



Définition d'un essai pour analyser le comportement hors plan des assemblages de composites = Definition of a test to analyse the behaviour of composite assemblies under out-of-plane loadings

Laurent Sohier, Jean-Yves Cognard, Peter Davies

► To cite this version:

Laurent Sohier, Jean-Yves Cognard, Peter Davies. Définition d'un essai pour analyser le comportement hors plan des assemblages de composites = Definition of a test to analyse the behaviour of composite assemblies under out-of-plane loadings. Philippe OLIVIER et Jacques LAMON. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. AMAC, 10 p., 2009. <hal-00385215>

HAL Id: hal-00385215

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00385215>

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.

Définition d'un essai pour analyser le comportement hors plan des assemblages de composites

Definition of a test to analyse the behaviour of composite assemblies under out-of-plane loadings

L. Sohier¹, J.Y. Cognard², P.Davies³

1 : Laboratoire Brestois de Mécanique et Systèmes, EA 4325, UBO, 6 avenue Victor Le Gorgeu, 29285, Brest, Cedex
e-mail : Laurent.Sohier@univ-brest.fr

2 : Laboratoire Brestois de Mécanique et Systèmes, EA 4325, ENSIETA, , 2 rue F. Verry, 29806 Brest Cedex 09
e-mail : Jean-Yves.Cognard@ensieta.fr

3 : Service Matériaux et Structures, IFREMER, 29280 Plouzané
e-mail : Peter.Davies@ifremer.fr

Résumé

L'utilisation des assemblages collés s'est considérablement développée ces dernières années et l'exigence d'alléger la masse dans tous les secteurs du transport afin de réduire la consommation d'énergie ne peut mener qu'à plus d'applications. Les matériaux composites sont des éléments clés dans la stratégie de réduction du poids aussi bien dans le cas d'assemblages d'éléments composites que dans le cas de liaisons entre composites et structures métalliques. Il existe peu d'essais standards d'assemblages collés capables de caractériser des assemblages composites. De ce fait, le manque d'essais appropriés peut être considéré comme l'un des facteurs limitant l'utilisation des assemblages collés dans les applications industrielles. Ce papier présente l'utilisation d'un montage Arcan modifié pour déterminer le comportement de composites et d'assemblages de composites sous des chargements radiaux hors plans. Le principal avantage de ce dispositif, utilisant un assemblage hybride collé, est de limiter fortement l'influence des effets de bords.

Abstract

The use of adhesive bonding has developed considerably in recent years and the pressing requirement for lighter weight in all areas of transportation to reduce energy consumption will inevitably result in more applications. Composite materials are a key element in weight reduction strategies, so assembly of composite modules and connections between composite and metallic structures are of great importance. Few of the standard adhesive tests are suitable to characterize such composite assemblies. As a result, the lack of appropriate tests may be considered to be one of the factors currently limiting adhesive bonding for structural applications. This paper describes the use of a modified Arcan test to determine the behaviour of composites and of assemblies of composites under a large range of radial out-of-plane loadings. The key advantage of this fixture, using hybrid bonded assemblies, is to strongly limit the influence of edge effects.

Mots Clés : Composite, Assemblages, Chargements hors plans, Adhésion, Comportement non linéaire, Analyse éléments finis

Keywords : Composite, Out-of-plane loadings, Adhesion, Non-linear behaviour, Finite element analysis

1. Introduction

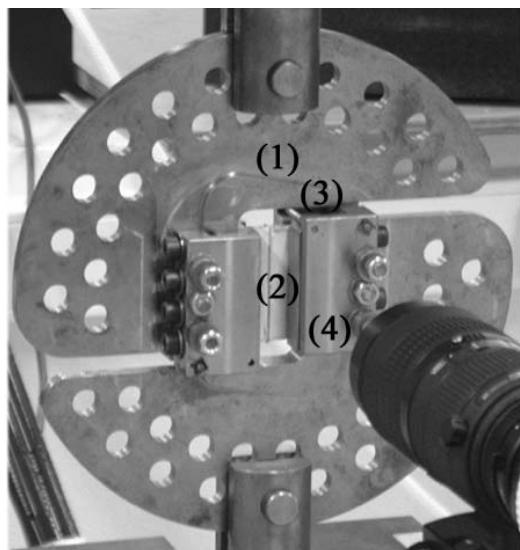
L'utilisation des assemblages collés s'est considérablement développée ces dernières années et l'exigence d'alléger la masse dans tous les secteurs du transport afin de réduire la consommation d'énergie ne peut mener qu'à plus d'applications. Les matériaux composites sont des éléments clés dans la stratégie de réduction du poids aussi bien dans le cas d'assemblages d'éléments composites que dans le cas de liaisons entre composites et structures métalliques. Il existe peu d'essais standard d'assemblages collés capables de caractériser des assemblages composites. De ce fait, le manque d'essais appropriés peut être considéré comme l'un des facteurs limitant l'utilisation des assemblages collés notamment avec les composites [1-2].

L'origine des ruptures d'assemblages collés de composites est souvent associée avec l'initiation d'une fissure dans l'adhésif ou le délaminage de plis composites proches du joint de colle qui peut être induite dans les deux cas, par des effets de bords limitant fortement les charges transmissibles. Par ailleurs, peu de dispositifs expérimentaux sont proposés dans la littérature pour caractériser le comportement mécanique des composites sous chargement hors plan [3]. Ils utilisent souvent des stratifiés épais et différents types d'essais : traction, cisaillement (essais de type IOSIPESCU [4]), traction – cisaillement (essais de type de ARCAN [5]). Mais l'usinage du composite, la géométrie de l'éprouvette, le système de fixation,... peuvent mener à de fortes dispersions au niveau des résultats expérimentaux. Afin d'obtenir des résultats expérimentaux représentatifs d'applications industrielles, il semble intéressant d'utiliser des plaques composites où l'épaisseur est assez faible (1-2mm), lesquelles, d'une part, sont faciles à fabriquer et d'autre part, permettent des sollicitations en traction cisaillement. Afin de respecter ces conditions, un dispositif de type ARCAN, utilisant le collage comme moyen de fixation, est proposé pour analyser le comportement mécanique d'assemblages collés avec des stratifiés et le comportement des composites sous chargement hors plans. Différentes études numériques ont été développées afin d'analyser et d'optimiser la conception d'un tel dispositif (géométrie de la plaque composite, géométrie du substrat, le système de fixation,...). De plus afin d'obtenir des résultats expérimentaux fiables, il est nécessaire de fortement limiter l'influence des effets de bords. Quelques résultats sont présentés pour souligner les possibilités du dispositif expérimental proposé.

