

Revue Sciences des Matériaux, Laboratoire LARHYSS N° Spécial, Janvier. 2017, pp.44-56

3rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY, MATERIALS, APPLIED ENERGETICS AND POLLUTION (ICEMAEP'2016)

CONSTANTINE, ALGERIA, October 30th -31st 2016

Lahouaria ERROUANE¹, Nadjia DEGHOUL, Zouaoui SEREIR¹, ElArbi Mohammed BENNEGADI, Khamis HADJAZI, Mokhtar KHALDI

Commentaire [N1]:



Commentaire [N2]:

**3^{ème} CONFÉRENCE INTERNATIONALE SUR L'ENERGIE, LES MATERIAUX, L'ÉNERGÉTIQUE
APPLIQUÉE ET LA POLLUTION (CIEMEAP'2016)**

CONSTANTINE, ALGERIE,

30-31 Octobre 2016

**3rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY, MATERIALS, APPLIED ENERGETICS AND POLLUTION
(ICEMAEP'2016)**

CONSTANTINE, ALGERIA,

Etude de la résistance a la fissuration des plaques en l'aluminium réparées par des patchs en composites

Lahouaria ERROUANE¹, Nadjia DEGHOUL, Zouaoui SEREIR¹, ElArbi Mohammed BENNEGADI, Khamis HADJAZI, Mokhtar KHALDI

¹Laboratoire structure de composite et matériaux innovants – LSCMI, Faculté de génie mécanique, BP 1505 El M'Naouer, USTOMB, Oran, Algérie.

Email : herrouane@yahoo.fr

RÉSUMÉ

La caractérisation mécanique des matériaux repose sur l'étude de son comportement vis-à-vis des sollicitations extérieures qui engendrent des contraintes et des déformations est l'étape indispensable dans les applications industrielles données qui exigent la connaissance et la maîtrise de caractéristiques mécaniques des matériaux choisis. A ce stade on recourt à un certain nombre d'essais normalisés pour accéder aux grandeurs caractéristiques des matériaux, du module d'Young à la limite d'élasticité, en passant par la ténacité ou la résistance à la fatigue. Le premier objectif de cette étude portera donc sur la caractérisation mécanique usuelle indispensable pour l'estimation le module d'Young ainsi que la limite élastique et plastique des plaques en aluminiums minces et épais en vue de prédire leur aptitude de résistances aux sollicitations mécaniques impose. Des plaques en résine ont été aussi caractérisées dans cette étude par la présentation une technique expérimentale la plus couramment utilisée dans les industries, et pour atteindre le deuxième objectif de ce travail, on a fait une modélisation numérique par le code de calcul Ansys des plaques en aluminium minces présentant des défauts centraux à des différentes tailles avec et sans collage des patchs en fibres de carbone. En utilisant la loi Paris, le nombre de cycle est estimé pour différentes tailles de fissures.

Mots Clés: Caractérisation, éléments finis, facteur d'intensité de contrainte, propagation des fissures, mécanique de la rupture

1. Introduction

Lahouaria ERROUANE¹, Nadjia DEGHOUL, Zouaoui SEREIR¹, ElArbi Mohammed BENNEGADI, Khamis HADJAZI, Mokhtar KHALDI

Les structures aéronautiques, aérospatial et les structures marines sont souvent exposées à des conditions d'exploitation extrêmes, surcharge, fatigue et d'autres raisons en service ou à cause des défauts internes [1]. Ce type des structures peut subir des endommagements ou des microfissures locales [2]. L'endommagement qui découle est rarement singulier mais, il peut potentiellement avoir des conséquences néfastes sur le comportement mécanique de la structure en question [3]. Dans ce cas, la réparation des structures endommagées devient une problématique. Les techniques les plus répondues sont généralement la réparation des parties endommagées par des patches en composites collés par film d'adhésif [4]. Il permet une prolongation importante de la durée de vie des structures endommagées [5,6]. Le présent travail s'inscrit dans le cadre de vérifier et de valider des travaux de recherche cités dans littératures. L'objectif de cette étude en premier lieu, est de caractériser les propriétés mécaniques des plaques en aluminium selon la norme ISO3167 et de la résine par la norme ISO527. Nous avons fait en second lieu, la réalisation des spécimens en aluminium contient des défauts de longueurs différentes, et à l'aide de la méthode des éléments finis, on a déterminé, le facteur d'intensité de contrainte en mode (I) en fonction de la longueur de fissure.

