

Réparation des Matériaux Composites Verre/Polyester insaturé

Khedoudja LAOUBI^{1*}, Ali AHMED BENYAHIA²

¹ Laboratoire Revêtements, Matériaux et Environnement (LRME), Université M'Hamed Bougara de Boumerdes, Algérie.

² Laboratoire de mécanique avancée (LMA), Université Houari Boumediène, Algérie.

* auteur correspondant : klaoubi@gmail.com

Résumé

L'objet du présent travail porte sur l'étude du comportement de matériaux composites soumis à des sollicitations d'impact répétés dans le but de proposer une réparation adéquate à ce type d'endommagements, puis de vérifier la tenue des différentes géométries de réparation par une approche expérimentale.

Les résultats expérimentaux montrent, initialement, l'existence de deux types d'endommagement: une fissuration matricielle et un délaminage de la partie impactée. Puis, avec l'augmentation du nombre d'impact, l'endommagement s'accroît en profondeur jusqu'à la perforation totale du matériau.

La réparation des plaques perforées confirme que la méthode de réparation la plus adaptée au matériau étudié est la réparation par stratification avec patch circulaire biseauté. Cette méthode a permis de rétablir la résistance initiale du matériau. En revanche, la performance des réparations dépend fortement de la géométrie et de la nature du patch utilisé.

Mots clés

Composite verre/ polyester ; fissuration, impact répété, endommagement, perforation.

1. Introduction

Les matériaux composites sont des matériaux révolutionnaires qui disposent d'atouts importants. Cependant, malgré le grand essor que connaissent ces matériaux composites, leur durabilité vis-à-vis de certains types de sollicitations reste à élucider. Ainsi leur comportement sous des sollicitations : Mécanique (chocs, fatigue, fluage), thermique (hausse excessive de température), vieillissement (température, humidité, agressivité chimique) est loin d'être totalement compris et nécessite d'être étudié d'avantage. Ces diverses sollicitations peuvent engendrer des endommagements tellement préjudiciables, qu'une réparation soit nécessaire pour le maintien de la pièce en service. Il s'agit de la naissance et du développement de dégradations à petite échelle, le plus souvent microscopique, peu perceptibles au départ mais dont l'aggravation progressive finit par déclencher la rupture macroscopique de la pièce, et afin d'éviter le remplacement de la structure endommagée, opération toujours longue et coûteuse, il est plus économique d'envisager de réparer ces dommages afin de redonner aux pièces composites leurs propriétés originelles. Cependant, les techniques de réparation couramment utilisées, réclament un savoir faire important et sont souvent d'une mise en œuvre complexe. Cette complexité représente un obstacle pour le développement de structures composites en grandes séries.

C'est pourquoi, il serait impératif que tout matériau utilisé dans ce domaine soit accompagné d'une brochure descriptive contenant les caractéristiques et le mode d'entretien obligatoire,

autrement dit, ça nécessite un travail de recherche au préalable, tâche que les petites entreprises ne peuvent assurer sans le concours et le soutien des scientifiques universitaires.

C'est pourquoi, nous avons choisi, pour le présent travail, d'étudier l'effet de l'endommagement sous fatigue par choc répété qui sont les sollicitations les plus rencontrées en service par ce type de matériau et de proposer un mode opératoire adéquat pour la réparation du verre/polyester. Le matériau choisi est celui utilisé par nos entreprises nationales dans la fabrication des bateaux de pêche et de plaisance.

