

# Etude du comportement d'une colle dans un assemblage : comparaison de différents essais

M. Bourgeois<sup>a</sup>, L. Sohier<sup>b</sup>, R. Créac'hcadec<sup>c</sup>, J.Y. Cognard<sup>c</sup>

a. DGA/DET/CEP/MC/TCM, Comportement Mécanique et Simulation, 16 b av. P. Côte d'Or, 94114 Arcueil

b. Laboratoire Brestois de Mécanique et des Systèmes, IUP, Univ. Brest, 6 Av. Le Gorgeu, 29285 Brest

c. Laboratoire Brestois de Mécanique et des Systèmes, ENSIETA, 2 rue F. Verny, 29806 Brest Cedex 9

## Résumé :

*L'utilisation du collage structural est souvent limitée par un manque de données fiables sur le comportement non linéaire de l'adhésif au sein d'un assemblage. En effet les analyses des essais expérimentaux sont souvent difficiles du fait de la présence de fortes singularités. La comparaison des résultats de différents essais, dont certains permettent de limiter fortement les effets de bord, est présentée pour une colle. L'obtention de résultats expérimentaux fiables permet de contribuer à l'optimisation des assemblages collés.*

## Abstract :

*The use of bonded joints is often limited by a lack of reliable experimental data on the non-linear behaviour of an adhesive in an assembly. Indeed analyses of experimental tests can be particularly made difficult by stress singularities due to edge effects. Comparisons between results of different experimental devices, some of them designed to strongly limit the edge effects, are presented for an adhesive. Obtaining reliable experimental results makes it possible to contribute to optimization of adhesive bonded joints.*

**Mots clefs :** assemblages collés, comportement non-linéaire, essais, effets de bords, modélisation

## 1 Introduction

Cette étude se situe dans le cadre de la recherche de gains de performance de structures par l'utilisation d'assemblages collés. Ces assemblages offrent de nombreux avantages, mais un manque de confiance des bureaux d'études limite aujourd'hui l'utilisation de cette technologie [1]. La mise en place d'un outil de simulation prévisionnel pour ces assemblages nécessite une caractérisation complète du comportement non-linéaire de l'adhésif dans un assemblage. L'analyse du comportement de l'adhésif à partir d'essais sur éprouvettes massives ne semble pas être suffisant [2, 3], sachant que ce type d'essais ne prend pas en compte l'interface adhésif-substrat. Différentes études ont montré que les essais de type simple recouvrement, souvent utilisés, génèrent un état de sollicitation complexe dans l'adhésif avec des concentrations de contraintes aux extrémités du joint de colle ; leur analyse est ainsi relativement complexe [4]. Plusieurs études numériques montrent l'influence des effets de bords dans les assemblages collés [5]. En particulier, pour les essais de type simple recouvrement, différentes solutions ont été proposées pour limiter l'influence de ces effets [6] ; mais les concentrations de contraintes peuvent avoir une influence sur l'analyse du comportement de la colle [7, 8]. Différentes études soulignent également le comportement complexe de la colle dans un assemblage [9, 10]. Le développement de modèles de comportement pour les adhésifs dans un assemblage nécessitent souvent l'utilisation d'une fonction seuil spécifique pour prendre en compte l'influence de la pression hydrostatique [8, 10]. Ainsi, une large base de données expérimentales pour des sollicitations de traction-cisaillement est nécessaire pour caractériser correctement le comportement de l'adhésif. De plus, la liaison adhésif-substrat peut jouer un rôle important dans la résistance d'un assemblage collé (influence de la préparation de surface, ...).

Pour obtenir des résultats expérimentaux fiables, il est nécessaire d'utiliser des dispositifs expérimentaux permettant de fortement limiter l'influence des effets de bords et des défauts de fabrication des éprouvettes et de positionnement lors des essais pour réduire les dispersions. La comparaison des résultats de différents essais, dont certains permettent de limiter fortement les effets de bord [11], est présentée pour une colle.

Les résultats d'essais présentés dans ce papier ont été obtenus à partir d'une colle à base époxy STRUCTIL. Les contraintes ont été normalisées pour des raisons de confidentialité. Cette normalisation n'a pas d'influence sur la comparaison des résultats des différents essais. Les essais ont été réalisés avec une vitesse de chargement de l'ordre de 0.5 mm/min.