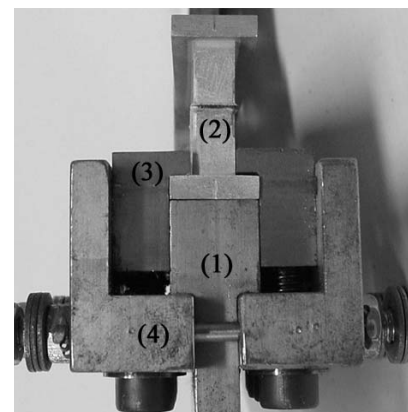
2. Le dispositif expérimental

2.1 Dispositif développé pour l'analyse du comportement non linéaire d'adhésif

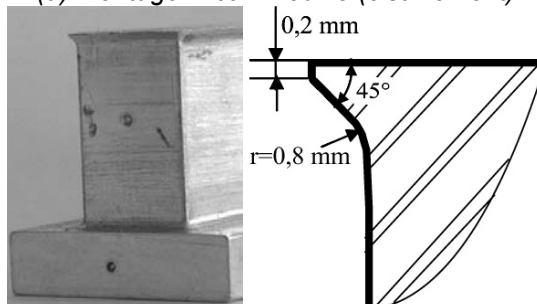
Dans le cadre d'une étude précédente portant sur l'analyse du comportement non linéaire d'adhésifs, un montage de type ARCAN modifié, permettant des sollicitations en compression et traction combiné avec du cisaillement, a été conçu afin de définir une méthodologie expérimentale pour l'étude du comportement d'adhésifs jusqu'à rupture [6].



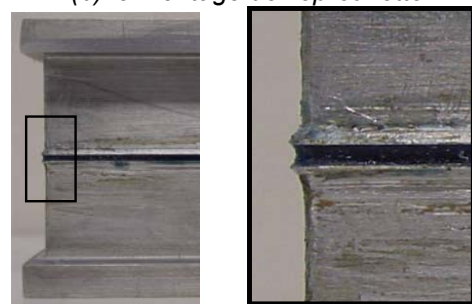
(a) montage Arcan modifié (cisaillement)



1 - support du montage Arcan
2 - substrats collés
3 - système de fixation
4 - support du système de fixation



(c) géométrie des substrats



(d) géométrie de l'assemblage collé

Fig 1 : Le montage ARCAN et la géométrie des substrats avec bec.

Il a été numériquement montré, d'une part, que l'utilisation des becs proches du joint de colle permettait de limiter la contribution des singularités dues aux effets de bords et d'autre part, que la géométrie du bec proche du joint était un paramètre important. Ce montage expérimental a permis, pour des chargements radiaux en traction cisaillement, l'analyse du comportement non linéaire d'un joint de colle [6] et ainsi de développer précisément un modèle numérique pour décrire le comportement non linéaire d'un adhésif dans un assemblage [7].

2.2 Dispositif développé pour l'analyse d'assemblages collés hybrides

2.2.1 Présentation de la procédure expérimentale

Les premiers essais ont été faits en utilisant des assemblages collés hybrides (acier, aluminium et composites) qui ont montré un comportement similaire du film mince de colle en utilisant la procédure proposée [6]. Différentes études ont montré que de grandes singularités de contraintes, associées aux effets de bord, peuvent exister pour des structures en bi-matériaux. Spécialement, pour les assemblages collés avec des composites, ces effets peuvent fortement limiter le chargement transmis. En fait, d'une part, l'interface adhésive composite peut avoir une influence sur la résistance de l'assemblage et d'autre part, il est difficile d'analyser expérimentalement le comportement des stratifiés sous chargement hors plan [5].

Le dispositif proposé pour analyser le comportement d'assemblages hybrides comprenant un stratifié peu épais est présenté en figure 2. Une plaque composite est assemblée entre deux substrats métalliques. La surface collée est de 65x10mm² et une fixation par collage est utilisée afin d'obtenir une bonne qualité géométrique de l'éprouvette.