2. Procédure expérimentale

2.1. Matériau

Le matériau de la présente étude est un stratifié verre/UP de séquence [mat300/mat450/ /2[mat600]/ roving500/mat300] élaboré par le procédé moulage au contact sous forme de plaque d'épaisseur $(4.80 \pm 0,36)$ mm. La résine polyester insaturée utilisée est une résine à base d'acide orthophtalique, nécessitant 2% de catalyseur peroxyde de méthyléthylcétone (PMEC 50) et 0,06% d'accélérateur octoate de cobalt. Le gelcoat utilisé, comme couche externe, est une résine polyester à base d'acide isophtalique chargé en pigments blancs. Dans le composite, le taux de fibre massique par pli est de 30% et 45 % pour les mats et le roving respectivement. Après avoir subi une post-cuisson à 40°C pendant 16 h, des éprouvettes de dimensions $280 \times 100 \times 4,27$ mm³ sont découpées des plaques suscitées (Figure 1).



Figure 1 : Eprouvette d'essais de fatigue par choc (faces avant et arrière)

Après conditionnement pendant 24 heures, les éprouvettes ainsi que les films ont subi un post cuisson de 40°C pendant 16 heures d'après l'étude de Perrot [1] qui a confirmé que l'utilisation d'un tel conditionnement permet d'obtenir un état de réticulation reproductible et représentatif de celui rencontré à l'échelle industriel.

II.2. Machine de fatigue par chocs et ses accessoires

La machine d'essais de fatigue par chocs a été fabriquée au Laboratoire de la Mécanique Avancée (LMA) de l'USTHB (Figure 2). Elle transforme un mouvement de rotation continu en un mouvement de translation alternatif grâce à un système bielle-manivelle. Cette machine a déjà fait l'objet de quelques travaux de recherche parmi eux, celui publié par Azouaoui et al. [2].

La production de chocs cycliques permet d'impacter répétitivement une plaque composite afin d'étudier l'évolution des dommages en fonction du nombre d'impacts en utilisant une énergie d'impact constante de 7 joules. Quelques modifications et réglages ont été apportés à la machine pour permettre de réaliser des essais de basse vitesse.



Figure 2: Machine de fatigue par chocs et Montage des éprouvettes

Le montage des éprouvettes a été conçu de façon à ce que les deux bords de l'éprouvette soient encastrés alors que les deux autres bords soient libres. La surface utile est $280 \times 100 \text{ mm}^2$ avec le point d'impact localisé au centre de l'éprouvette.

II.3. Mesure des dommages

La mesure de la surface des zones délaminées est effectuée avec une méthode de pesée. Elle consiste à imprimer l'image de l'éprouvette endommagée et à découper puis peser la forme de la zone délaminée. La masse surfacique du papier étant déterminée en pesant une forme dont l'aire est connue, l'aire de la surface endommagée est obtenue en effectuant le rapport : masse de papier de la zone délaminée / masse surfacique du papier. (Figure 3).



Figure 3: Endommagement par impacts sur un composite verre/polyester

II. 4. Procédure de réparation du composite

Dans la littérature, on distingue différentes solutions de réparation spécifiques aux matériaux composites et qui se définissent surtout en fonction de la gravité de l'endommagement.

Dans la présente étude, nous ne nous concentrons que sur la réparation structurale des structures composites avec collage des patchs composites durs et mous. Ce type de réparation intervient lorsqu'il y a rupture intégrale de l'élément sur la totalité de son épaisseur. Pour redonner à l'élément toutes ses caractéristiques mécaniques, il est impératif de le consolider en faisant appel à un renfort qui est du mat et/ou du tissu de verre imbibé de résine catalysée.

Le principe de ces réparations consiste à enlever la zone endommagée et la recouvrir par l'application d'un patch (pièce rapportée). Dans la littérature, plusieurs références [3-7] ont rapporté la réparation des matériaux composites par patchs qui sont classés en deux catégories : patchs externes et patchs internes.

Dans cette étude, deux types de réparation ont été choisis pour déterminer la méthode de réparation la plus adéquate pour le verre/polyester.

