



HAL
open science

**Etude expérimentale et numérique d'un raidisseur collé
Type oméga sous un chargement statique = Numerical
and experimental work on a bonded top-hat stiffened
panel**

Ghias Mohamad, Mostapha Tarfaoui, V. Bertram

► **To cite this version:**

Ghias Mohamad, Mostapha Tarfaoui, V. Bertram. Etude expérimentale et numérique d'un raidisseur collé Type oméga sous un chargement statique = Numerical and experimental work on a bonded top-hat stiffened panel. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. 10 p. hal-00389535

HAL Id: hal-00389535

<https://hal.science/hal-00389535>

Submitted on 11 Jun 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude expérimentale et numérique d'un raidisseur collé Type oméga sous un chargement statique

Numerical and experimental work on a bonded top-hat stiffened panel

G.MOHAMAD¹, M.TARFAOUI¹ et V.BERTRAM²

¹ LBMS, Laboratoire de mécanique des Structure Navale
Ensieta- France- 29200 Brest
ghiasmo@ensieta.fr, tarfaomo@ensieta.fr

² : Germanischer Lloyd
Vorsetzen 35, D-20459 Hamburg, Germany

Résumé

Dans ce travail, on a étudié le comportement mécanique de différents types de raidisseurs composites collés sur une plaque sandwich sous différents chargements statiques. Dans la première partie, on a réalisé plusieurs simulations numériques qui nous ont servi à comparer le comportement mécanique de différentes géométries de raidisseurs : Ω , I, 1/2cercle. Un modèle 2D symétrique avec introduction des éléments cohésifs a été utilisé pour prévoir le délaminage entre les plis sous un chargement de trois points de flexion et sous un chargement d'arrachement.

Abstract

In this work, one studied the mechanical behaviour of various types of bonded composite stiffeners under various static loadings. In the first part, one carried out several digital simulations which were used to compare the mechanical behaviour of various geometries of stiffeners: Ω , I, 1/2circle. A symmetrical model 2D with cohesive elements was used to have the delamination between the plies under a loading of flexion.

Mots Clés : Composite, raidisseur, raidisseur collé.

Keywords: Composite, stiffener, bonded stiffener.

1. Introduction

Les matériaux composites ont un grand succès dans les structures avancées. Toutes ces structures en question exigent des propriétés supérieures en ce qui concerne les matériaux utilisées. Pour valider les choix de ces matériaux, plusieurs études numériques ont été lancées pour tester le comportement des structures composites sous différents scénarios de chargement. Les résultats numériques restent non crédibles s'ils ne sont pas complétés par une étude expérimentale.

Les panneaux composites raidis sont employés couramment dans les structures navales avancées car ils ont beaucoup d'avantages. Plusieurs études analytiques, numériques et expérimentales ont été réalisées pour étudier ces assemblages, analyser leurs modes de défaillance et pour améliorer leur efficacité structurale [1-4]. Chaitali et al. [5] ont réalisé une étude sur des plaques raidies en composite en employant une approche numérique basée sur la méthode des éléments finis. Ils ont aussi établi des formulations analytiques pour le calcul du champ de déplacement, de déformations et de contraintes. Les comparaisons entre les résultats analytiques, numériques, et les travaux analytiques des autres chercheurs étaient satisfaisants. Un autre travail a été mené par Eksik et al. [6]. Une première partie expérimentale a été faite sur deux différents types de raidisseur type Ω sous un chargement de 4 points de flexion. Ils ont trouvé que suivant la composition du stratifié, la rupture initiale se produit dans la matrice au niveau du chapeau et la rupture finale a lieu soit en forme de rupture au niveau des fibres et de la matrice, soit en forme d'une rupture de cisaillement brutal au niveau des supports. Dans la deuxième partie de leur travail, un code de simulation numérique ANSYS a été utilisé pour modéliser les résultats expérimentaux. Ils ont obtenu des résultats numériques proches des résultats expérimentaux. Phillips et al. [7] ont essayé de quantifier l'endommagement entre le raidisseur en Ω et la plaque de base dans une structure navale FRP.

Dans ce papier, nous allons vous présenter un travail numérique réalisé sur deux types de raidisseur type Ω en composite sous des chargements statiques: le premier est collé sur un sandwich et l'autre est

assemblé avec la plaque de base par stratification. Des résultats expérimentaux d'essais de flexion 3 points et d'arrachement sont commentés et discutés

2. Etudes numériques

L'objectif de ce travail est l'étude du comportement d'une plaque raidie sous différents types de chargement statique. Dans un premier temps, un travail numérique a été mené pour l'optimisation de la géométrie du raidisseur. Toutes les simulations sont réalisées avec le code de calcul par éléments finis ABAQUS avec la formulation Standard de la version 6.7-1 [7]. La structure des programmes est constituée de deux grandes parties :

- définition du problème,
- définition du type de calcul.

Le modèle comprend différents modules permettant d'écrire :

- les géométries,
- les matériaux utilisés,
- les conditions aux limites et les chargements.

La simulation inclut :

- le type de calcul,
- les conditions initiales,
- les sorties désirées.