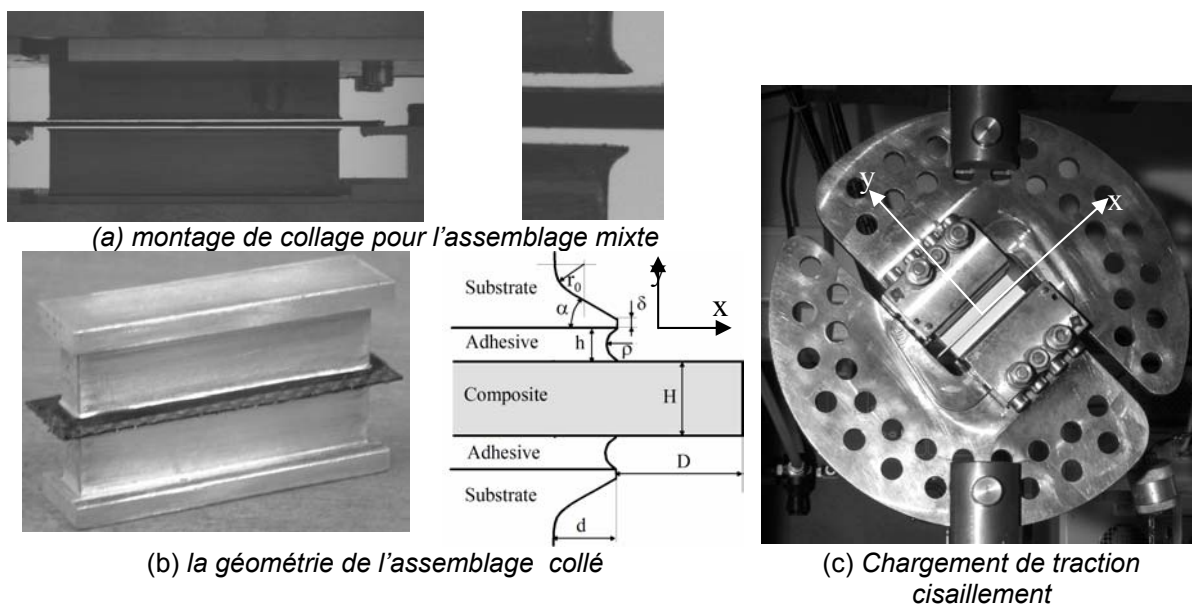


Fig 2 : Le dispositif expérimental avec l'assemblage hybride.

2.2.2 Les paramètres du modèle numérique

La procédure expérimentale, basée sur le dispositif Arcan modifié, peut être utilisée afin d'analyser le comportement d'un assemblage métal-adhésif-composite-adhésif-métal. Afin d'analyser les possibilités et d'optimiser un tel dispositif expérimental, une analyse précise de la distribution des contraintes suivant l'épaisseur du joint de colle et suivant l'épaisseur du stratifié, est nécessaire. De nombreux calculs sous chargement 2D ont été menés en utilisant un nombre d'éléments important afin d'obtenir une approximation précise de l'influence des effets de bords. Pour l'adhésif et le composite, 20 éléments linéaires ont été utilisés pour une épaisseur de 0,1mm. Pour cette étude des composites unidirectionnels carbone/époxy sont utilisés (fibres dans la direction x, figure 2) ; en effet, ils permettent l'utilisation de modèles orthotropes ($E_x=110$ GPa, $E_y=6,5$ GPa, $G_{xy}=6,5$ GPa, $\nu = 0,32$) et la limite élastique utilisée est telle que :

$$\left(\frac{\sigma_{XX}}{T_C}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{YY}}{S_C}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{XY}}{R_C}\right)^2 = 1 \quad \text{Avec } R_C = 52 \text{ MPa, } S_C = 16 \text{ MPa, } T_C = 1600 \text{ MPa}$$

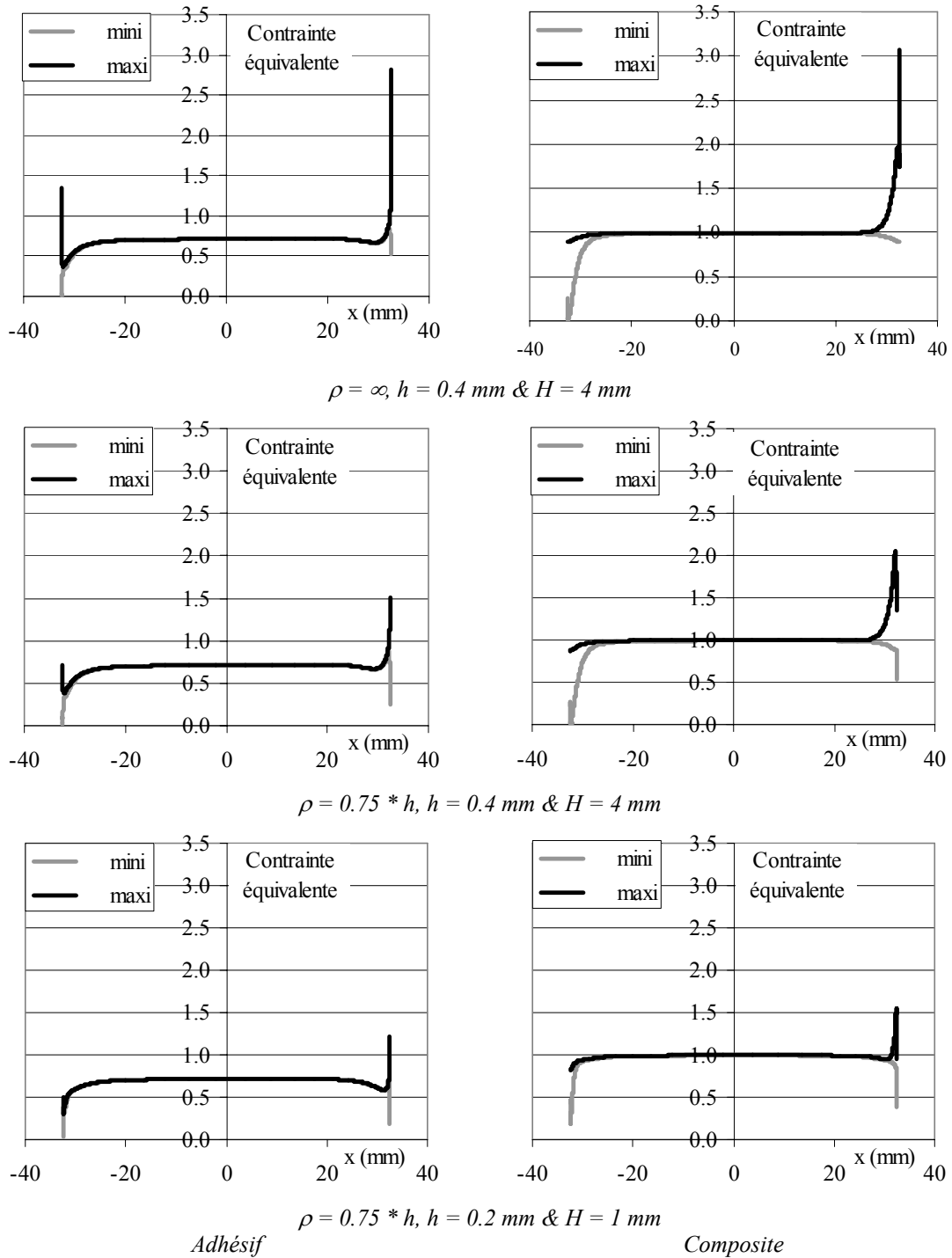


Fig 3 : Evolution de la contrainte équivalente de l'adhésif et du composite sous un chargement de traction - cisaillement (substrats sans bec pour $d=0$ et $D=0$).