1) Réparation par patch rectangulaire

Pour ce type de réparation, les étapes suivies dans l'assemblage par stratification sont :

1- préparation de la surface à réparer : afin de stopper la propagation de fissures dans la structure, on commence par enlever la surface délaminée, pour toutes les éprouvettes endommagées, à l'aide d'une scie, biseauter par une lime et on termine par un ponçage et une réactivation de la surface avec du styrène (figure 4) ;



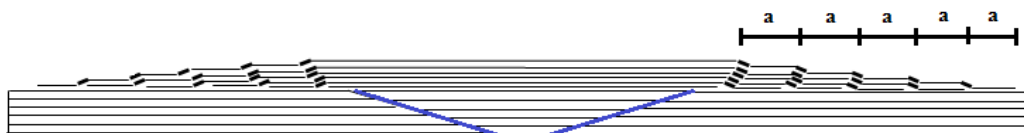
Figure 4: préparation de la surface avant réparation

2- après la réactivation de la surface à réparer, on pose un mat d'accrochage (un mat de 300g) sur les deux éléments à assembler puis on continue la mise en place de la stratification des différentes couches de renforts selon la séquence de la structure à réparer (mat450/2×mat600/roving 500/mat300) (Figure 5) ;



Figure 5 : Illustration de la première étape de la réparation

3- dans le but d'assurer la continuité de la pièce à réparer, après l'assemblage des deux éléments à réparer, on procède par un ponçage et une réactivation de la surface sur laquelle on dépose soit des plis externes (patch rectangulaire mou) ou on colle un patch dur rectangulaire. Dans le cas de l'application d'un patch mou, l'ensemble éprouvette/patch subit un cycle de polymérisation qui permet à la fois de solidifier le patch et de le coller sur l'éprouvette. La géométrie des différentes réparations est représentée par la figure 6.



(a)



(a)



(b)



(c)



(c)

Figure 6 : Géométrie des éprouvettes réparées

Dans le cas de la réparation (a), le nombre de plis externes est égal au nombre de couches du stratifié de base et ils sont superposés en dégradé avec un décalage « **a** » entre les couches successives de 1, 4 mm (noté a sur la figure 6).

Pour la deuxième géométrie (b), la différence par rapport à la géométrie (a) réside dans le nombre de plis externes qui est égal à la moitié de la séquence de base du matériau à réparer (mat300/roving500/mat300). Tandis que dans le cas (c), les éprouvettes endommagées sont réparées par collage d'un patch rectangulaire avec la même résine utilisée dans l'élaboration du matériau de base.

2) Réparation par patch circulaire

La préparation de la surface à réparer est réalisée par enlèvement de la surface endommagée sous forme circulaire. Avant le positionnement du patch, les bords du trou obtenu sont biseauté d'un angle de 20 degrés et réactivés avec du styrène (Figure 7).

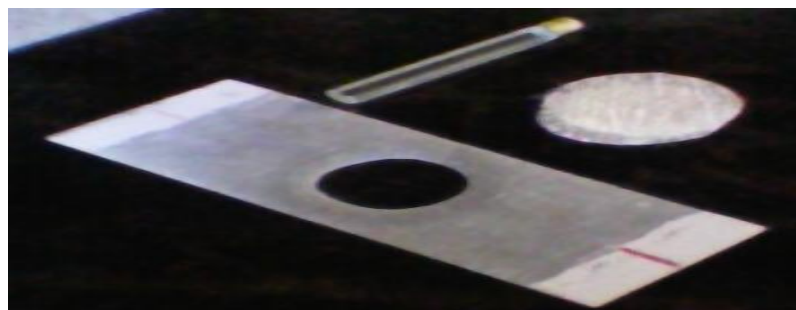


Figure 7 : Préparation de la deuxième géométrie des éprouvettes réparées

Ensuite, après la réactivation de la surface à réparer, le trou est rempli avec un patch interne de même séquence que la surface à réparer suivi par un patch externe de six plis. L'ensemble éprouvette/patch subit un cycle de polymérisation qui permet à la fois de solidifier le patch et de le coller sur l'éprouvette (Figure 8).

