

Influence des paramètres géométriques et des propriétés mécaniques du patch sur la réparation des structures endommagées par fatigue

M. Saad¹, D. Ouinas²

¹. Département de Génie mécanique et productique, Université Ibn Khaldoun de Tiaret

². LMNEPM, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem

RESUME - Le renforcement par collage de patch en composite est une méthode facile à appliquer et a montré sa fiabilité surtout sur les alliages d'aluminium. Mais reste que, le point faible du renforcement par matériaux composites réside dans la colle qui permet de solidariser le renfort au substrat. En effet, la majorité des défaillances constatées dans les structures ainsi réparées sont dues à la colle. Ces défaillances sont essentiellement dues au transfert d'effort du substrat vers le patch en composite. La zone de transfert d'effort entraîne en effet un pic de contrainte de cisaillement à proximité du bord libre du patch. Le calcul des distributions de contraintes est donc un point important pour proposer une solution de renforcement adaptée. L'étude en fatigue nous permet de mettre en évidence l'influence de la répartition par patch sur la durée de vie des structures mécaniques pré-fissurées. Par ailleurs, pour avoir une analyse complète il faut bien étudier l'influence des divers paramètres mis en jeux lors d'une réparation par collage de patch en composite.

Mots clés: Patch, Composite, Collage, Réparation

I. Introduction

Les pièces et structures mécaniques, utilisées et manipulées quotidiennement, sont toutes constituées d'une matière donnée, choisie pour sa bonne adaptation à la fonction de l'objet en question et au procédé utilisé pour lui conférer la forme souhaitée. La notion de matériau est donc rigoureusement indissociable de l'intérêt que peut présenter la substance en question pour la réalisation d'une pièce finie. Le matériau est alors un élément de base constituant la structure qui doit résister aux différentes sollicitations. Les matériaux composites, au sens le plus courant du terme, sont un ensemble de matériaux de synthèse conçus et mis en œuvre essentiellement pour des applications structurales, de façon à ce que la fonction mécanique est dominante. Ces matériaux trouvent de plus en plus d'application pour la réalisation des pièces structurales de dimensions diverses, dans de nombreux secteurs industriels tels que l'aéronautique, biomédical

... etc. Dans ce but, il est devenu inévitable d'avoir une meilleure connaissance possible de ces matériaux, en terme de microstructure et de propriétés mécaniques, afin de pouvoir suivre l'évolution de ces derniers sous l'action des sollicitations pour identifier les phénomènes d'endommagement, leurs initiation et leurs développement jusqu'à la rupture.

Plusieurs recherches ont vu le jour ces dernières décennies traitant le problème d'endommagement des matériaux composites, et leurs modes de réparation. On peut citer les travaux d'Erdogan et Arin [1] et Ratwani [2].

L'intérêt d'utilisation d'un patch à deux dimensions a été d'abord traité analytiquement par Rose [3], et aussi Soutis[4]. Cette technique de réparation a intéressé aussi d'autres chercheurs tels que Atluri [5], Bottega et Loia [6]. Leurs contributions ont abordé la conception et l'analyse des réparations soient par rivetage, boulonnage ou collage. Des efforts parallèles, dans le développement de méthodes

Corresponding author: Saad Mohamed

Research field: -Applied mechanics

Adress. Bd ,Cl Amirouche-Sougueur- 14200 Tiaret

E-mail: bm_saad@yahoo.fr

analytiques pour les réparations des structures composites, ont également été déployés dans les dernières décennies, dont on peut citer les oeuvres d'Engels et Becker [7] et Oterkus et al. [8].

Diverses méthodes de réparations existent, dont la mise en place de patchs boulonnés ou rivetés. L'inconvénient de ces méthodes réside cependant dans le champ singulier de contraintes qui apparaît dans les liaisons. Afin d'éviter les concentrations de contraintes, une solution possible consiste alors à coller un patch composite sur la région défectueuse de la structure afin de mieux renforcer la zone endommagée et retarder ainsi le phénomène de rupture et augmenter par la suite la durée de vie de la structure.

Notre travail a pour but de montrer l'efficacité de la réparation des matériaux endommagés comme une solution prometteuse. Comme les matériaux composites se différencient des matériaux classiques par leurs légèreté et leurs haute résistance, ils ne se récupèrent pas après endommagement. Pour cette raison qu'on a fait appel durant notre contribution aux méthodes réparatrices, représenté par le collage d'un joint simple, ou préventives par renforcement de la structure avec un patch collé sur une face (simple recouvrement).