2. Méthodes expérimentale pour la caractérisation des éprouvettes

Une machine de traction est constituée d'un bâti portant une traverse mobile. Les dispositifs expérimentaux sont généralement asservis et peuvent être pilotés à vitesse de montée en charge, à charge constante, à vitesse de déformation constante, etc. selon ce qui peut être proposé par le système de pilotage.

Le travail expérimental a consisté en une série d'essais de traction statiques, et afin de caractériser le comportement mécanique d'aluminium, on a réalisé des essais de traction statiques sur des éprouvettes minces d'une épaisseur $e = 2\text{mm}$, et épaisses d'une épaisseur $e = 5\text{mm}$ réalisées selon la norme ISO3167. Les résultats d'essais représentés sur la figure 1, sont des courbes contrainte-déformation pour des éprouvettes minces. Le tableau 1, présente les dimensions des éprouvettes minces en aluminium testées dans cette étude.

| Vitesse | 3mm/min | | |
|---------|------------------------|---------------------|--------|
| | Numéro de l'éprouvette | d ₀ (mm) | e (mm) |
| | 1 | 10,78 | 2,14 |
| | 2 | 11,05 | 2,02 |
| | 3 | 10,98 | 2,00 |
| | 4 | 10,91 | 2,08 |
| | 5 | 10,90 | 2,01 |
| | 6 | 10,87 | 2,05 |
| | 7 | 10,70 | 2,05 |
| | 8 | 10,89 | 2,00 |

Tableau 1. Dimensions des éprouvettes minces en aluminium testées.

Lahouaria ERROUANE¹, Nadjia DEGHOUL, Zouaoui SEREIR¹, ElArbi Mohammed BENNEGADI, Khamis HADJAZI, Mokhtar KHALDI

Les courbes de traction obtenues en rapportant la force à la section minimale instantanée S , pour raisonner en termes de contrainte vraie $\sigma = F/S$, et en rapportant l'allongement à la longueur instantanée pour raisonner en termes de déformation rationnelle $\epsilon = \Delta l/l$. La contrainte σ , elle tient compte de la variation de section au cours de l'essai, et est égale à la charge rapportée à la section instantanée. La figure 2, présente les différents modes de ruptures les éprouvettes minces en aluminium sous chargement statique de traction.



Figure 1. Epreuves selon la norme ISO3167.



Figure 2. Les éprouvettes minces endommagées après l'essai de traction.

3. Résultats

La figure 4, représente la courbe contrainte-déformation des éprouvettes en aluminium minces obtenue de l'essai de traction. L'évolution de la contrainte en fonction de la déformation laquelle montre une faible fluctuation entre les différentes éprouvettes ce qui traduit l'homogénéité du matériau élaboré. De l'allure de la courbe moyenne, nous constatons que la contrainte varie de manière linéaire (zone élastique) jusqu'à une valeur proche de 80 MPa. avant de changer d'allure (allure parabolique de la zone plastique) jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur maximale qui avoisine les 155MPa remarquée pour l'éprouvette N° 03.

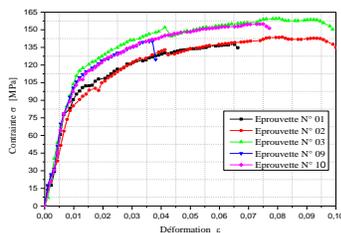


Figure 4. Courbe de traction (Contrainte-déformation) pour les éprouvettes minces en aluminium réalisées selon la norme ISO3167.

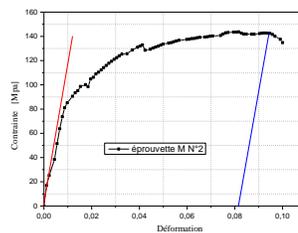


Figure 5. Courbe d'estimation de module d'Young obtenu dans éprouvette N°2 mince.