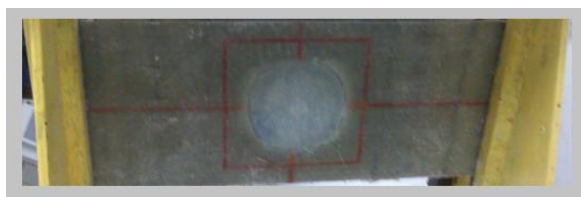


Figure 8 : Deuxième géométrie des éprouvettes réparées

3. Résultats expérimentaux

3.1. Evolution de la surface délaminée en fonction du nombre d'impact

Lors de l'essai d'impact, des photos de la zone impactée et de la face arrière ont été prises, afin de suivre, quantifier et analyser l'évolution des dommages. Précisons que ces photos ont été prises à partir de la même position pour tous les essais.

Un schéma du mode d'évolution du dommage dans la surface impactée est illustré par les photographies données dans le tableau 1. Il s'agit des résultats d'essais pour une énergie d'impact de 7 joules. A travers une analyse visuelle simple, il apparaît que l'endommagement se présente sous forme de :

- une fissuration matricielle et une rupture des fibres qui engendre avec le temps la formation d'un cratère sur la face impactée et la perforation de la plaque;
- un délaminage entre les différents plis ;

Tableau 1 : Endommagement par chocs répétés sur un composite verre/polyester



Cratère sphérique sur la face impactée



Rupture des fibres et délaminage sur la face arrière

Les résultats de l'évolution de la surface délaminée (S) en fonction du nombre d'impact (N) sont illustrés par la figure 9.

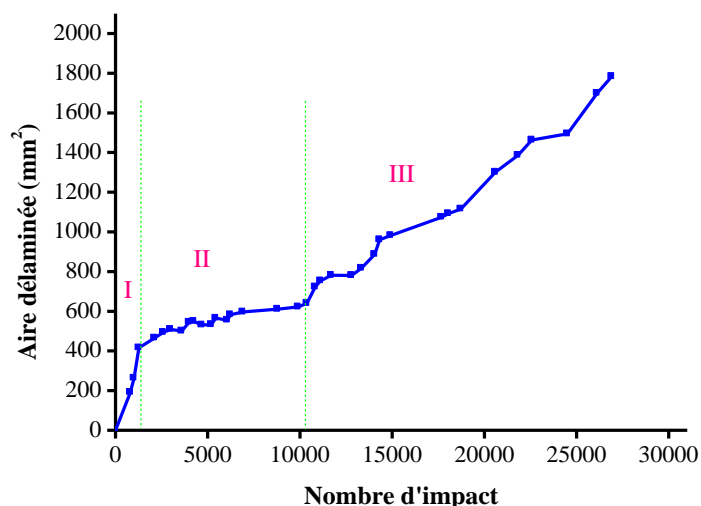


Figure 9 : Evolution de la surface endommagée en fonction du nombre d'impact pour une énergie constante (7 J)

Cette figure montre que pour les premiers coups d'impact, la surface délaminée croît avec l'augmentation du nombre d'impact jusqu'à atteindre une surface équivalente à la surface projetée de la tête d'impacteur. Autrement dit, jusqu'à ce que la surface de contact atteigne son maximum, c.à.d. la surface projetée de l'impacteur.

Après l'augmentation quasi-linéaire de départ, l'évolution de la surface délaminée (S) connaît un ralentissement (Phase II) qu'on pourrait expliquer par une sorte d'écrasement du matériau au droit de la surface impactée et qui engendrerait une sorte de plastification de cette zone.

Après désagrément de la résine impactée, commence la phase III où l'énergie sera transférée totalement sous forme de contrainte de traction aux renforts qui la transféreront à leur tour sous forme de contraintes de cisaillement à la partie élastique (hors de la zone impactée). Ces contraintes de cisaillement se traduisent par un délaminage.