Les appuis ainsi que le poinçon sont considérés comme des corps indéformables en raison de leur grande rigidité comparativement aux éprouvettes. Leurs parties en contact avec le cylindre sont prises comme surfaces maîtres. Les surfaces de la plaque de base potentiellement en contact avec les appuis et le poinçon sont prises comme surfaces esclaves. Ainsi les nœuds de la plaque raidie sont contraints à ne pas pénétrer ceux des surfaces des corps rigides tandis que le contraire est possible en raison de leur plus grande rigidité. Les mouvements relatifs entre les surfaces de contact ont été choisis en "finit sliding", ce qui suppose que ces surfaces de contact peuvent se déplacer d'une façon importante l'une par rapport à l'autre sur un incrément de calcul. La gestion du contact est réalisée grâce à un algorithme basé sur la méthode des pénalités. Les différentes parties de la plaque raidie (plaque de base, le raidisseur, la colle, le remplisseur) sont liées par des contacts de type TIE.

2.1 Matériaux

Le tableau 1 donne les propriétés des différents matériaux qui constituent la plaque raidie, dans la première partie de ce travail pour comparer le comportement de différents types de raidisseurs.

Matériaux	Localisation	Propriétés	Valeurs
Adhésif	Joint de colle	E (MPa)	2000
		ν	0.277
Balsa	Ame de la plaque de base	E (MPa)	1833
		ν	0.3
Vinyester Dion9102	Remplisseur	E (MPa)	2500
		ν	0.35
Mousse	Ame de l'Oméga (raidisseur)	E (MPa)	4500
		ν	0.35

Tab.1 . les propriétés des différents matériaux qui constituent la plaque raidie, première partie

Pour arriver à comparer les résultats expérimentaux avec les simulation, nous devons respecter les propriétés des matériaux utilisés dans l'expérimentale dans nos simulations numériques. Le tableau (2) donne les propriétés des matériaux utilisés dans la deuxième partie de ce travail. Sachant que le composite utilisé est le même dans toutes les simulations.

Matériaux	Localisation	Propriétés	Valeurs
Araldite 2015	Joint de colle	E (MPa)	2000
		ν	0.277
Vinyester Dion9102	Remplisseur	E (MPa)	2500
		ν	0.35

Matériaux	Localisation	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E3 (MPa)	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G12 (MPa)	G13 (MPa)	G23 (MPa)
Balsa	Ame de la plaque de base	50	3518	50	0.02	0.5	0.02	157	157	157
	Ame de l'Oméga (raidisseur)									
Composite(verre-polyester)	Chapeau	23711	23711	9000	0.151	0.2	0.2	4498	2977	2977
	Peau de sandwich									

Tab. 2 . les propriétés des différents matériaux qui constituent la plaque raidie, deuxième partie

2.2 Type de chargement et géométries des raidisseurs testés

Dans ce travail, nous avons appliqué deux types de chargement sur la structure collée : un essai de flexion trois points et un essai d'arrachement, Figure 1. D'un premier temps on a lancé des simulations sous un chargement de flexion pour comparer le comportement de différents types de raidisseur sous tel type de chargement.

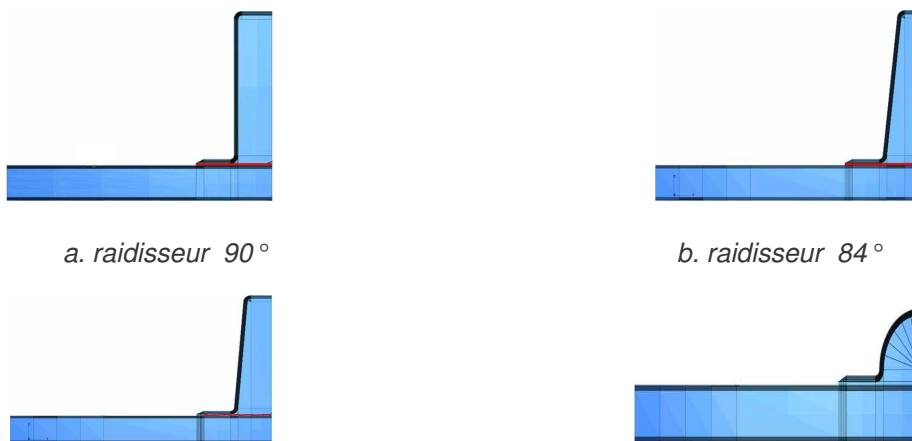


a. Flexion trois points

b. Essai d'arrachement

Fig.1. Conditions de chargements

Nous avons comparé le comportement mécanique de quatre différents types de raidisseurs sous un chargement de flexion pour trouver le raidisseur qui montre les propriétés les plus intéressantes. La figure 2 montre les quatre géométries de raidisseurs testés dans cette première partie de ce travail.