En utilisant les données des éprouvettes, on a cherché les paramètres mécaniques caractéristiques des éprouvettes en aluminium. En sélectionnant seulement les premiers points (35 points) de chaque courbe de la figure 5. On a pris un exemple de calcul pour l'éprouvette N°02, on a sélectionné les premiers points de la

Lahouaria ERROUANE¹, Nadjia DEGHOUL, Zouaoui SEREIR¹, ElArbi Mohammed BENNEGADI, Khamis HADJAZI, Mokhtar KHALDI

courbe jusqu'à 75 MPa, les points qui constituent le début de la zone linéaire, on obtient ainsi le démarrage de la partie élastique du matériau. La pente de cette droite correspond au module Young. Les valeurs estimées de module d'Young de la plaque en aluminium sont représentées dans le tableau2.

| Les éprouvettes minces | | | | | | |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| N° d'éprouvettes | 1 | 2 | 3 | 9 | 10 | Moy |
| σ_e | 0,01 | 0,012 | 0,007 | 0,008 | 0,01 | 0,0094 |
| σ_e | 95,19 | 90,58 | 84,74 | 92,87 | 102,79 | 93,234 |
| σ_r | 0,055 | 0,081 | 0,08 | 0,029 | 0,065 | 0,062 |
| σ_r | 137,49 | 140,03 | 155,78 | 140,14 | 154,89 | 145,666 |
| E | 67,3 | 71,2 | 70,87 | 68,34 | 71,1 | 69,762 |

Tableaux 2.Caractéristiques mécaniques des éprouvettes normalisées minces en aluminium.

Le module d'Young varie entre 67.3-71.1 GPa pour une moyenne de 69.762 GPa.

Le choix des résines pour une application industrielle donnée exige une connaissance et une maîtrise de ses caractéristiques mécaniques. La caractérisation mécanique des résines repose sur l'étude de son comportement vis-à-vis des sollicitations extérieures qui engendrent des contraintes et des déformations. Des essais mécaniques permettant de déterminer les grandeurs physiques caractérisant le comportement mécanique des matériaux testés. L'objectif de cette partie de cette étude n'est donc pas de les étudier de manière exhaustive, mais de se donner les éléments de compréhension permettant de trouver pour une application particulière comme collage des patches de réparation en composite sur des plaques en aluminium fissurées considérée comme solution la plus adaptée.

La résine utilisée dans cette étude est une résine de type polyester ORTHOPHTALIC SIRESTER FSN0850 AMT / E / résistant à l'eau à Krasnoyarsk fournie par Sibérie composite. Pré-accélération résine thixotrope est pour la fabrication et la réparation des yachts, des bateaux, des bateaux (avec le registre de Lloyd); les caractéristiques de cette résine sont comme suit : traction ISO 527, contrainte de rupture : 60MPa, allongement à la rupture est de 2.1%, contrainte de rupture de 100MPa, module d'élasticité de3900MPa,température d'essai 25C°.

L'éprouvette est généralement obtenue par moulage, pour ce faire on a effectué des éprouvettes réalisées selon la norme ISO 527. La figure 5, montre les éprouvettes en résine réalisée par moulage selon la norme ISO 527.

Le tableau 3, présente les dimensions des éprouvettes en résine testées dans cette étude.

| | | |
|------------------------|---------------------|--------|
| Vitesse | 2 mm/ min | |
| Numéro de l'éprouvette | d ₀ (mm) | e (mm) |

| | | |
|---|-------|------|
| 1 | 10,35 | 5,50 |
| 2 | 9,51 | 5,56 |
| 3 | 10,41 | 5,75 |
| 4 | 10,05 | 5,05 |
| 5 | 10,12 | 5,11 |
| 6 | 9,95 | 5,61 |
| 7 | 9,76 | 5,80 |
| 8 | 10,31 | 5,20 |

Tableau 3. Dimensions des éprouvettes en résine pour l'essai de traction.



Figure 6. Epreuves normalisées en résine avant l'essai de traction.

Figure 7. Epreuves normalisées en résine après l'essai de traction.

Les essais de traction ont été réalisés dans le but de caractériser le comportement mécanique en traction de la résine utilisée pour le collage deux substrats, de matériau différent (plaque en aluminium, et patch en fibre de carbone). Les résultats de ces essais sont représentés sur les courbes forces en fonction du déplacement (figure 8).

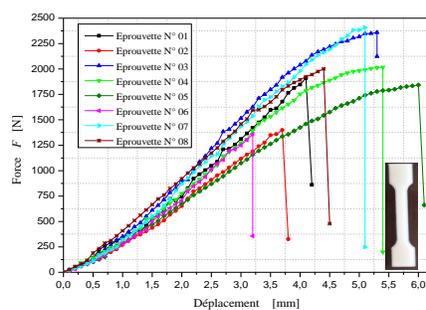


Figure 8. Courbes Force-Déplacement pour les éprouvettes en résine.