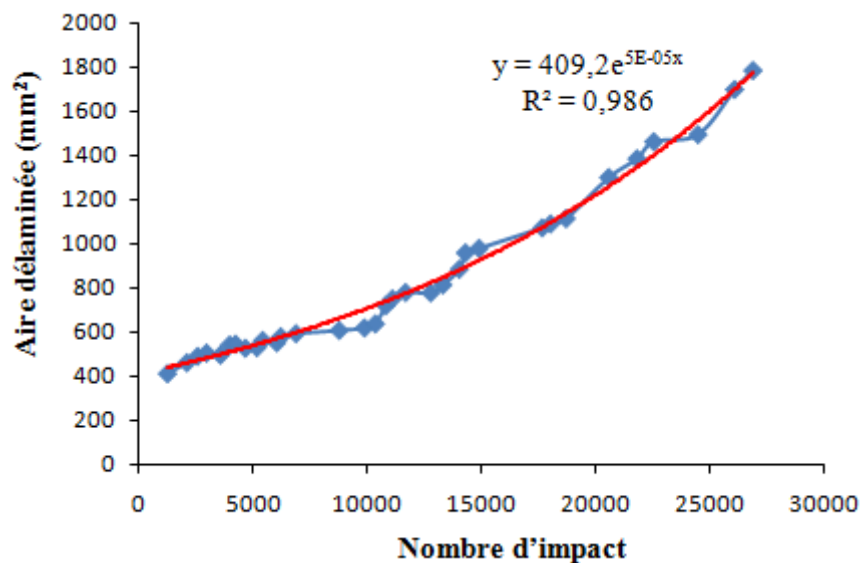


Figure 10 : Evolution de la surface endommagée en fonction du nombre d'impacts pour une énergie constante (7 J) et $S \geq S$ (tête d'impacteur)

Une analyse minutieuse de cette courbe nous a permis d'approcher le comportement dans les deux phases II et III par une seule où l'aire de la surface endommagée (S) suivrait une loi exponentielle en fonction du nombre (N) d'impact de forme :

$$S = 409,2 \exp(5 * 10^{-5} * N) \quad (1)$$

3.2. Comportement des plaques réparées sous chocs répétés

Quatre plaques ont été impactées jusqu'à perforation puis réparées. Il faut rappeler que notre objectif est d'étudier l'effet du type de réparation sur le comportement des plaques réparées sur la base d'une comparaison avec le comportement des éprouvettes saines. La résistance à la fatigue par chocs répétés du stratifié sain constitue une référence pour déterminer la performance de la réparation.

Les figures du tableau 2 illustrent les différents modes d'endommagement des cinq géométries de réparation étudiées.



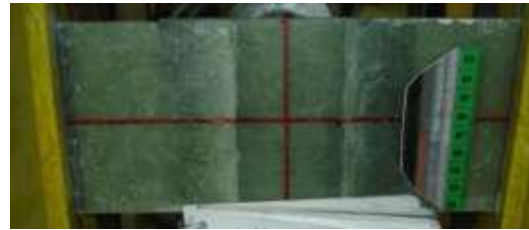
(a)



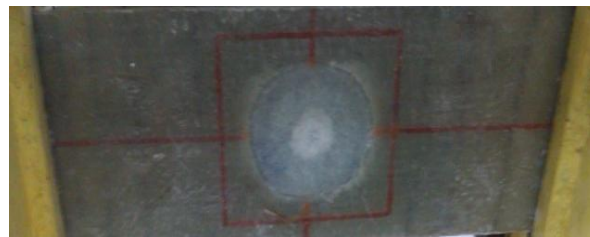
(b)



(c)



(d)



(e)

*T
abl
eau
2:
Mo
des
d'e
ndo
mm
age
me
nts
des
diff
éren
te
s
géo
métr
ies
de
rép
ara
tion*

*A
vec*

:

- (a) - patch externe de six plis coulés et un angle de 20 degrés.
- (b)- patch rectangulaire externe de six plis et un angle de 15 degrés.
- (c)- patch rectangulaire externe de trois plis coulés et un angle de 20 degrés.
- (d)- patch externe rectangulaire collé de six plis et un angle de 20 degrés.
- (e)- patch circulaire externe mou de six plis et un angle de 20 degrés.