Le comportement de l'adhésif est supposé être isotrope ($E_j = 2.0 \text{ GPa}, \nu_j = 0,3$) et la limite élastique a été identifiée pour des chargements en traction – cisaillement [6-7] et proposée sous la forme suivante :

$$\frac{\sigma_{xy}^2}{R_j^2} + \frac{\sigma_{yy}^2}{S_j^2} = 1 \quad \text{avec } R_j = 25 \text{ MPa and } S_j = 40 \text{ MPa}$$

2.2.3 Les résultats numériques

La figure 3 présente l'évolution de la contrainte équivalente en fonction de l'abscisse x ($x \in [-32.5; 32.5$

mm], figure 2) suivant l'épaisseur de l'adhésif et suivant l'épaisseur du stratifié pour un chargement de traction - cisaillement (la traction suivant la direction normale au plan moyen du composite est égale au chargement en cisaillement). Afin de faciliter l'analyse des résultats, seules les valeurs minimales et maximales sont présentées en figure 3. Pour toutes ces simulations, des substrats en aluminium sans bec ($d = 0$, figure 2) et une plaque composite ayant les mêmes dimensions que le substrat ($D = 0$) sont utilisées. Deux géométries du bord libre du joint de colle sont utilisées : un bord droit ($\rho = \infty$) et un joint présentant un rayon de courbure obtenu lors du nettoyage ($\rho = 0.75 * h$). Comme les simulations sont calculées pour un comportement élastique des différents matériaux, il est possible de normaliser les résultats afin de rendre plus simple l'analyse; ainsi la contrainte équivalente est normalisée à 1 au centre du stratifié. Les résultats montrent qu'un gradient de contrainte existe aux extrémités de l'adhésif et du composite. Le nettoyage des bords libres et la réduction de l'épaisseur du joint de colle ainsi que du stratifié réduit l'influence des effets de bord.

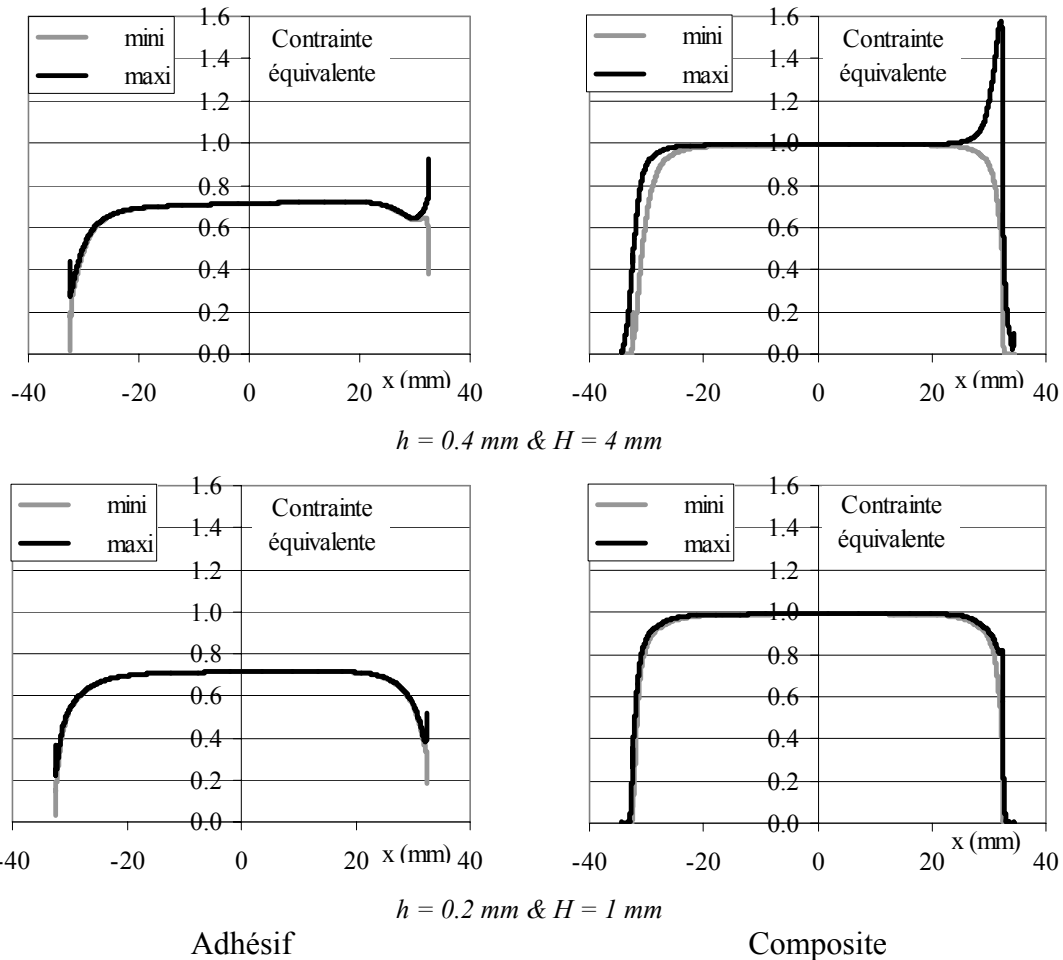


Fig 4 : Evolution de la contrainte équivalente de l'adhésif et du composite sous un chargement en traction-cisaillement (substrats avec bec ; stratifié avec $D=2mm$).

