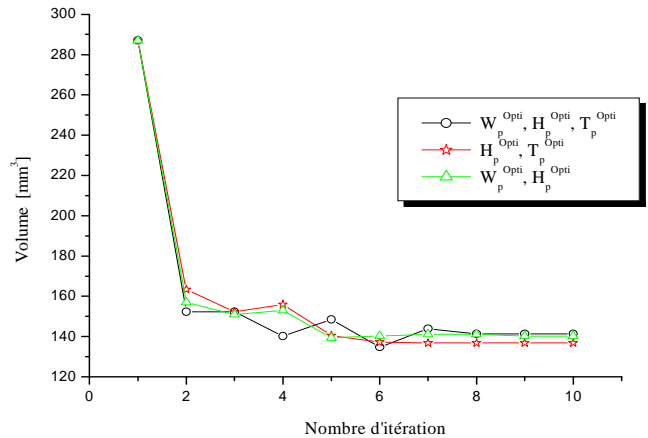


FIG 9. Evolution du volume du patch optimale en fonction du nombre d'itérations.

	Dimensions à optimiser	Après optimisation
Cas 1	H_p (mm)	10.32
	W_p (mm)	17
	T_p (mm)	$4*0.175$
	Volume (mm ³)	122.808
Cas 2	H_p (mm)	10
	W_p (mm)	Invariable=17.5
	T_p (mm)	$4*0.170$
	Volume (mm ³)	122.5
Cas 3	H_p (mm)	16.9
	W_p (mm)	10.187
	T_p (mm)	Invariable= $4*0.18$
	Volume (mm ³)	123.955

Tableau 6. Variables de conception et le volume optimisé pour les trois cas étudiés pour une taille de fissure $a=14$ mm.

Une fois le patch en composite est optimisé, on a procédé au calcul la durée de vie de fatigue pour les trois configurations de patch optimisé.

Les résultats de la durée de ces trois cas sont comparés aux résultats de la durée de vie d'un patch non optimisé. La figure 10 représente le nombre de cycles en fonction de la taille de la fissure pour les trois configurations de patch optimisé. De la présente figure, on remarque que presque la même durée de vie est estimée pour les trois configurations de patch optimisé comparativement à un patch non optimisé (Tableau 7).

	Volume optimisé	Nombre de cycles
Cas 1	122.808 mm ³	33759
Cas 2	136.80 mm ³	33679
Cas 3	140.31 mm ³	33846

Le tableau 7. Nombre de cycles en fonction de volume optimisé pour les cas avec une taille de fissure critique $a = 14$ mm.

Une légère différence de 800 cycles est quantifiée entre le nombre de cycles d'un patch optimisé et autre non optimisé. Donc, on peut dire que notre optimisation est rentable, parce qu'elle permet un

gain important de volume pour une légère réduction de la durée de vie de notre plaque réparée.

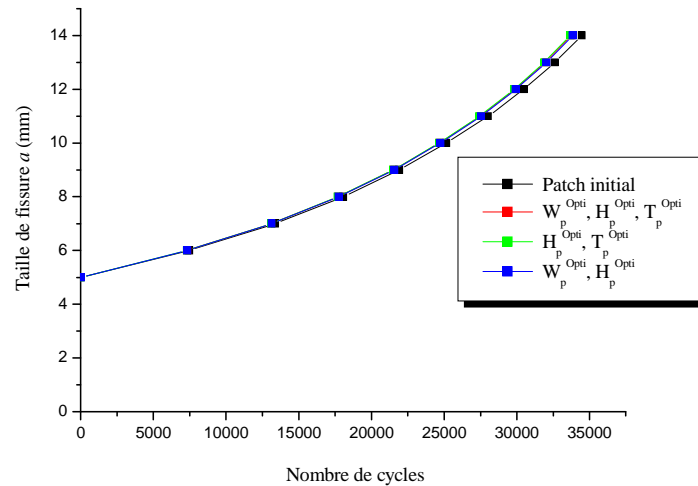


FIG 10. Variation de la taille de la fissure en fonction du nombre de cycles en fonctions les variables de conception optimisé.

On a vu précédemment que les paramètres géométriques du patch influent significativement sur la durée de vie de fatigue. Une meilleure configuration du patch produit une légère réduction dans la durée de vie (figure 10). Afin d'améliorer les performances de la réparation par patch optimisé en aboutissant à une durée de vie appréciable pour un poids optimal, on a fait varié les propriétés mécaniques du patch optimisé. Pour cette raison, trois types de matériaux composites ont été proposés: Boron/époxy, Graphite/époxyde et de verre/époxy. Les différentes propriétés mécaniques du patch sont déjà données au tableau 2. La figure 11 montre la variation de la taille de la

fissure en fonction du nombre de cycles pour différents types de matériaux constituant le patch. De la figure 11, on remarque une importante augmentation dans la vie de fatigue des plaques réparées par patch en Boron/époxy comparativement aux autres types de matériaux. Par exemple pour taille de fissure maximale, le nombre de cycles qui seulement de 33680 pour le Verre/époxy atteint 38000 pour un patch en Boron/époxy. En conclusion, on peut dire que la réparation par patch en composite Boron/époxy a été excellente, en termes, d'efficacité de renforcement, d'efficacité des coûts et la durabilité.