Lahouaria ERROUANE¹, Nadjia DEGHOUL, Zouaoui SEREIR¹, ElArbi Mohammed BENNEGADI, Khamis HADJAZI, Mokhtar KHALDI

Le comportement mécanique en traction des résines est souvent non linéaire. La courbe force-déplacement est constituée de deux parties distinctes. La première correspond à une courbe non linéaire indique le comportement de déformation plastique de l'éprouvette. La deuxième partie est caractérisée par la chute de la force où on observe la défaillance ou bien l'endommagement total de l'éprouvette comme montre la figure 7. Le tableau 4, illustre les valeurs force -déplacement de différentes éprouvettes étudié dans cette étude.

| Les éprouvettes en résine | | | | | | | | |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| N° d'éprouvettes | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 |
| F [N] | 1910 | 1400 | 2359 | 2017 | 1843 | 1357 | 2408 | 2001 |
| ΔL [mm] | 4,1 | 3.7 | 5.3 | 5,4 | 6 | 4,1 | 5.1 | 4.4 |

Tableaux 4. Caractéristiques mécaniques de l'essai de traction des éprouvettes normalisées en résine

La force maximale de 2360 , est obtenue pour casser l'éprouvette N° 03, pour un allongement 5.3 mm. Pour l'ensemble des éprouvettes, la force moyenne de rupture est environ 1950 N pour ce type de résine qui a un comportement fragile.

4. Modèle numérique par element finis

Un modèle numérique a été effectué sur la base d'un modèle expérimental réalisé par **Emin Ergun** [7]. Selon la figure 9, une plaque en aluminium contenant une fissure centrale en mode I réparée asymétriquement par patch Carbone/époxyde a été modélisée pour estimer l'évolution de facteur d'intensité de contrainte sous des sollicitations statiques de traction.

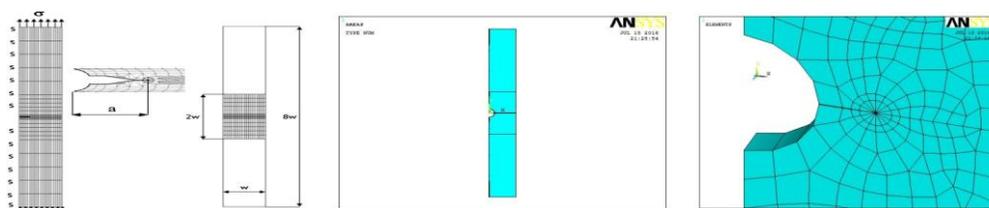


Figure 9. Modèle numérique d'une plaque en plaque fissurée non réparée.

Lahouaria ERROUANE¹, Nadjia DEGHOUL, Zouaoui SEREIR¹, ElArbi Mohammed BENNEGADI, Khamis HADJAZI, Mokhtar KHALDI

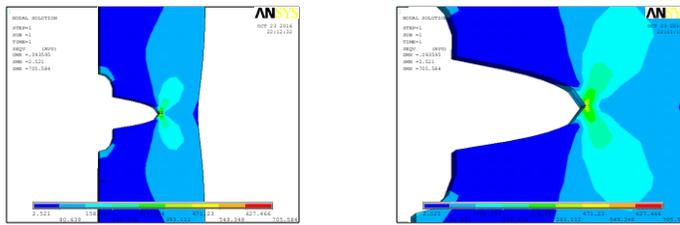


Figure 10. Distribution de la contrainte de Von Mises au voisinage du défaut.

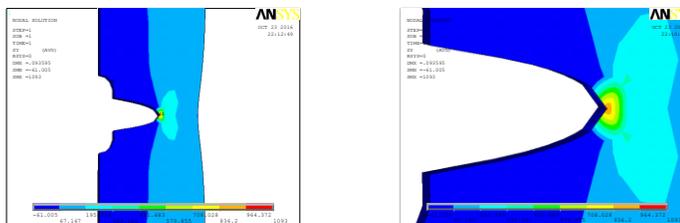


Figure 11. Distribution de la contrainte dans la direction Y (σ_Y) au voisinage du défaut.

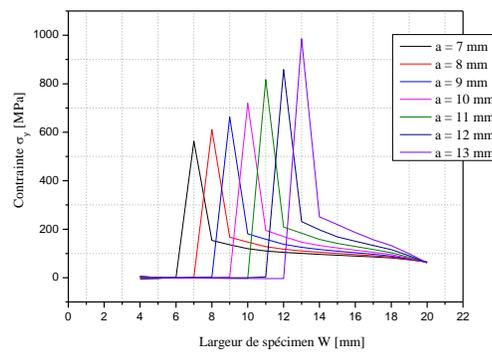


Figure 12. Distribution de la contrainte σ_y le long de la plaque en aluminium fissurée.