Afin de limiter fortement les concentrations de contraintes à la périphérie de la partie utile des éprouvettes, deux modifications de la géométrie de l'assemblage collé, sont proposées : l'usinage de becs sur les substrats ($\alpha = 45^\circ$, $r_0 = 0.8$ mm et $d = 0.5$ mm, figure 2) [6] et l'utilisation d'une plaque composite plus large que le substrat ($D = 2$ mm) afin de limiter l'influence de l'usinage du stratifié [8]. Les résultats présentés en figure 4, montre que l'utilisation d'un joint de colle de faible épaisseur associé à un stratifié fin permet de définir un dispositif expérimental fiable. Un dispositif qui localise l'état des contraintes maximales au centre de la partie utile de l'éprouvette permet de limiter l'influence de l'usinage. Il est important de noter que pour un chargement en traction cisaillement, la « limite élastique » est atteinte en premier dans le composite. Une optimisation du choix de la colle doit être faite, spécialement pour des chargements dont la composante tangentielle est importante ; la résistance sous cisaillement du composite peut être plus importante que celle des adhésifs actuellement disponibles, même avec l'utilisation de films de colle de faible épaisseur sous pression.

3. Les résultats expérimentaux

3.1 Essais de validation

Un composite UD carbone époxy, de qualité moyenne, a été utilisé pour valider l'essai proposé. Un joint de colle d'épaisseur 0,2mm a été assuré pour limiter les effets de bords. Nous notons par DN et DT les déplacements relatifs des deux substrats suivant les directions normale et tangentielle par rapport au plan moyen de la plaque composite. Ils sont obtenus par corrélation d'images. De même, FN et FT sont les composantes des efforts appliqués définis comme les déplacements. La figure 5 présente un résultat expérimental pour un chargement proportionnel en traction - cisaillement avec des ruptures dans le composite au niveau de l'interface fibre matrice. Un essai où la plaque composite est remplacée par une plaque aluminium de même surface et d'épaisseur presque identique, indique qu'il doit être possible, en plus de déterminer la charge à rupture et donc d'analyser les contraintes dans les plis, d'estimer la déformation de la plaque composite. La figure 6 montre un résultat similaire pour un essai de traction avec une rupture de même nature.

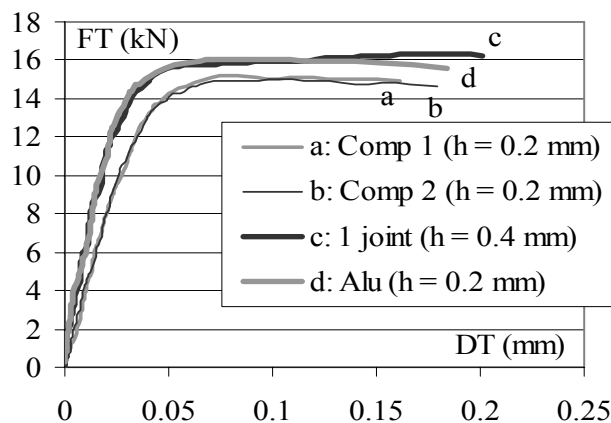


Fig 5 : Résultats expérimentaux pour un chargement en traction-cisaillement ($\theta(\vec{X}, \vec{Y}) = 45^\circ$, Fig 2-c)

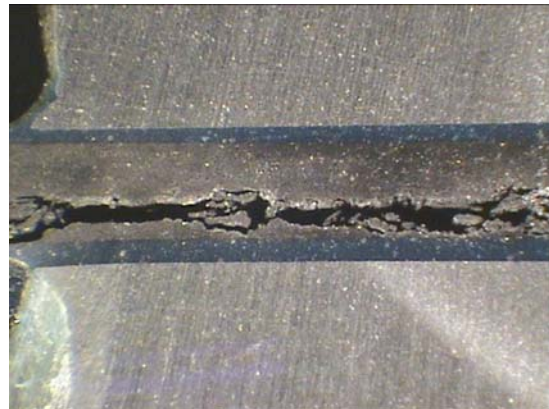
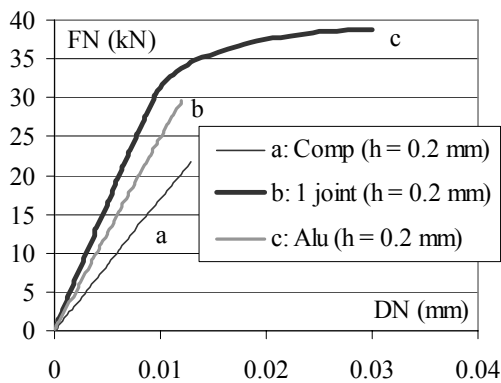


Fig 6 : Résultats expérimentaux pour un chargement en traction 0° - la photo montre une section de l'éprouvette avec la rupture dans le composite

3.2 Analyse de l'influence des tissus de délaminage sur le comportement

Dans le cadre d'applications dans le domaine du nautisme, nous avons analysé l'influence de tissus de délaminage pour des collages mixtes composite - aluminium avec deux composites A et B, (Tab 1). L'autre intérêt de l'étude portait sur l'obligation d'insérer un pli ou un tissu en verre de façon à neutraliser l'effet diélectrique entre l'aluminium et le carbone et donc de comparer les résultats. La Figure 7 présente des résultats pour une sollicitation de traction - cisaillement.