Le modèle utilisé dans cette étude est simplifié à une plaque en aluminium contenant une fissure plane débouchante, réparée par collage de patch en composite graphite époxyde.

Cette structure est soumise à une sollicitation en traction simple par chargement répartie. En outre, pour différentes configurations on analyse le facteur d'intensité de contraintes et le nombre de cycle à la rupture.

II. Conception d'une réparation

La conception d'une réparation doit vérifier sa résistance statique, sa durabilité et sa fonction pour que l'assemblage réponde au bon fonctionnement en fonction des substructures existantes. La conception initiale du patch doit être conforme à la géométrie de la structure à réparer, et ne doit pas couvrir des fixations existantes qui nécessitent l'ablation à l'avenir [9].

Une bonne conception d'une opération de réparation doit satisfaire les points suivants : La géométrie du patch (taille et forme), le choix du matériau du patch, le choix du type de réparation, pré-installation

III. Installation de réparation

Des considérations primaires doivent être prises pour l'installation d'une opération de réparation qui sont : La préparation de surface, le chauffage, Les méthodes de pressurisation. Le processus d'inspections [10].

La préparation de la surface est nécessaire pour une compatibilité du patch et la structure à réparer, et une bonne adhérence du patch afin d'améliorer la résistance et la durabilité. L'opération repose sur deux techniques qui sont les plus efficaces : une anodisation à l'acide phosphorique (AAP), et le sablage du silane (GBS). En premier temps les contaminants de surface (peinture, mastics, etc.) sont enlevés par l'usage abrasif et des produits de nettoyage. Puis on procède à une électro-modification chimique induite par l'effet d'anodisation, ensuite on passe au sablage qui implique un léger décapage pour l'oxyde d'aluminium, et l'application d'un agent de couplage liant à la fois la structure et l'adhésif [11]. La pression appliquée pendant le séchage, réduit les espaces vides dans la ligne d'adhérence et assure le contact entre le patch, l'adhésif, et la structure. La technique la plus courante de pressurisation est le sac d'aspirateur [12].

IV. Modèle géométrique

La pièce en aluminium considérée, présente les dimensions suivantes : longueur $H_p=203\text{mm}$, largeur $w_p=76\text{mm}$, épaisseur $e_p=2\text{mm}$ ainsi les propriétés mécaniques : module d'élasticité longitudinal $E=72000\text{ MPa}$, coefficient de poisson $\nu=0.33$. Le modèle proposé contient une fissure débouchante de longueur initiale $a_0=10\text{mm}$, orientée perpendiculairement à la direction de la sollicitation. Elle est réparée par collage avec un adhésif de type époxyde– bicomposés d'un joint d'épaisseur d'ordre $e_a=1\text{mm}$ et un patch en composite de type graphite-époxyde, de dimensions : longueur $w_r=76\text{mm}$, largeur $h_r=51\text{mm}$, épaisseur $e_r=2\text{mm}$. La plaque utilisée est soumise à un chargement en traction

simple et uni-axial d'intensité $\sigma = 180\text{MPa}$ (Fig.1).

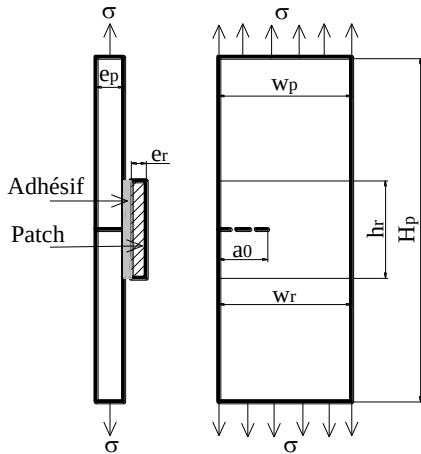


Fig.1. Modèle géométrique de la structure

Les propriétés mécaniques des différents éléments de cette étude sont regroupées dans le tableau 1.