a. raidisseur 90°

b. raidisseur 84°

c. raidisseur 86°

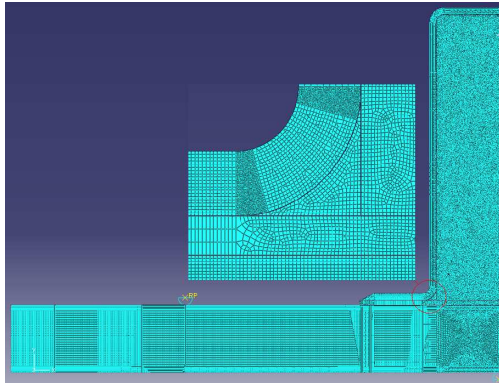
d. raidisseur 1/2 disque

Fig. 2. Les quatre types des raidisseurs testés

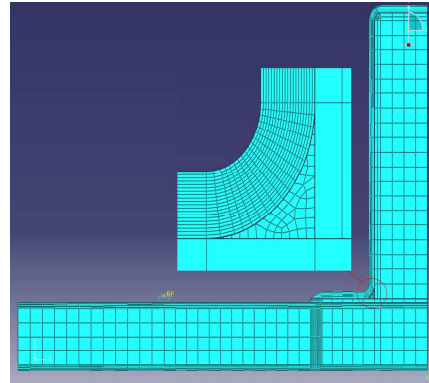
2.3 Méthode E.F

Deux séries de simulation ont été lancées. La première série a été réalisée sans prise en compte de l'endommagement dans la structure. Dans la deuxième série, nous avons introduit des éléments cohésifs pour reproduire l'endommagement de type délaminage entre plis et de décollement entre les différentes parties de la structure.

Un modèle 2D symétrique, avec des éléments quadratiques linéaires CPS4R et des éléments triangulaires CPS3, a été utilisé pour la première série, figure 3.a.



a. Première série de calcul



b. Deuxième série de calcul

Fig. 3. Exemple du maillage utilisé dans la première série de calcul

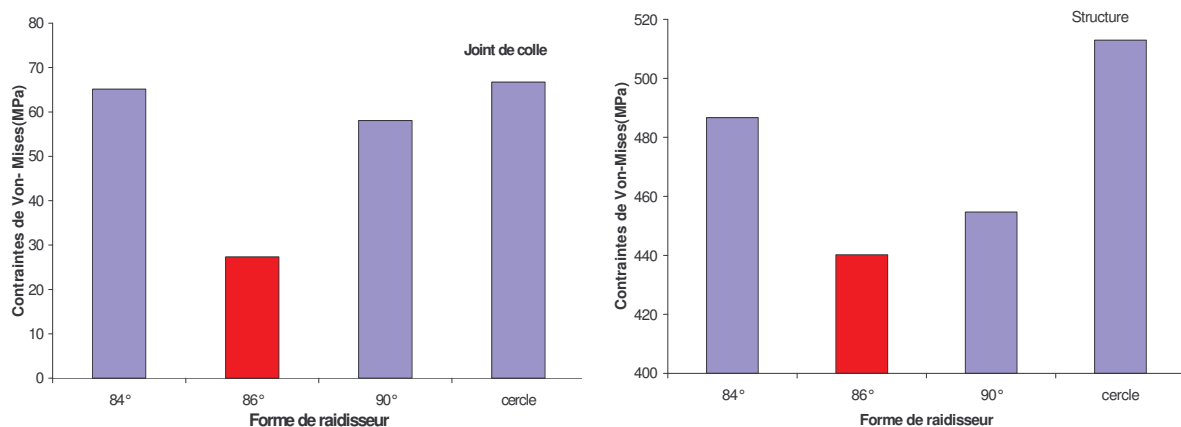
Sachant qu'on a essayé de respecter la taille d'élément de maillage pour les différents raidisseurs testés. Dans la deuxième série de calcul nous avons utilisé un autre modèle 2D symétrique mais avec des éléments cohésifs quadratiques type(COH2D4). Ces éléments cohésifs ont été introduits d'un côté entre les différents plis des stratifiés et de l'autre côté entre les différentes composantes de la structure, Figure 3.b.

2.4 Résultat numérique

2.4.1 Modèles sans endommagement

L'objectif de cette partie était de comparer le comportement mécanique de différentes formes des raidisseurs sous différents types de chargement. On va présenter dans cette partie les résultats des simulations sous un chargement de flexion (trois points de flexion).

Dans un premier temps, nous avons comparé les contraintes maximales de Von Mises dans la structure et dans le joint de colle, figure 4.



a. Joint de colle

b. Structure

Fig. 4. Contraintes maximales de Von Mises

Comme on peut le voir sur la figure 4, le raidisseur avec un angle de 86° montre un niveau de contraintes bas par rapport aux autres raidisseurs testés.

Nous avons ensuite tracé l'effort en fonction de déplacement pour chaque raidisseur testé. La figure 5 montre que le raidisseur 86° présente une souplesse plus élevée que les autres raidisseurs sous un chargement de flexion 3points.