V : verre preg Taffetas M10/43%/664/300grm2
 C : carbone préég EQ 48286/M10/42%/T700-12K/285grm2
 Cuisson à 100°C pendant 6 heures

couche n°	A		B	
	Nature.	Angle	Nature.	Angle
1	V	+/-45°	C	+/-45°
2	C	+/-45°	C	+/-45°
3	C	+/-45°	C	+/-45°
4	C	+/-45°	C	+/-45°
5	V	+/-45°	C	+/-45°

Tab 1. Définition des composites A et B

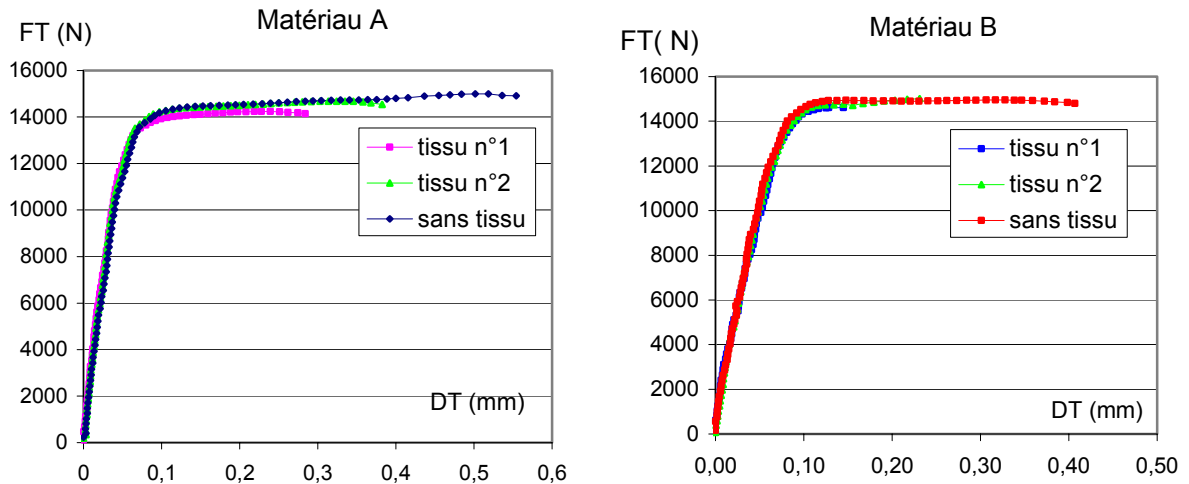


Fig 7 : Influence de tissus de délaminage

Indépendamment des matériaux, les ruptures avec les tissus sont localisées à l'interface entre le tissu et l'adhésif et sinon au niveau du premier pli. Concernant la résistance, le niveau de rupture est comparable pour les deux matériaux et l'utilisation des tissus, même si l'on observe quelques différences, n'est pas fondamentalement remis en cause vu son intérêt lors de la procédure de collage et le gain de temps obtenu.

3.3 Comparaison de différents composites sous sollicitations normales

Dans le cadre d'une étude qui se situe dans le domaine du nautisme de compétition, où l'on recherche à optimiser le poids et la résistance, nous avons testé en traction (dans la direction normale au plan moyen de la plaque composite) différents matériaux (toujours des plaques fines), fabriqués en même temps, sous autoclave et entre deux marbres pour avoir les mêmes caractéristiques d'adhésion sur les deux faces, Tab 2. La présence de solutions utilisant un tissu verre à l'interface de collage est encore liée au problème diélectrique entre le carbone et l'aluminium. La qualité des matériaux est bien améliorée en raison des conditions de fabrication (autoclave). Les conditions de collage sont celles définies précédemment avec une épaisseur totale du joint de colle de l'ordre du 1/10^{ème} de mm pour augmenter les résistances mécaniques. Le déplacement relatif DN des substrats est mesuré avec un extensomètre pour obtenir une précision suffisante. DN prend en compte la déformation des deux joints de colle ainsi que celle du composite.

V : verre pregsatin 1454/49%/300grm2
 C1 : carbone préG0803/M10/42%/3K/285grm2
 C2 : carbone préGUD/M40J/R367-2/38%/300grm2

couche n°	A		B		C		D		E	
	Nature	Angle	Nature	Angle	Nature	Angle	Nature	Angle	Nature	Angle
1	V	+/-45°	V	+/-45°	V	+/-45°	C1	+/-45°	C2	0°
2	C1	+/-45°	C2	0°	C2	0°	C1	+/-45°	C2	0°
3	C1	+/-45°	C2	90°	C2	0°	C1	+/-45°	C2	0°
4	C1	+/-45°	C2	90°	C2	0°	C1	+/-45°	C2	0°
5	V	+/-45°	C2	0°	C2	0°	C1	+/-45°	C2	0°

6		V	+/-45°	V	+/-45°			C2	0°
épaisseur	1.64 mm	1.96 mm		1.94 mm		1.64 mm		1.90 mm	

Tab 2. Définition des stratifiés

La figure 8 montre une synthèse des résultats. Pour chaque matériau, en moyenne, 3 à 4 essais ont été effectués avec systématiquement une rupture du composite. Nous notons que pour certains matériaux C et E des dispersions importantes sans doute induites par la présence des plis à 0°. Nous avons des ruptures au niveau de l'interface fibre matrice pour les matériaux B, C et E, Fig 9 et des ruptures par délaminage pour les matériaux A et D, Fig 9. Les matériaux A et D sont visiblement les plus performants (résistance/poids). Le fait d'être entièrement constitué à partir de tissus améliore la résistance hors plan du stratifié.