Table I. Propriétés des matériaux utilisés

	Plaque	Patch	Adhésif
Nature	AL2024-T3	Graphite/epoxide	Epoxyde-bi composés
E1(MPa)	72000	172370	473
E2(MPa)		10340	
ν_{12}	0.33	0.3	
ν_{21}		0.018	
G12(MPa)		4280	185.2

IV.1. Effet du patch sur le facteur d'intensité de contraintes (FIC)

La Fig.2 illustre la variation du FIC d'une fissure avec et sans la présence du patch. Il est à signaler que la présence du patch réduit considérablement la valeur du FIC.

Il est clair que le FIC de la fissure réparée est très faible en comparaison avec le FIC de celle non réparée. Comparé avec le cas sans patch, on constate que la valeur a diminué à un grand pourcentage. Ceci peut être expliqué par le fait que le patch absorbe les contraintes subies par la plaque fissurée et cela quelle que soit la longueur de la fissure, mais cela à condition que

la fissure soit couverte par le patch le long de sa propagation.

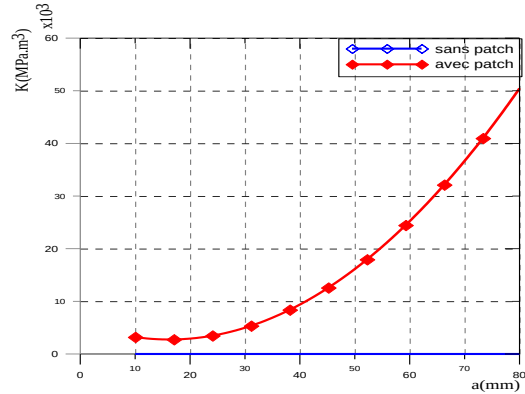


Fig.2. Variation du FIC en fonction de la longueur de la fissure

IV.2. Influence des paramètres géométriques de l'assemblage étudié.

Les principaux paramètres géométriques qui peuvent modifier le comportement de l'assemblage sont : l'épaisseur de l'adhésif, l'épaisseur de la plaque, la longueur et la largeur de la plaque [13].

La figure 3 représente l'évolution du FIC en fonction de la longueur de fissure pour différentes valeurs de l'épaisseur de l'adhésif.

Le facteur d'intensité de contraintes à la pointe de la fissure est proportionnel à l'épaisseur du joint de colle. La concentration de contraintes diminue lorsqu'on diminue l'épaisseur du joint de colle (Fig.3). Donc pour un bon transfert d'effort de la plaque fissurée vers le patch et pour diminuer la concentration de contraintes,

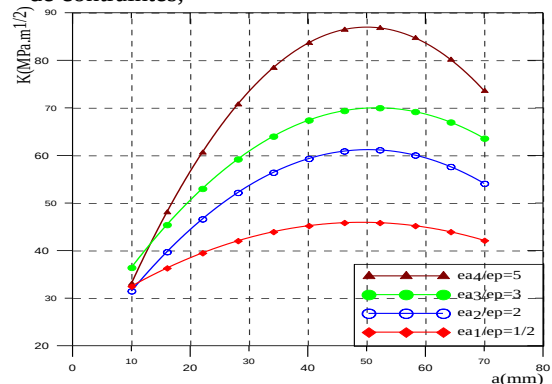


Fig.3. Variation du FIC K1 en fonction de la variation de l'épaisseur du joint de colle

Il faut utiliser des joints de colle à faible épaisseur. Par contre l'utilisation de très faible épaisseur soutient le transfert des charges vers le patch mais augmente le risque d'échec de la liaison.

La figure 4 montre la variation du FIC en fonction de la longueur de la fissure pour différentes valeurs du rapport w_r/w_p

Le FIC est légèrement affecté par la largeur du patch, il est en évolution linéaire lorsqu'on a des valeurs de largeur de recouvrement minimum qui ne dépassent pas trop les dimensions de la fissure Fig.4.

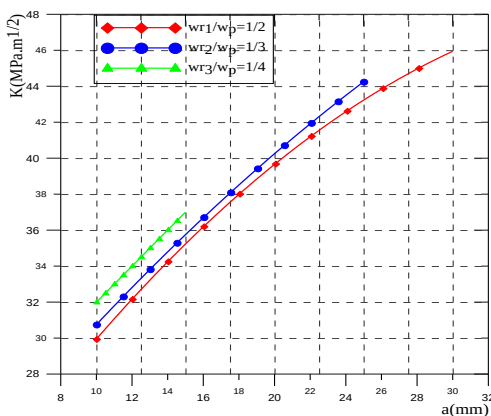


Fig. 4. Effet de la largeur du patch sur le facteur d'intensité de contraintes

La déviation de la fissure peut être provoquée par un accroissement de la longueur du front, associé à une augmentation de la rugosité de la surface de rupture.