Les différentes observations des plaques réparées puis impactées se résument comme suit :

- pour les géométries de réparation (a) et (b), qui se diffèrent juste par l'angle de réparation, il a été enregistré une bonne tenue à l'impact répété (impacts de 7Joules) pour atteindre 14700 impacts pour la géométrie (a) et 18755 impacts pour la géométrie (b). On remarque que la géométrie de réparation (a) a permis de restituer 54,63% de la résistance des éprouvettes saines. Quant à la géométrie (b), elle a enregistré une restitution de 69,69% de la résistance des éprouvettes saines. De plus, la chronologie de rupture est la même pour les deux géométries, elle commence par un délaminage entre le matériau de base et le patch interne. Le délaminage en question démarre de la face opposée (partie tendue) pour atteindre la face impactée, puis il continue entre le matériau de base et le patch externe. Le délaminage s'amorce sur les bords et se propage vers l'intérieur de la section droite de la pièce.

- pour la géométrie (c), en plus du délaminage entre le matériau de base et les deux extrémités du patch intérieur, un autre délaminage a eu lieu au centre du patch intérieur. La rupture finale s'est produite par désadhésion totale sur un côté entre les patches et le matériau de base après 25000 coups c.à.d. une restitution de 92,9% de la résistance des éprouvettes saines.

- quant à la réparation par collage (géométrie (d)), elle n'a presque pas de résistance (rupture après 25 impacts seulement). La propagation de la rupture de l'éprouvette est très rapide (décollement), ce qui confirme la faible performance de la réparation par collage pour les composites verre/polyester.

- pour la géométrie (e), l'observation du scénario de rupture montre l'apparition sur le coté opposé de la zone impactée :

- d'une zone délaminée au centre de l'éprouvette après 1500 coups d'impacts ;
- apparition du délaminage au centre du patch et sur les bords de la partie biseautée après 2500 coups d'impacts ;
- le délaminage s'élargit au centre du patch et reste presque inchangé sur les bords de la partie biseautée.
- un délaminage de forme irrégulière proche de la forme circulaire d'une surface de 1cm^2 sans décollement du patch externe;
- à 10000 coups d'impacts, l'énergie est toujours absorbée par le centre du patch ;
- à 18000 coups d'impacts, pas de propagation du délaminage le long de la partie biseautée ;
- jusqu'à 35000 coups d'impacts, hormis une accentuation du délaminage au centre du patch aucun décollement du patch externe ni perforation de la plaque ne sont enregistrés ;

3.4. Discussion

D'après les résultats trouvés, l'évolution de la surface endommagée en fonction du nombre d'impact, sous chocs répétés, s'effectue en trois phases : un domaine d'amorçage de fissures où la surface délaminée croît rapidement en fonction du nombre d'impact jusqu'à une valeur d'environ 1270 impacts, un ralentissement entre (1270-10374 impacts), suivi par une augmentation linéaire de l'aire délaminée jusqu'à la perforation totale de la plaque. Les types d'endommagement enregistrés sont: une fissuration matricielle et des ruptures des fibres avec la formation d'un cratère sur la face impactée. Le cratère traduit une microfissuration de la résine sur la partie tendue par flexion de la plaque. Il exprimerait également un délaminage entre les plis tendus.

Après la perte de la résine désintégrée, l'impacteur commence à taper essentiellement sur les fibres. Ces dernières sont plus élastiques que la résine, elles vont absorber plus d'énergie, ce qui fait ralentir la propagation. Cependant, après désagrément de la résine impactée, l'énergie sera transférée totalement sous forme de contrainte de traction aux renforts qui la transféreront à leur tour sous forme de contraintes de cisaillement à la partie élastique (hors de la zone impactée). Ces contraintes de cisaillement se traduisent par un délaminage.