Lahouaria ERROUANE¹, Nadjia DEGHOUL, Zouaoui SEREIR¹, ElArbi Mohammed BENNEGADI, Khamis HADJAZI, Mokhtar KHALDI

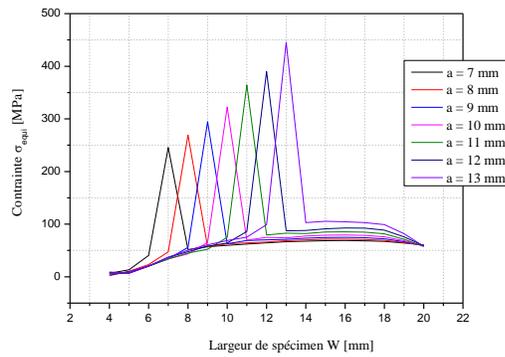


Figure 13. Distribution de la contrainte équivalente de Von Mises σ_{eq} le long de la plaque en aluminium fissurée.

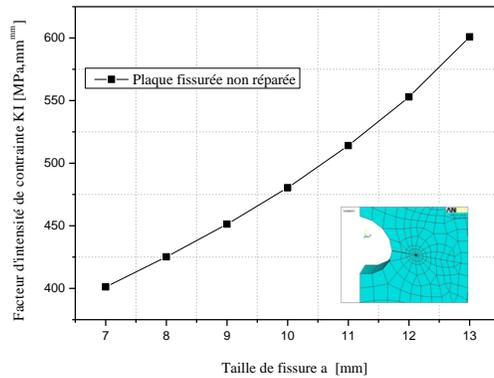


Figure 14. Evolution du facteur d'intensité de contrainte en mode I dans un spécimen en aluminium fissuré non réparé.

Lahouaria ERROUANE¹, Nadjia DEGHOUL, Zouaoui SEREIR¹, ElArbi Mohammed BENNEGADI, Khamis HADJAZI, Mokhtar KHALDI

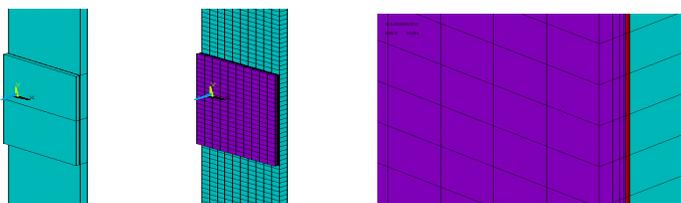


Figure 15. Modèle numérique d'une plaque en aluminium fissurée réparée par patch en carbone/Epoxyde.

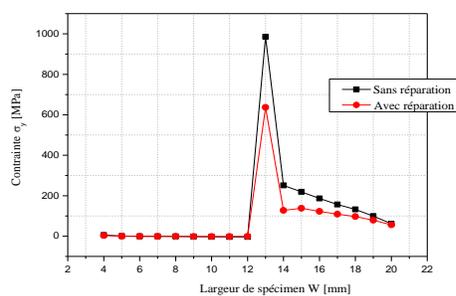


Figure 16. Distribution de la contrainte σ_y le long de la plaque en aluminium fissurée sans et avec réparation.

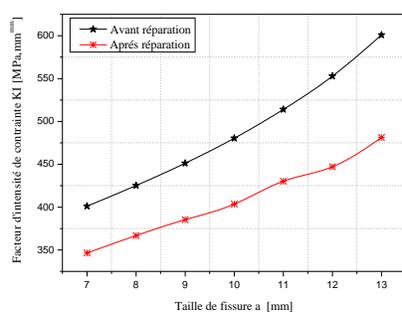


Figure 17. Evolution du facteur d'intensité de contrainte en mode I dans une plaque en aluminium fissurée avec et sans réparation par patch.

Lahouaria ERROUANE¹, Nadjia DEGHOUL, Zouaoui SEREIR¹, ElArbi Mohammed BENNEGADI, Khamis HADJAZI, Mokhtar KHALDI

L'évolution du facteur d'intensité de contrainte en mode I dans une plaque en aluminium fissurée avec et sans réparation par patch est illustré dans la figure 17. On remarque une importante diminution dans les valeurs du K_I des plaques réparées par patch en Carbone/époxy comparativement à la plaque non réparée ou le facteur d'intensité de contrainte à la pointe de fissure devient moins important. Cette diminution traduite par une rigidité supplémentaire a été ajoutée à la plaque fissurée par le patch en composite.