Pour l'influence de la longueur du patch sur le FIC on remarque une réduction du FIC à la pointe de la fissure due à une diminution de la longueur du patch et donc diminution de la surface de recouvrement.

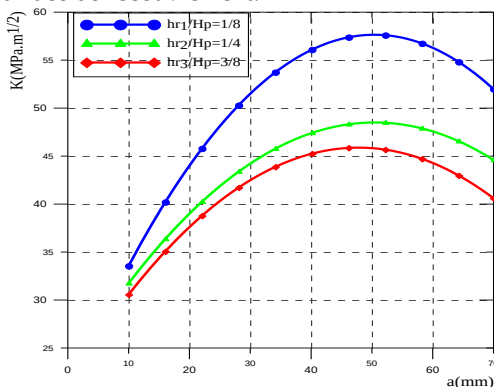


Fig.5. Effet de la longueur du patch sur le FIC

Contrairement au cas précédent, où l'augmentation de la surface de recouvrement était en fonction de la largeur de la plaque Fig.5.

Pour le cas de l'influence de la longueur du patch sur la durée de vie de la structure fissurée, le nombre de cycle à la rupture N_R diminue quand la surface de recouvrement augmente par augmentation de la longueur de la plaque du patch (Fig.6).

Donc la durée de vie diminue d'environ 37%. Ceci nous oblige à chercher une valeur optimale de la longueur du patch, si on essaye d'augmenter la surface de transition des contraintes de rupture de la plaque endommagée vers le patch

Cependant, il y a plafonnement pour une longueur de recouvrement optimale car seules les extrémités du joint travaillent réellement alors que le centre ne supporte pratiquement aucun effort.

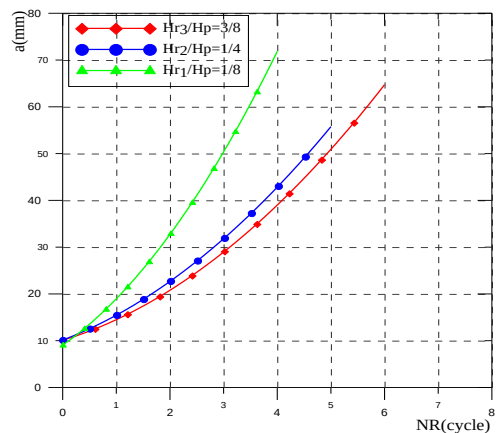


Fig.6. Influence de la longueur du patch sur la durée de vie de la plaque.

IV.3. Influence de la nature des matériaux du patch

Les principaux paramètres du patch, qui peuvent modifier le comportement mécanique de l'assemblage par collage du renforcement par patch en composite d'une structure endommagée : la nature du patch employé, identifié par son module d'élasticité transversal G_a , le type de composite employé caractérisé par son module d'élasticité. Le tableau 2 regroupe les propriétés mécaniques des

matériaux choisis.

Table2. Propriétés mécaniques des matériaux utilisés

Matériaux composites à matrice époxyde et renfort en			
Propriétés	Fibre de verre	Fibre de carbone HM	Fibre de Kevlar 49
EL [GPa]	46	230	84
EL [GPa]	4,6	4,9	2,1
EL [GPa]	4,6	4,9	2,1
v12	0,31	0,32	0,34
	Comp1	Comp2	Comp3

La figure.7 représente la variation du FIC en fonction du type de composite

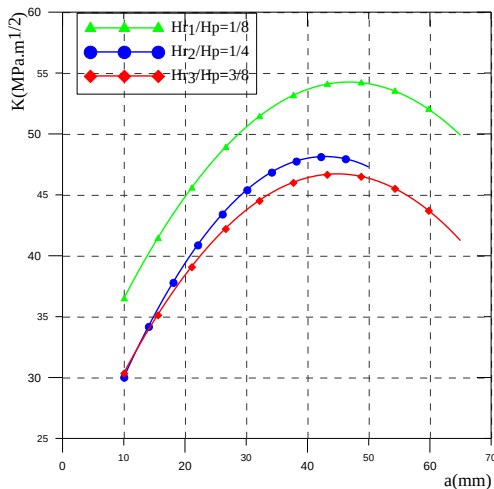


Fig.7. Effet de la nature du composite sur le facteur d'intensité de contraintes

Le composite comp2 a un effet positif sur la diminution du FIC en font de fissure, cela est aussi due à ses propriétés mécaniques.