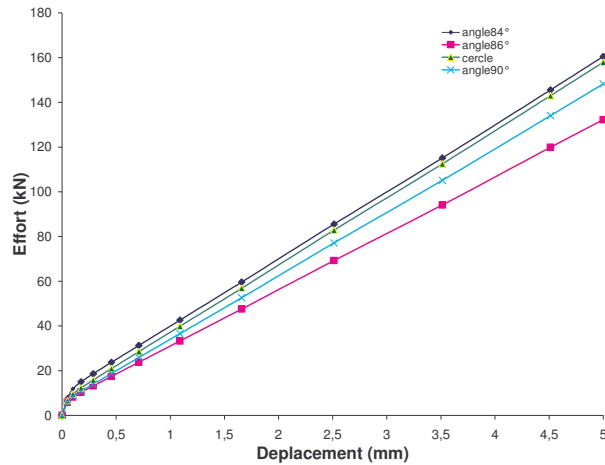
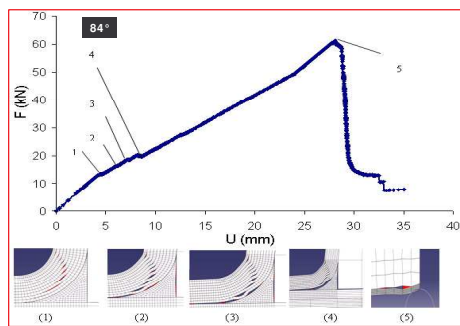


Fig. 5. Effort - déplacement pour différentes géométries de raidisseur sou un chargement de flexion

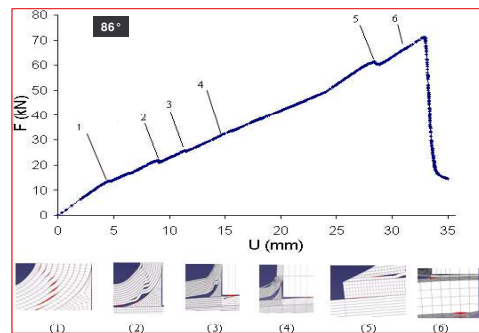
2.4.2 Modèles avec endommagement

Pour voir l'effet de l'endommagement sur le comportement mécanique d'une structure raidie, nous avons introduit des éléments cohésifs pour reproduire l'endommagement en forme de délaminage entre plis et de décollement entre les différentes parties de la structure.

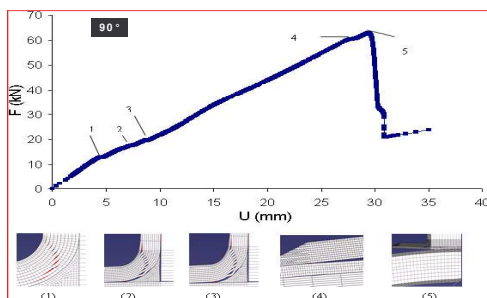
Des éléments cohésifs linéaires quadratiques type COH2D4 ont été utilisés pour modéliser le délaminage par une rupture cohésive. Ces éléments travaillent en traction seulement avec un critère de rupture énergétique. Comme dans la première série de simulations, nous avons testé les quatre types de raidisseurs : 84°, 86°, 90° et demi disque.



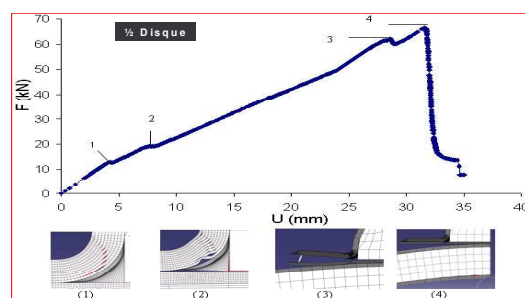
a. Raidisseur type 84°



b. Raidisseur type 86°



c. Raidisseur type 90°



d. Raidisseur type 1/2 disque

Fig. 6. Effort - déplacement pour différents types de raidisseur sous un chargement de flexion trois point

L'endommagement initial pour un raidisseur type 84° se produit à 12.2 kN sous forme d'un délaminage entre plis au niveau du chapeau. Cet endommagement est suivi d'un flambement local des plis au niveau du chapeau avec séparation entre le chapeau et la résine. Un décollement entre la mousse et la résine, entre la mousse et le chapeau et entre le chapeau et le joint de colle se produisent ensuite. La rupture finale est brutale et se produit à 60 kN ; elle est caractérisée par une séparation de l'oméga. Pour un raidisseur type 86° , 90° et $1/2$ disque, l'endommagement initial se produit respectivement pour 12.4, 12.4 et 12 kN sous forme de délaminage inter plis au niveau du chapeau. Nous avons ensuite quasiment le même scénario de l'endommagement jusqu'à la rupture finale, Figure 6.

L'analyse de la figure 8 nous permet d'énoncer les constats suivants :

- Le raidisseur Oméga à 86° montre un comportement meilleur que les autres types de raidisseur testés, figure 7.
- L'endommagement initial se produit au niveau de la cornière dans le chapeau à environ 12 kN de chargement.
- La rupture finale est caractérisée par une séparation entre la plaque de base et l'ensemble de joint de colle avec le raidisseur.