## 2 Essai sur éprouvettes massives

Dans cette partie nous présentons les résultats d'essais de traction et de compression en utilisant des éprouvettes massives. Il existe d'autres essais sur éprouvettes massives, en particulier des essais de torsion sur tubes [2]. La figure 1 présente les différentes éprouvettes utilisées. Lors de ces essais, les déplacements ont été mesurés à l'aide d'un extensomètre optique. Pour les essais de traction, sur éprouvettes de faible épaisseur, une localisation des déformations est souvent observée près d'un défaut et ceci limite le domaine d'analyse de ce type d'essais. Pour les essais de compression, une déformation de l'éprouvette en forme de "tonneau", associée aux conditions aux limites imposées par les plateaux (frottement), est observée ; ainsi l'état de sollicitation n'est plus uniaxial.

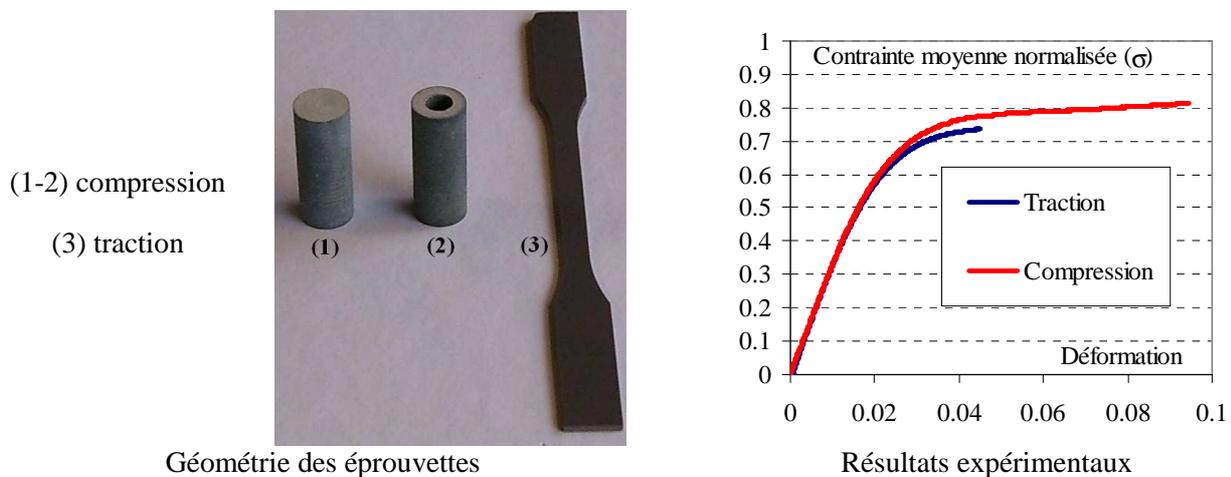


FIG. 1 – Essais de traction et compression avec éprouvettes massives.

## 3 Essai de torsion sur éprouvettes tubulaires collées bout à bout

Les essais de torsion sur des éprouvettes tubulaires collées bout à bout permettent de déterminer le comportement en cisaillement des adhésifs in-situ [12, 13]. Le rayon extérieur des éprouvettes tubulaires est de 15 mm et l'épaisseur du tube est de 3 mm (figure 2).

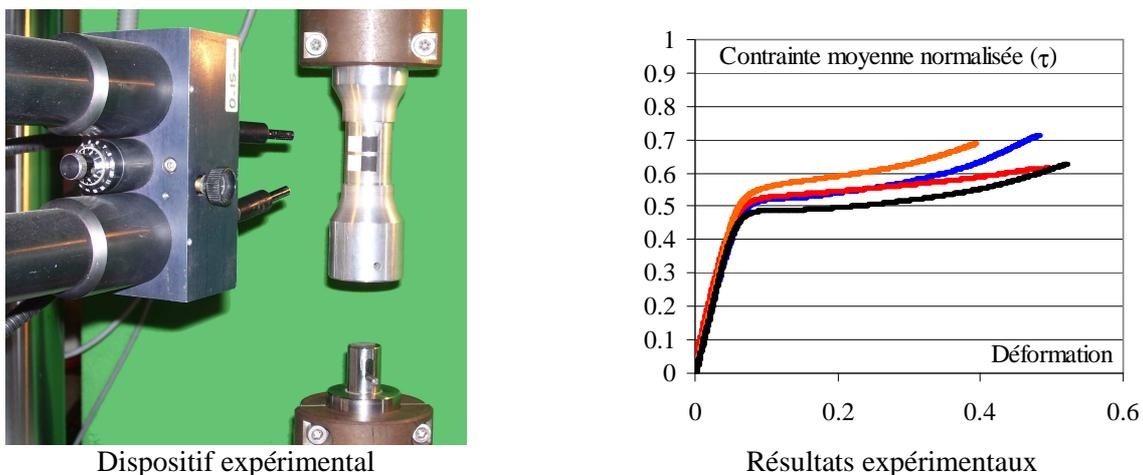


FIG. 2 – Essai de torsion sur éprouvettes tubulaires collées bout à bout.