La figure 8 représente le nombre de cycles à la rupture estimée pour chaque composite employé pour le renforcement de la plaque endommagée.

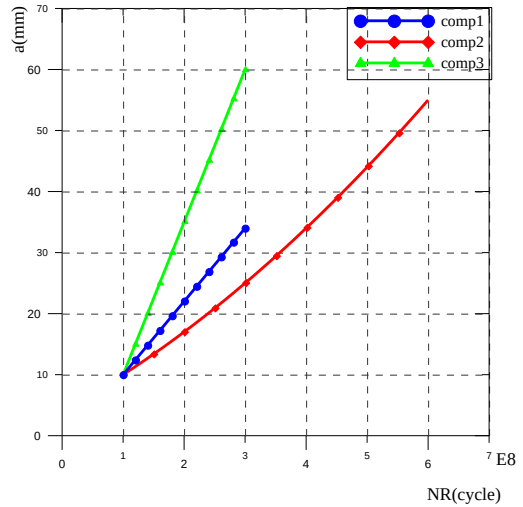


Fig.8. Influence de la nature du composite sur la durée de vie de la plaque

D'après la Fig.8. un retard important de propagation de la fissure est constaté, donc une durée de vie de la structure endommagée sera améliorée. Ce retard à la rupture s'accroît avec une augmentation des propriétés d'élasticité du composite, surtout le module longitudinal du composite comp2 qui a un effet bénéfique sur la durée de vie de la plaque fissurée.

La nature de la colle est considérée comme l'un des facteurs qui peuvent influencer l'efficacité du patch. Le module de cisaillement G étant la propriété définissant la rigidité de la colle. Nous allons donc traiter, dans cette partie son influence sur la résistance du patch. Nous avons comparé le comportement mécanique des assemblages collés avec quatre types de colles, représentés sur le tableau 3 en fonction de leurs modules d'élasticité transversal.

Table3. Modules de cisaillement des colles utilisés

	Colle1	Colle2	Colle3
Ga [Mpa]	171,51	146,82	220,67
	Col4		
Ga [Mpa]	196.04		

La figure 9 montre comment le FIC varie en fonction de l'évolution du module d'élasticité transversal de la colle.

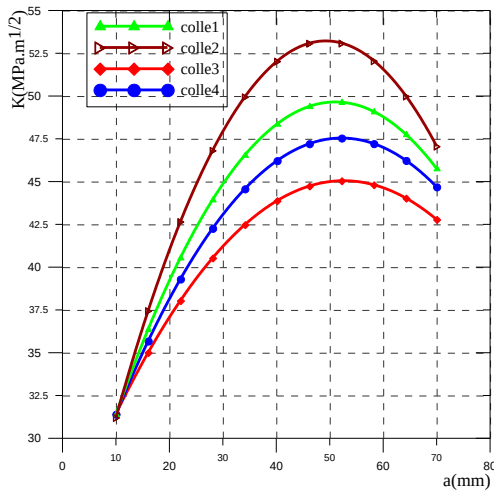


Fig.9. Effet de la nature de la colle sur le FIC.

Plus le module de cisaillement de l'adhésif croît, plus le FIC connaît une diminution très claire. Cela est dû au transfert d'effort qui s'effectue dans le joint de colle. C'est-à-dire que plus on utilise une colle à un module d'élasticité transversal élevé plus l'adhésion entre la plaque fissurée et le patch est parfaite, ce qui engendre un bon transfert d'effort.