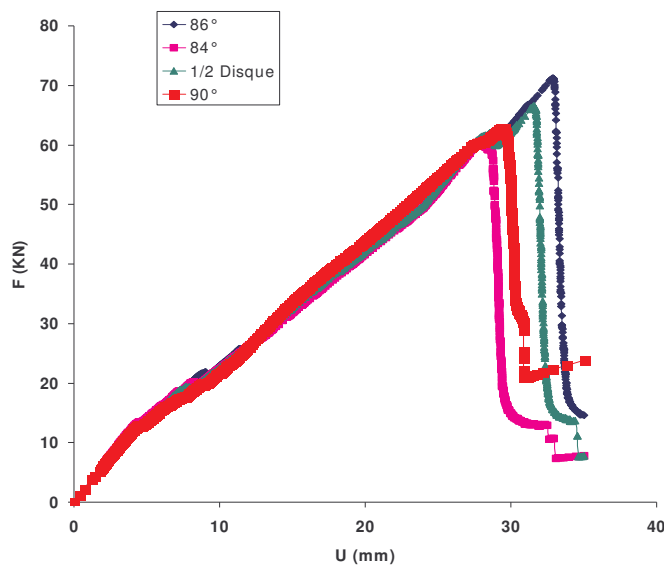


Fig. 7. Comparaison entre différents formes de raidisseur avec des éléments cohésives

3. Etudes expérimentales

Après avoir modélisé numériquement différents types de raidisseurs sous différents chargement et afin de valider notre méthode d'assemblage proposée, une campagne d'essais en quasi-statique a été lancée sur des raidisseurs Ω type 90° . Deux types de chargement statique sont utilisés pour tester ces plaques avec raidisseur collé. Le premier essai était un essai de trois points de flexion et le deuxième essai était un essai d'arrachement.

3.1 Moyens d'essai

L'ensemble des essais a été mené sur une machine hydraulique mono axiale de type Instron 1342 de capacité 100kN pilotée par un PC, Deux grandeurs physiques ont été enregistrées lors de l'essai : force et déplacement, Figure 8.

Plusieurs moyens d'analyse et d'observation ont été utilisés pour le suivi du comportement et de l'endommagement des structures en T. Les moyens utilisés sont :

- Caméra numérique dotée d'un objectif (zoom optique $\times 12$). Elle a pour rôle le suivi des zones d'initiation et de propagation des fissures.
- Appareil photo numérique doté d'un zoom 12.
- Caméra CDD son rôle est de suivre l'initiation ainsi que la propagation des fissures et également d'enregistrer le bruit (craquements) induit lors de l'essai. Ce qui peut être très utile pour détecter les premiers endommagements dans l'éprouvette.
- Deux spiders pour enregistrer les déformations sur les jauges collées sur les éprouvettes

Dans le cadre de ma thèse, plusieurs essais expérimentaux statiques sont prévues pour identifier le comportement mécanique de nos éprouvettes collées et les autres qui sont stratifiées. La première série d'essais est sous un chargement de flexion et la deuxième est sous un chargement d'arrachement.

3.2 Chargement de trois points de flexion

Dans cet article, je vais vous présenter les résultats du premier essai réalisé sous un chargement de trois points de flexion, Figure 10. Une structure raidie colle a été testé dans le but de étudier son comportement et ses modes d'endommagement et de rupture sous tel chargement, Figure 8.

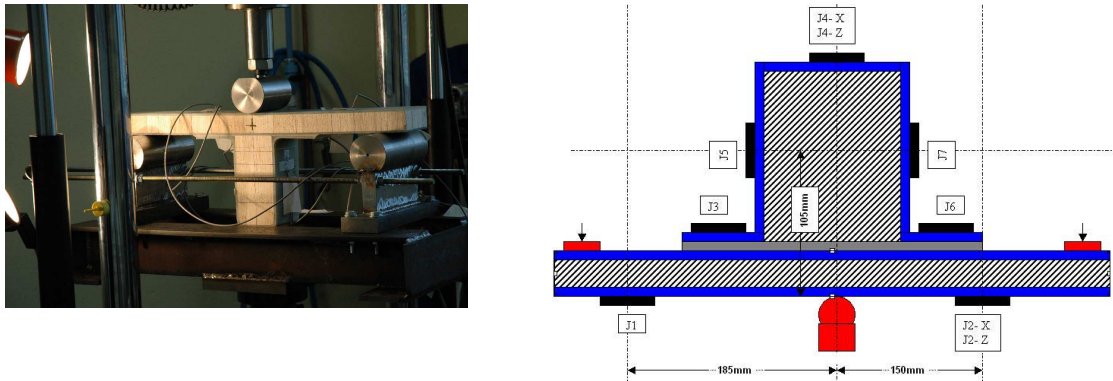


Fig. 8 . Essai de flexion et placement des jauges

Pour avoir les maximales des informations concernant le comportement mécanique de notre structure collée, nous avons collé sept jauges de déformation sur la pièce, figure 8.

Le déplacement et l'effort de la vérine ont été aussi récupérés pendant l'essai. Dans la figure 9, nous avons montré les signaux des jauges.