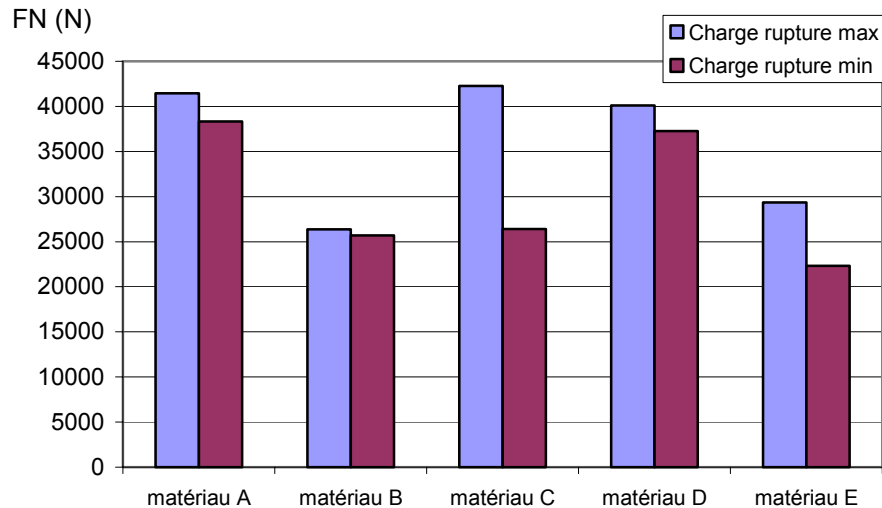


Fig 8 : capacité de résistance en traction des différents matériaux

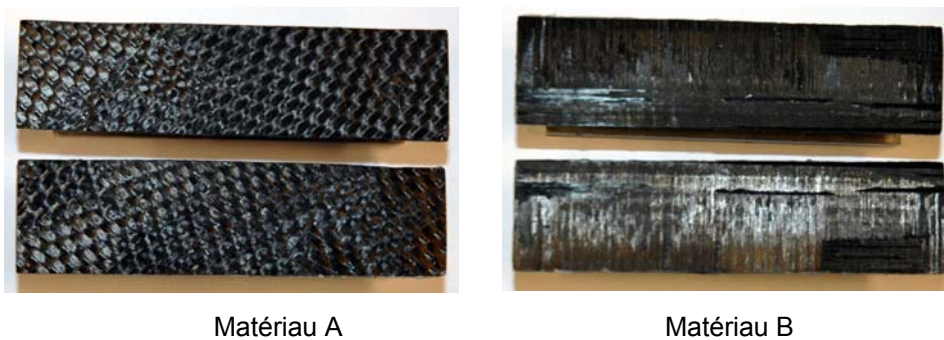


Fig 9 : faciès de rupture

La figure 10 montre l'évolution des déplacements DN en fonction du chargement pour deux des matériaux testés. D'une part, l'allure est parfaitement répétitive. Seule la charge à rupture évolue quelques peu. La non linéarité est la conséquence du comportement des deux joints de colle. Néanmoins comme le montre la figure 11, le choix de l'adhésif ainsi que sa mise en œuvre doit être défini afin que la capacité de résistance de la colle soit supérieure à celui du stratifié. De plus, nous avons systématiquement, comme pour l'étude du paragraphe 3,1, testé le comportement des stratifiés, le comportement de plaques aluminium remplaçant la plaque en composite, et celui d'assemblages uniquement formés d'un joint de colle. Le comportement des substrats est mesuré à l'aide de jauges de déformation dans la zone où est placé le capteur. La figure 11 montre que nous sommes capables de bien d'identifier le comportement de chaque éléments et interfaces constituant l'assemblage.

Ces résultats montrent que le système d'essais proposé est capable d'analyser, à l'aide d'un d'assemblages hybrides, le comportement de composites sous des chargements de type traction – cisaillement et ceci avec suffisamment de sensibilité. Le système expérimental permet d'une part, pour l'assemblage collé, d'optimiser le composite (nature, orientation des plis,..). D'autre part, avec une procédure d'identification inverse, similaire à celle mise en œuvre lors de l'analyse du comportement non linéaire de

l'adhésif [6], le dispositif doit permettre l'étude de mécanismes d'endommagement et de rupture du composite, sous sollicitations hors plans. D'autres résultats peuvent être trouvés en [9].