Concernant la durée de vie de la plaque fissurée la figure 10 schématise l'effet du module de cisaillement de la colle sur l'augmentation de la durée de vie en fonctionnement de la structure pré-fissurée

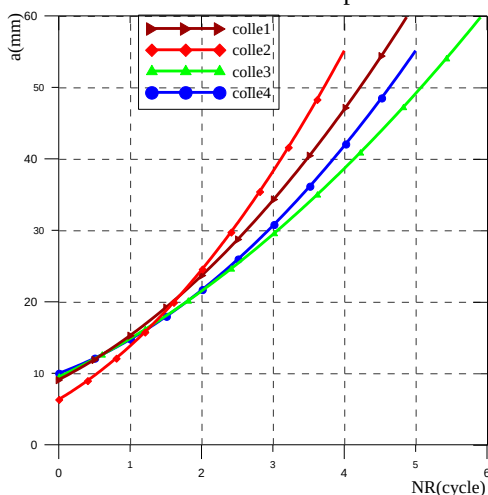


Fig.10. Effet de la nature de la colle sur la durée de vie de la plaque.

On remarque que plus le module de cisaillement de la colle est important, plus la durée de vie de la plaque est importante.

V. Conclusions

L'étude en fatigue a permis de mettre en évidence l'influence de la réparation par patch la durée de vie d'une structure mécanique. Par ailleurs, nous avons étudié l'influence des divers paramètres mis en jeux lors d'une réparation par patch en composite.

On peut résumer les résultats obtenus comme suit:

- Le FIC en mode I est fortement réduit par la présence de patch.

- Pour diminuer la concentration des contraintes, il faut utiliser des joints de colle de faibles épaisseurs. Par contre l'utilisation de très faible épaisseur soutient le transfert des charges vers le patch mais augmente le risque d'échec de la liaison.

- Le FIC KI décroît quand le rapport des épaisseurs e_c/e_p augmente, c'est à dire lorsque l'épaisseur de la plaque du composite croît.

- La valeur maximum de la contrainte en pointe de fissure augmente lorsque la largeur de recouvrement diminue.

- Réduction du FIC à la pointe de fissure due à une diminution de la longueur du patch et donc à la diminution de la surface de recouvrement.

- Le composite comp2 a un effet bénéfique sur la diminution de l'intensité du FIC en fond de fissure, cela est aussi dû à ses propriétés d'élasticité

Références

- [1] Erdogan F and Arin K, A sandwich plate with a part-through and a debonding crack , *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 4, issue 3, September 1972, pp449-458 .
- [2] Ratwani M. M, Kan H. P, Fitzgerald J. H and Labor J. D, Experimental investigations of fiber composite reinforcement of cracked metallic structures, , *Composite Materials: Testing and Design(sixth conference)*, I.M.Daniel,Ed, ASTM STP 787,1982,pp541-558
- [3] C. H. Wang, L. R. F. Rose and R. Callinan, Analysis of out-of-plane bending in one-sided bonded repair » Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Airframes and Engines Division, Defence

- Science and Technology Organisation, Melbourne, Australia 18 Juin 1998
- [4] Soutis, C. and F.Z. Hu, Design and performance of bonded patch repairs of composite structures , Proc. Inst. Mech. Eng1997., 211: 263-271.
 - [5] Park, J.H., T. Ogiso and S.N. Atluri, Analysis of crack in aging aircraft structures with and without composite-patch repairs , Computational Mech. 1992, 10: 169-201
 - [6] W.J Bottega., M.A. Loia, 1996, Edge debonding in patched cylindrical panels , Int. J. Solids Structures 33, 3755–3777.
 - [7] H Engels, W Becker, On the way to get optimized patch repairs of laminates, Vol. 10, Proceedings of the 8th Pan American Congress of Applied Mechanics PACAM VIII, January 5–9, La Habana, Cuba
 - [8] E Oterkus et al., Nonlinear analysis of bonded composite tubular lap joints, Proceedings of the 46th AIAA/ASME/AHS Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Austin, TX, April 17-21 2005
 - [9] D.Gay, Matériaux composites, Edition Hermès, Paris,1989
 - [10] L Berreur, B de Maillard, S Nösperger, L'industrie française des matériaux composites, Rév. 2 du 13 mai 2002 .
 - [11] H.Mao, S.Mahadevan , Fatigue damage modelling of composite materials, Composite Structures 58(2002)405–410.
 - [12] J.M Berthelot, comportement mécanique des structures, matériaux composites, Tec & doc, 2005
 - [13] J-D Mathias , Étude du comportement mécanique de patchs composites utilisés pour le renforcement de structures métalliques aéronautiques , thèse doctorat, Université Blaise Pascal - Clermont II, 30 septembre 2005.