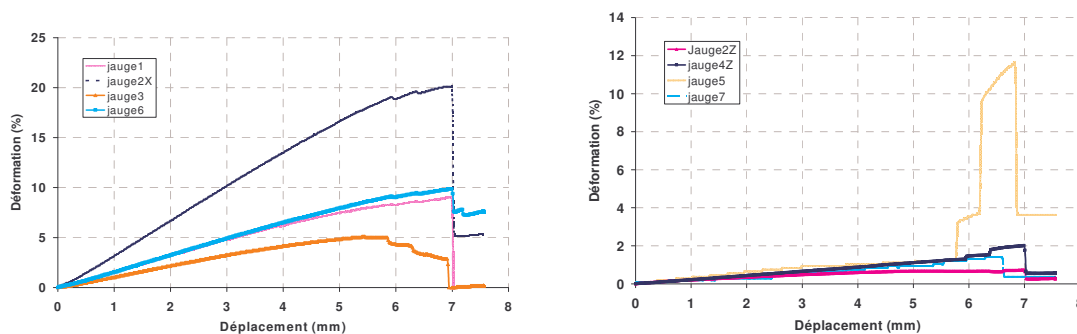


Fig.9 : Dépouillement de la déformation sur les jauges

La structure a montré un comportement quasi statique jusqu'à la rupture finale. A 4kN un crack audible a été entendu qui ne correspond à rien sur la courbe de l'effort en fonction de déplacement, figure 10. La rupture finale a eu lieu à 12,5 kN au niveau de l'interface peau- âme dans plaque de base. Nous avons vérifié si des autres endommagements se sont produits dans autres zones de la structure, surtout au niveau du joint de colle et du chapeau, mais rien a était signalé. Nous avons remarqué que l'initiation de l'endommagement a été reproduit pas lions de l'appui.

On peut conclure à la fin que :

- On a un comportement quasi-statique jusqu'à la rupture finale
- La rupture se produit sous un chargement de 12,5 kN.
- Suivant certaines directions (y), on a la symétrie qui est assurée par contre suivant l'axe X, on a trouvé un écart considérable. En analysant la géométrie de notre pièce, on a trouvé une petite dissymétrie au niveau du raidisseur qui peut être la cause de cette dissymétrie.

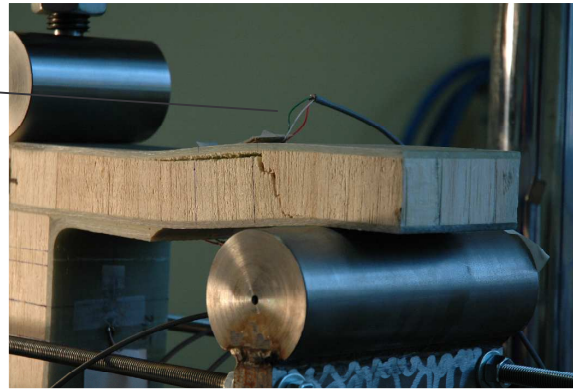
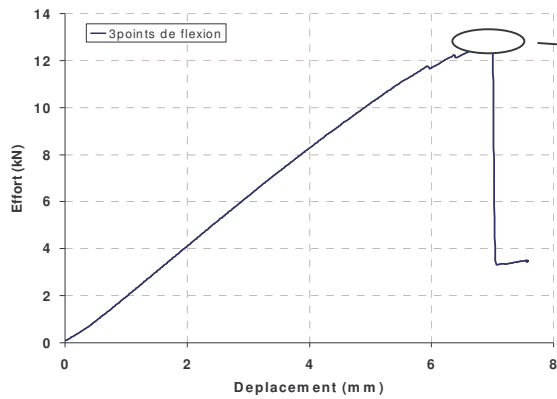


Fig. 10. Effort en fonction de déplacement

3.3 Essais d'arrachement

Dans ce paragraphe, nous avons testé trois pièces raidies collés sous un chargement d'arrachement. L'objectif est toujours l'étude du comportement mécanique et les modes de l'endommagement de cette structure raidie. Un système spécial a été préparé pour réaliser cet essai, figure 11.

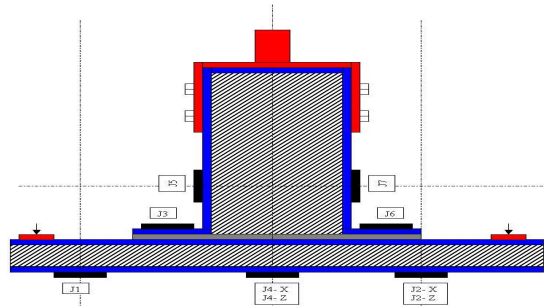
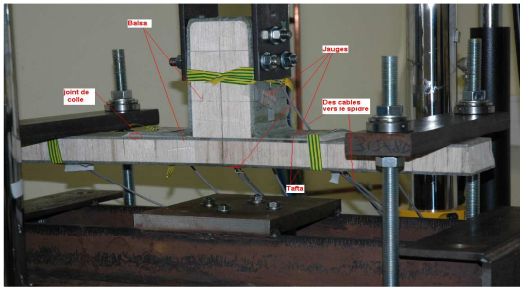


Fig. 11. Dispositif et placement des jauges

Comme nous pouvons voir que le placement des jauges de déformation restent les mêmes sauf la jauge 4 qui est collé sur la surface inférieure de la plaque de base, figure 11.