Quant à la comparaison entre les différentes géométries de réparation choisies, on peut conclure que la méthode de réparation la plus adaptée au matériau composite étudié (verre/polyester) est la réparation par stratification avec utilisation d'un patch mou circulaire. Cette méthode a permis de rétablir la résistance initiale du matériau. La performance de la réparation dépend de l'angle de réparation et est moins influencée par le nombre de plis externes de la réparation.

4. Conclusion

L'objectif de ce travail était d'étudier le comportement de matériaux composites soumis à des sollicitations d'impact répétés a été effectuée dans le but de proposer une réparation adéquate à ce

type d'endommagements, puis de vérifier la tenue des différentes géométries de réparation par une approche expérimentale.

Les résultats obtenus se résument comme suit :

- l'évolution de la surface endommagée en fonction du nombre d'impact, sous chocs répétés, s'effectue en trois phases : un domaine d'amorçage de fissures où la surface délaminée croît rapidement en fonction du nombre d'impact jusqu'à une valeur d'environ 1270 impacts, un ralentissement entre (1270-10374 impacts) qu'on pourrait expliquer par une sorte d'écrasement du matériau au droit de la surface impactée et qui engendrerait une sorte de plastification de cette zone. Après désagrément de la résine impactée, l'énergie sera transférée totalement sous forme de contrainte de traction aux renforts qui la transféreront à leur tour sous forme de contraintes de cisaillement à la partie élastique (hors de la zone impactée). Ces contraintes de cisaillement se traduisent par un délaminage qui se termine par la perforation du matériau.

Quant à la comparaison entre les différentes géométries de réparation choisies, on peut conclure que la méthode de réparation la plus adaptée au matériau composite étudié est la réparation par stratification avec utilisation d'un patch circulaire. Contrairement à la réparation qui utilise des patchs rectangulaires, l'utilisation d'un patch circulaire a permis de rétablir la résistance initiale du matériau en minimisant les zones de concentration de contrainte. En outre, la performance de la réparation dépend de l'angle de réparation, du type de patch et est moins influencée par le nombre de plis externes de la réparation.

Références

1. Y. Perrot, Influence des propriétés de la matrice sur le comportement mécanique de matériaux composites verre/polyester utilisés en construction navale de plaisance - Cas des résines polyester limitant les émissions de styrène. Thèse, Paris, 2006, pp 1-235.
2. K. Azouaoui, N. Ouali, Y. Ouroua, A. Mesbah, T. Boukharouba, Damage characterisation of glass/polyester composite plates subjected to low-energy impact fatigue. *Journal of Sound and Vibration*. 308 (2007) 504-513.
3. P. CHENG, Etude et optimisation de la réparation des composites stratifiés par collage des patchs externes. thèse de Doctorat de l'Université de Bourgogne, décembre 2010.
4. C. Atas, Y. Akgun, Olgay Dagdelen, Bulent M. Icten, Mehmet Sarikanat, An experimental investigation on the low velocity impact response of composite plates repaired by VARIM and hand lay-up processes, *Composite Structures*, Journal in Press (2010).
5. K.B. Katnam, L.F.M.DaSilva, T.M.Young. Bonded repair of composite aircraft structures: A review of scientific challenges and opportunities, *Progress in Aerospace Sciences* 61 (2013) 26–42.
6. F. Benyahia, A. Albedah, B. Bachir Bouiadjra, Analysis of the adhesive damage for different patch shapes in bonded composite repair of aircraft structures, *Materials and Design* 54 (2014) 18–24.
7. M. Kashfuddoja, M. Ramji, Design of optimum patch shape and size for bonded repair on damaged Carbon fibre reinforced polymer panels, *Materials and Design* 54 (2014) 174–183.