On peut dire que la réparation par patch en composite Carbone/époxy a été excellente, en termes, d'efficacité de renforcement, d'efficacité des coûts et la durabilité.

5. Modèle numérique de fatigue pour les plaques réparées par patch

Le but de cette partie est l'estimation de l'évolution de la propagation des fissures sous des sollicitations de fatigue. L'analyse de la propagation des fissures de fatigue a été effectuée à l'aide du logiciel ANSYS pour une taille de fissure initiale $a_{\text{mit}} = 7$ mm capable de se propager jusqu'à une taille finale critique $a_{\text{fin}} = 13$ mm. Le facteur d'intensité des contraintes est calculé à chaque incrément de la taille de cette fissure. Les valeurs de $K_{I\text{max}}$ et $K_{I\text{min}}$ 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 115.5 MPa.

Les constantes matérielles de la loi de Paris pour notre plaque d'Aluminium d'une épaisseur 2.29 mm sont : $m = 3.49$ et $C = 0.6 \cdot 10^{-13}$. 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 :

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

Le nombre de cycles est proportionnel à la propagation de la taille de fissure. Selon la figure 18, la présence d'un patch en carbone/époxyde nous assure une durée de vie supplémentaire. Par exemple pour une fissure extrême de 13 mm, la durée de vie passe de 5145,7526 cycles pour une plaque sans patch à 9077,7120 cycles en présence d'un patch. Soit une augmentation de la durée de vie d'environ 70%.

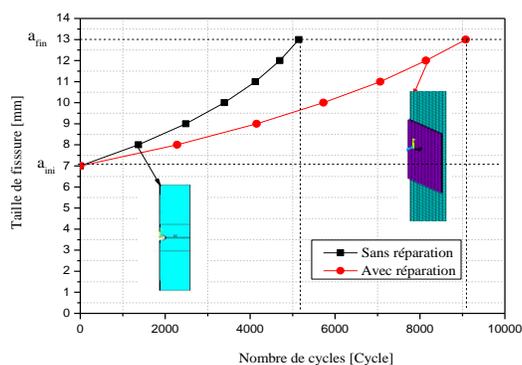


Figure 18. Variation de la taille de la fissure en fonction du nombre de cycles pour une plaque sans et avec réparation

6. Conclusions

Dans cette étude, plusieurs constatations sont faites. Dans la première partie, on a constaté que le module d'Young des spécimens en aluminium est entre (71,2 et 70,74) GPa. et une contrainte à la rupture entre (155,78 et 159) GPa. Pour la résine testée dans cette étude à un comportement non linéaire traduit par une déformation plastique, la force à la rupture maximale trouvée elle est environ 2250 N, avec un allongement 0.5 mm. En second lieu on cherche le rôle bénéfique de la réparation par patchs composites sur la durée de vie des structures fissurées. L'emploi d'un patch en Carbone / Epoxyde assure une durée de vie supplémentaire traduite par une diminution remarquable du facteur d'intensité de contrainte K_I de la plaque par comparaison avec des spécimens non réparés. 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 en Carbone/Epoxyde assure une durée de vie supplémentaire.

Références

- [1] B. Chapuis, D. Osmont. 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. 2010.*

- [2] M.L. Pastor , X. Balandraud, M.Grediac, J.L. Robert. On the fatigue response of aluminium specimens reinforced with carbon–epoxy patches . *Composite Structures* 83 237–246, 2008.
- [3] A. Baker. Development of a Hard-Patch Approach for Scarf Repair of Composite Structure ». *Defense science and technology organization document control data.* , 2006
- [4] A. Baker, 2008. Structural health monitoring of a bonded Composite patch repair on a fatigue-Cracked F-111C Wing .
- [5] A. Baker, R. Francis, J. Rhys. Advances in the Bonded Composite Repair of Metallic Aircraft Structure ». *Volume 1. ELSEVIER.2002.*
- [6] H. Errouane, Z.Sereir, A.Chateaneuf. Numerical model for optimal design of composite patch repair of cracked aluminum plates under tension. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 49.64–72. 2014.
- [7] E. Emin , T.G. Süleyman, T. Mzaffer. Fatigue and fracture analysis of aluminum plate with composite patches under the hygrothermal effect. *Composite Structures* 92.2622–2631. 2010.