En faisant la comparaison entre les différents signaux des jauges prévues symétriques, certains jauges ont assuré la symétrie des notre pièces surtout les jauges verticales

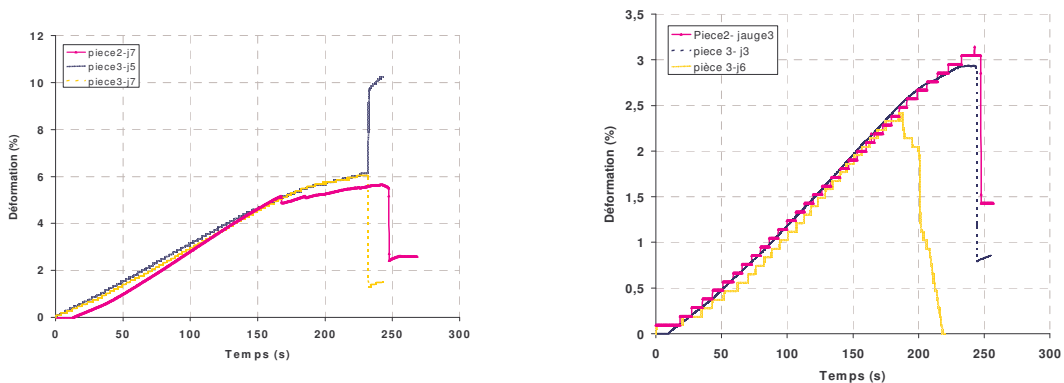


Fig. 12 : Dépouillement de la déformation sur les jauges

Au niveau de la répétitivité de nos trois essais, certaines jauges ont bien assuré cette répétitivité, figure 12.

Par contre, on a eu un petit décalage sur certaines jauges. On peut expliquer ce décalage par un fait de dissymétrie ou des petite erreurs au niveau de collage des jauges.

Dans la figure 13 vous pouvez trouver certains exemples des réponses des jauges sur les trois pièces. Faut d'un problème au niveau de notre spider, nous n'avons pas arrivé à récupérer le signal du déplacement pour les trois essais. La comparaison qu'on a faite sur les courbes suivantes, On les a tracés en fonction de temps. Nous avons aussi tracé l'effort en fonction de temps dans le but d'avoir des informations sur la rigidité et la répétitivité des essais réalisés, figure 15.

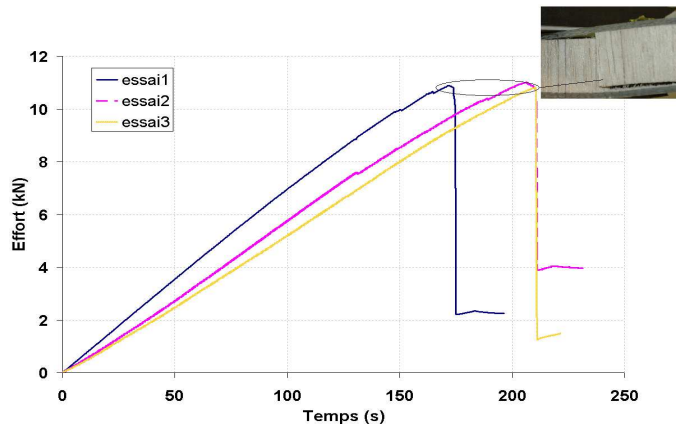


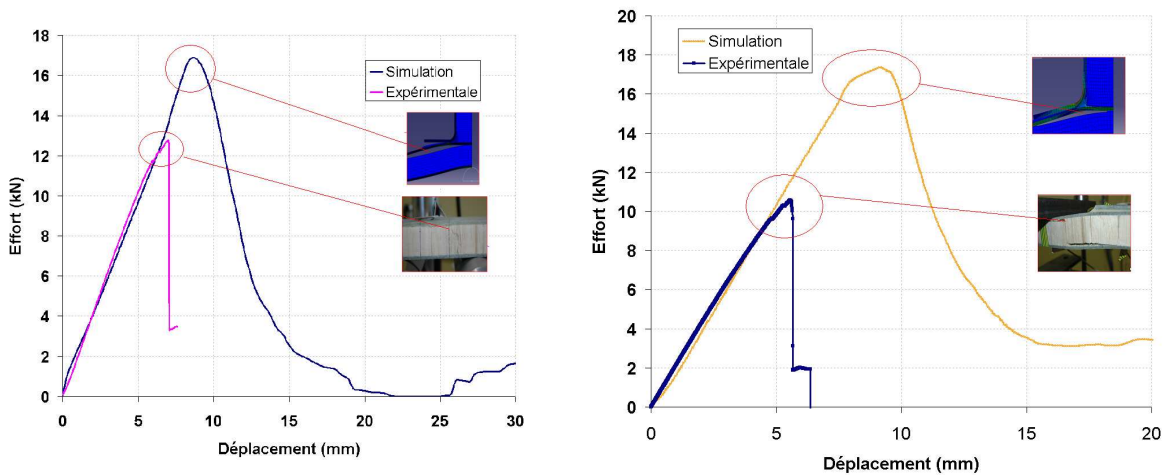
Fig.13. L'effort en fonction de temps Pour les trois essais d'arrachement

Les trois courbes ne sont pas identiques ce qui n'est pas logique surtout le premier essai qui est relativement loin par rapport les deux autres essais. D'après nos analyse et nos observations cette écart peut être vient des défauts dans les pièces testés. L'étape suivante est de valider notre modèle numérique en faisant la comparaison entre les résultats des simulations numérique avec les résultats expérimentaux.