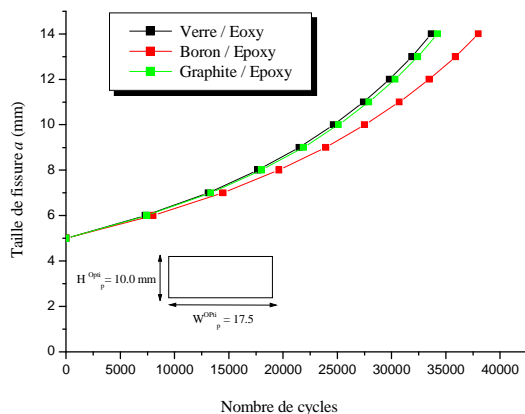


FIG 11 .Variation de la taille de la fissure en

fonction du nombre de cycles pour différents types de matériaux.

6 Conclusion

Le présent travail consiste à soumettre des structures fissurées en mode I en aluminium 2024-T3 réparées asymétriquement par patch Verre/Epoxy, réparées par patch en composite à un chargement cyclique (fatigue) d'amplitude constante afin de prédire le nombre de cycles en fonction de la longueur de fissure. Une seconde validation de nos résultats avec les résultats de la littérature, montre toujours la bonne concordance. L'utilisation de la loi de Paris, nous a permis de quantifier la durée de vie de notre plaque réparée sous sollicitation de fatigue. Il a été constaté que le nombre de cycle est proportionnel à la propagation de la taille de fissure. L'emploi d'un patch épais assure une durée de vie supplémentaire. La durée

de vie de notre plaque réparée est fortement liée aux dimensions du patch, spécialement la hauteur et la largeur. Afin d'avoir une durée de vie convenable pour patch minimal, une étude d'optimisation a été faite avec succès. Il a été remarqué que le nombre de cycle devient très important lorsque la hauteur patch voisine sa largeur surtout avec l'augmentation du nombre de couches. Des patches en Boron/epoxy représentent la meilleure solution en termes d'efficacité de renforcement, de minimisation du coût et de durabilité.

7 Références

- [1] CHAPUIS, B. OSMONT D, 2010. « Contrôle santé intégré par méthode ultrasonore des réparations composites collées sur des structures métalliques ». Laboratoire Ondes et Acoustique – ESPCI, Université Paris 7, CNRS UMR 7587.
- [2] PASTOR Marie-Laetitia, BALANDRAUD Xavier, GRECIAC Michel, ROBERT Jean-Louis, 2008. « On the fatigue response of aluminium specimens reinforced with carbon–epoxy patches ». *Composite Structures* 83 237–246.
- [3] BAKER A., 2006. « Development of a Hard-Patch Approach for Scarf Repair of Composite Structure ». Defense science and technology organization document control data.
- [4] BAKER A., 2008. « Structural health monitoring of a bonded Composite patch repair on a fatigue-Cracked F-111C Wing ».
- [5] BAKER A., FRANCIS Rose, RHYS Jones, 2002. « Advances in the Bonded Composite Repair of Metallic Aircraft Structure ». volume 1. ELSEVIER.
- [6] BAKER.A.A.,1994. « Bonded Composite Repair of Metallic Aircraft Components Overview of Australian Activities ». *Composite Repair of Military Aircraft Structures*. Papers presented at the 79th Meeting of the AGARD Structures and Materials Panel, held in Seville, Spain 3-5. Published January 1995.
- [7] WANG Q.Y., SRIRAMAN M.R., KAWAGOISHI N., Q. Chen.,2006. « Fatigue crack growth of bonded composite repairs in gigacycle regime ». *International Journal of Fatigue* 28 1197–1201.
- [8] HOSSEINI-TOUDESHPY H., SADEGHI G., DAGHYANI H.R., 2005. « Experimental fatigue crack growth and crack-front shape analysis of asymmetric repaired aluminum panels with glass/epoxy composite patches ». *Composite Structures* 7. 401– 406.
- [9] HOSSEINI-TOUDESHPY H., 2006. « Effects of composite patches on fatigue crack propagation of single-side repaired aluminum panels ». *Composite Structures* 76 . 243–251.
- [10] HOSSEINI TOUDESHPY H. , BAKHSHANDEH S., MOHAMMADI B., DAGHYANI H.R., 2006. « Experimental investigations on fatigue crack growth of repaired thick aluminum panels in mixed-mode conditions ». *Composite Structures* 75.437–443.
- [11] PAPANIKOS P., TSERPES K.I., PANTELAKIS S.P., 2007. « Initiation and progression of composite patch debonding in adhesively repaired cracked metallic sheets ». *Composite Structures* 81. 303–311.
- [12] MALL S., CONLEY D.S., 2009. « Modeling and validation of composite patch repair to cracked thick and thin metallic panels ». *Composites: Part A* 40.1331–1339.
- [13] YU Q.Q., CHEN, T. GU X.L. , ZHAO X.L., XIAO Z.G., 2013. « Fatigue behaviour of CFRP strengthened steel plates with different degrees of damage ». *Thin-Walled Structures* 69.10–17.
- [14] H Hosseini-Toudeshky, Mojtaba Sadighi, Ali Vojdani, 2013. « Effects of curing thermal residual stresses on fatigue crack propagation of aluminum plates repaired by FML patches. » *Composite Structures* 100 (2013) 154–162.
- [15] H. Hosseini-Toudeshky , B. Mohammadi , G. Sadeghi , H.R. Daghyani. « Numerical and experimental fatigue crack growth analysis in mode-I for repaired aluminum panels using composite material. » *Composites: Part A* 38 (2007) 1141–1148.