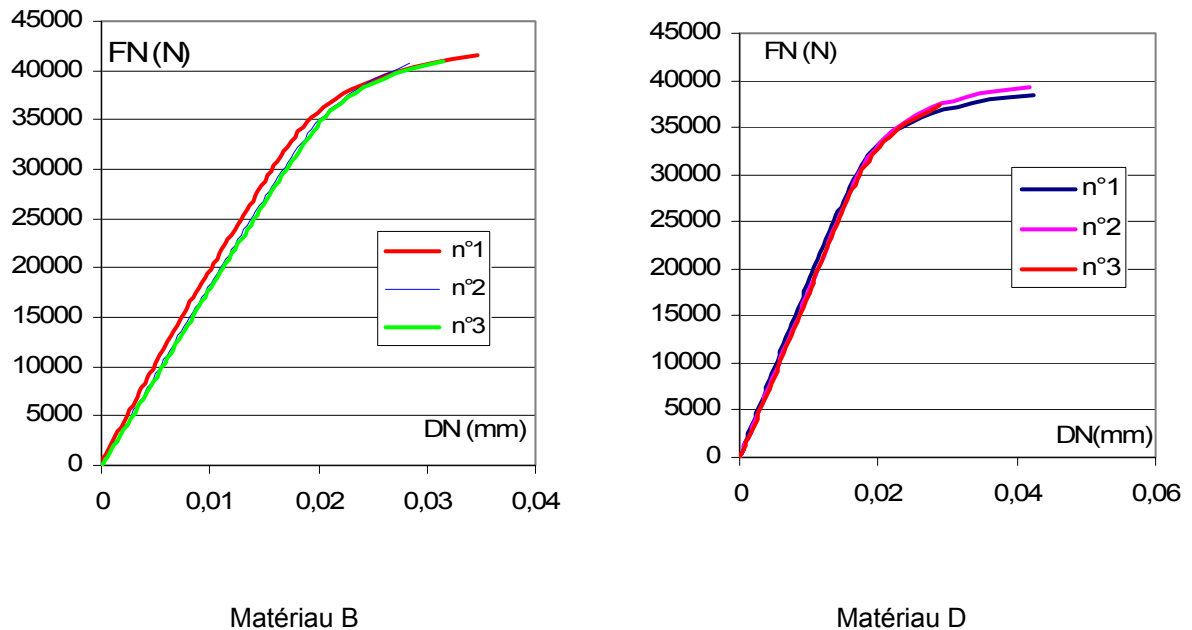


Fig 10 : analyse de différents composites

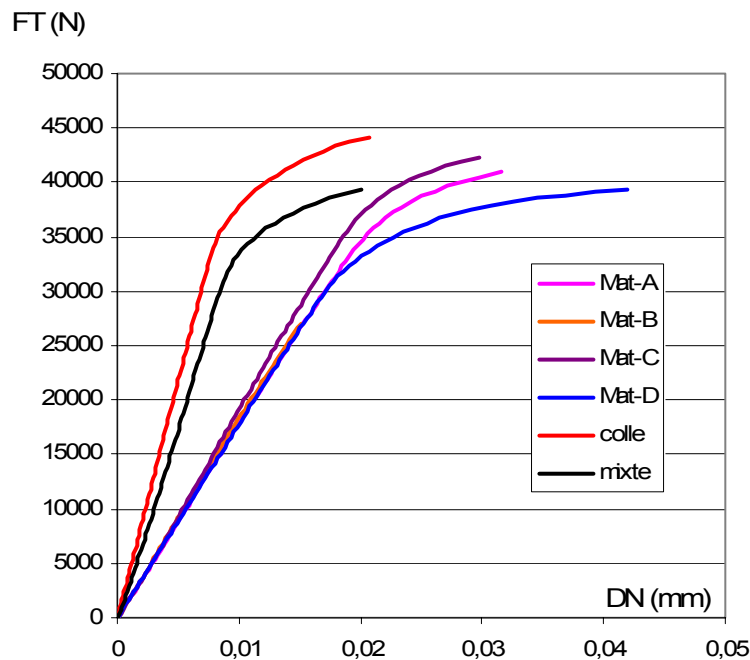


Fig 11 : comparaison des comportements des différents matériaux

4. Conclusion

Les résultats numériques et expérimentaux indiquent que le montage Arcan modifié permet d'analyser le comportement d'assemblages collés hybrides (aluminium-adhésif-composite-adhésif-aluminium) si certaines conditions sont respectées; limiter l'influence des effets de bords avec des plaques fines, des substrats avec becs, un joint de colle de faible épaisseur nettoyé si possible. Cet essai permet d'analyser en premier lieu le comportement mécanique des assemblages collés hybrides avec composites et dans un deuxième temps, le comportement des composites sous chargements hors plan de traction cisaillement.

Cela nécessite d'optimiser le choix de la colle en fonction de la résistance souhaitée, de la température de cuisson du collage qui doit rester inférieure au TG de la résine du composite au risque de modifier ou de déformer le stratifié. Une optimisation du choix de l'adhésif doit être réalisée, en particulier pour les chargements de cisaillement ; en effet, pour une sollicitation de cisaillement, la résistance du composite peut être supérieure à celle de l'adhésif. Il reste que pour le cas d'une sollicitation en cisaillement, pour un stratifié UD sollicité suivant le sens des fibres, nous ne pourrions pas le casser. Les résultats expérimentaux montrent que les caractéristiques des différents plis (fibres leurs orientations, la nature du tissage,...), la préparation des surfaces ont toutes une influence sur la résistance de l'assemblage. Le dispositif proposé permet donc d'optimiser la résistance des composites pour les assemblages collés et d'analyser l'influence de renforts (par exemple de type z-pins) sur le comportement du composite sous sollicitations hors plan. Pour caractériser l'évolution de l'endommagement du composite sous chargements hors plan, des techniques de mesures sont en cours de développement, en particulier pour permettre l'analyse de très faibles déplacements associés à la dégradation du composite. De plus, des techniques d'identifications inverses doivent être développées pour prendre en compte le comportement non linéaire de l'adhésif [7] et du composite [7], du fait que l'état de contrainte n'est pas homogène pour l'essai de type Arcan proposé.

Références

- [1] Voloshin A., Arcan M., "Failure of unidirectional fiber-reinforced materials – New methodology and results", *Experimental Mechanics*, Vol. 20, pp.280-284, 1980.
- [2] J. Pei, R. A. Shenoi. Examination of key aspects defining the performance characteristics of out-of-plane joints in FRP marine structures. *Composites: Part A*, 27A, pp. 89- 103, 1996.
- [3] ASTM International, *The composite materials handbook MIL17*, vol 1, 2004
- [4] A. Chan, W.K. Chiu, X.L. Liu. Determining the elastic interlaminar shear modulus of composite laminates. *Composite Structures*, Vol. 80, pp. 396–408, 2007.
- [5] S.C. Hung, K.M. Liechti. Finite element analysis of the Arcan specimen for fiber reinforced composites under pure shear and biaxial loading. *J. Comp. Materials*, Vol. 33, pp. 1288-1317, 1999.
- [6] Cognard J.Y., Davies P., Sohier L., Créac'hcadec R., "A study of the non-linear behaviour of adhesively-bonded composite assemblies", *Composite Structures*, Vol. 76, pp. 34-46, 2006
- [7] Créac'hcadec R., Cognard J.Y., "2D modeling of the behavior of an adhesive in an assembly using a non-associated elasto-visco-plastic model", *Journal of Adhesion*, 2009
- [8] Weaver J. H., Yang J., Evans A. G., Zok F. W., "A modified test for measuring the interlaminar tensile strength of fiber-reinforced ceramic composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 68, pp. 10-16, 2008.
- [9] Cognard J.Y., Davies P., Sohier L., "Advances in Testing Adhesively Bonded Composites", *Advances in structural adhesive bonding*, D.A. Dillard, Woodhead Publishing Limited Abington Hall, Cambridge, 2009 (accepted for publication).