4. Comparaison entre numérique et expérimental

Pour valider n'importe quelle modèle numérique, une méthode courante est utilisée celle de prouver que les résultats numériques obtenues, reproduisent bien les scénarios expérimentaux possibles sous les mêmes conditions appliquées. Pour attendre cet objectif, nous avons essayé de construire un modèle qui prends en compte la maximum des détails que nous pouvons observés au niveau de nos pièces testées et de nos conditions limites.

Dans la figure 14.a, vous pouvez voir une petite comparaison entre numérique et expérimentale sous un chargement de flexion.



(a) essai de flexion

(b) Essai d'arrachement

Fig. 14 : comparaison entre la numérique et expérimentale

En analysant les deux courbes précédentes, nous pouvons dire que la rigidité obtenue numériquement s'approche d'une façon acceptable avec la rigidité obtenue expérimentalement. Les deux courbes montrent un comportement linéaire jusqu'à la rupture finale. La rupture se initie au niveau de l'interface (balsa + peau de sandwich), dans l'expérimentale elle se propage dans le balsa. Nous arrivons à 16,7 kN de chargement numériquement pour 12,5 kN en expérimentale sachant que nous avons 1kN de précharge sur la machine.

Sous un chargement d'arrachement, nous avons fait la même comparaison entre les courbes expérimentales et les courbes de simulations. La pente de la courbe expérimentale s'approche aussi de la pente de la courbe numérique, figure 14.b. Les deux courbes montrent un comportement linéaire jusqu'à la rupture finale. La rupture se initie au niveau de l'interface (balsa + peau de sandwich). La rupture finale se produit sous un chargement de environ 12kN dans l'expérimentale. La simulation nous donne un effort à la rupture qui approche de 17 kN, figure 14.b.

5. Conclusion :

Au sein de ce travail, nous avons testé un raidisseur Ω collé sur un sandwich. Nous avons construit des modèles numériques pour reproduire les certains modes d'endommagement possibles sous des chargements statiques. Ce travail numérique a été suivi par un travail expérimental pour valider nos simulations. Nous pouvons conclure les résultats qu'on a trouvés par les points suivants :

- Le raidisseur 86° montre un niveau de contraintes maximales et une souplesse plus intéressants que les autres raidisseurs testés. Ça te dit un comportement mécanique mieux que les autres raidisseurs en question
- Les simulations avec de l'endommagement mais sans prendre les propriétés de l'interface entre (balsa + peau) en compte montrent que l'endommagement initial se produit en forme de délaminage dans le chapeau. Ensuite, on a eu une séparation entre le remplisseur et le chapeau, et entre le remplisseur et le joint de colle. Et enfin, une séparation entre le joint de colle et la plaque de base se produit avec du délaminage entre les plis dans le sandwich.
- Dans les essais expérimentaux la rupture finale dans les quatre essais se produit au voisinage de 12 (kN) du chargement. sachant que on a eu un comportement linéaire jusqu'à la rupture.
- La rupture finale se produit au niveau de l'interface (balsa, peau) à coté d'un appui et dans le balsa.
- Sur certaines pièces on a des problèmes de symétrie, comme nous avons montré sur certaines jauges.
- Pour comparer les résultats numériques avec les résultats expérimentaux, nous avons utilisé un élément cohésive différent que entre les plis entre la peau du balsa. Nous pouvons voir que notre courbe numérique s'approche de la courbe expérimentale. Nous avons quasiment la même rigidité mais avec une force à la rupture plus élevée pour la simulation que pour l'expérience.

Références

- [1] P Davies, D Choqueuse, B Bigourdan, C Gauthier, Joannic, P Parneix and J L'Hostis, Design, manufacture and testing of stiffened panels for marine structures using adhesively bonded pultruded sections, Infremer Mterials and Structures Group, PlouZané, France
- [2] PASCAI, C.C .CHAMIS, progressive fracture of fibre composite build- up structures, journal of reinforced and composite, vol 16 No2, 1997.
- [3] P. COGNARD, Collage des composite, Secteur de la construction navale, paris, BM 7 630.
- [4] J.I.BLACK, R. A.SHENOI et AL, Strength modelling in stiffened FRP structures with viscoelastic inserts for ocean structures, university of Southampton, 2001, SO17 IBJ, UK.
- [5] Chaitali .R , S. K. SATSANGI, Department of Ocean Engineering , Indian Institute of Technology, Kharagpur, 721302, India
- [6]] O.Eksik, R.A. ShenoI, J.I.R. Blake and H.K. Jeong, School of Engineering Sciences, University of Southampton, Highfield, Southampton S017 1BJ,UK.
- [7] H.J. Phillips, R.A. ShenoI, C.E. Moss , Damage mechanics of top-hat stiffeners used in FRP ship construction Marine Structures 12 (1999) 1}19.