Cette géométrie d'éprouvette présente les avantages de fortement limiter les effets de bords et d'obtenir un cisaillement pur de l'adhésif sous certaines hypothèses. Le montage utilisé pour le collage des deux demi éprouvettes permet d'aligner précisément les deux parties tubulaires et de contrôler l'épaisseur du joint. L'éprouvette est disposée dans une machine de traction-torsion MTS par le biais d'un système d'accrochage

limitant l'influence des chargements parasites. Les essais ont été réalisés pour une épaisseur de joint de colle de 0.2 mm (figure 2). Concernant la préparation des surfaces de collage de l'éprouvette, celles-ci sont sablées et dégraissées. Pour les calculs de la déformation et de la contrainte de cisaillement, on considère que la largeur du joint est suffisamment faible pour que ces grandeurs puissent être considérées uniformes dans la direction radiale. Le déplacement relatif des substrats est mesuré grâce à un dispositif extensométrique optique de marque ZIMMER dont on déduit la déformation imposée au joint de colle en prenant soin de faire la correction d'éprouvette blanche. En prenant des précautions lors de la mise en œuvre de cet essai, la dispersion sur les résultats est assez faible. De plus, une déformation importante du joint de colle est observée, contrairement aux essais de traction ou compression sur éprouvettes massives; il semble que l'action des substrats sur l'adhésif est bénéfique et limite l'influence des défauts dans le joint de colle.

#### 4 Essai de cisaillement

L'essai TAST permet d'analyser le comportement d'un joint de colle dans un assemblage sollicité en cisaillement (ASTM D5656-95). Cet essai est d'une mise en œuvre relativement facile à partir d'une machine de traction, mais il a été montré que la présence d'effets de bords importants pouvait avoir une influence sur l'analyse des résultats expérimentaux [7].

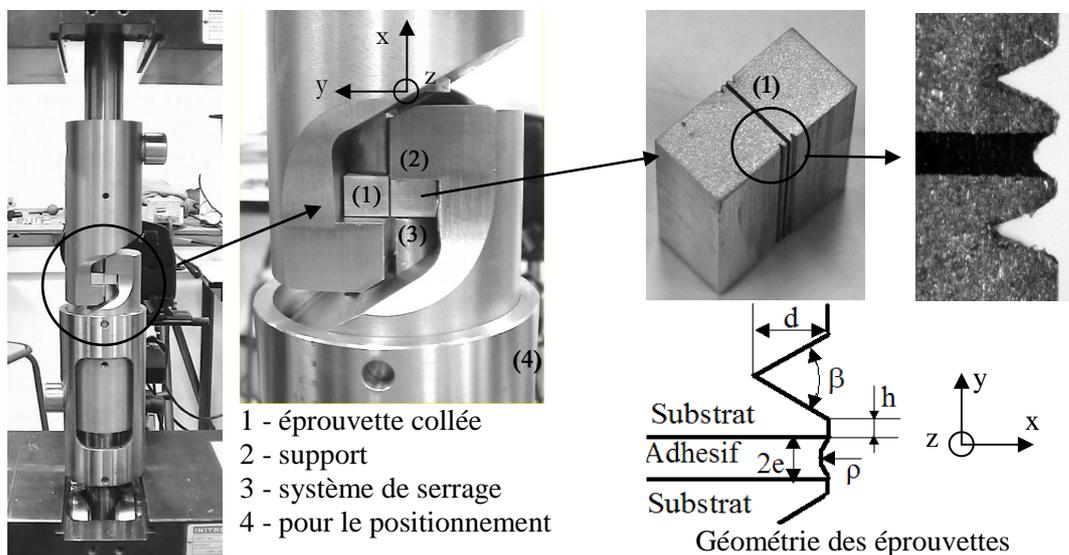


FIG. 3 – Montage TAST Modifié pour les essais de cisaillement.

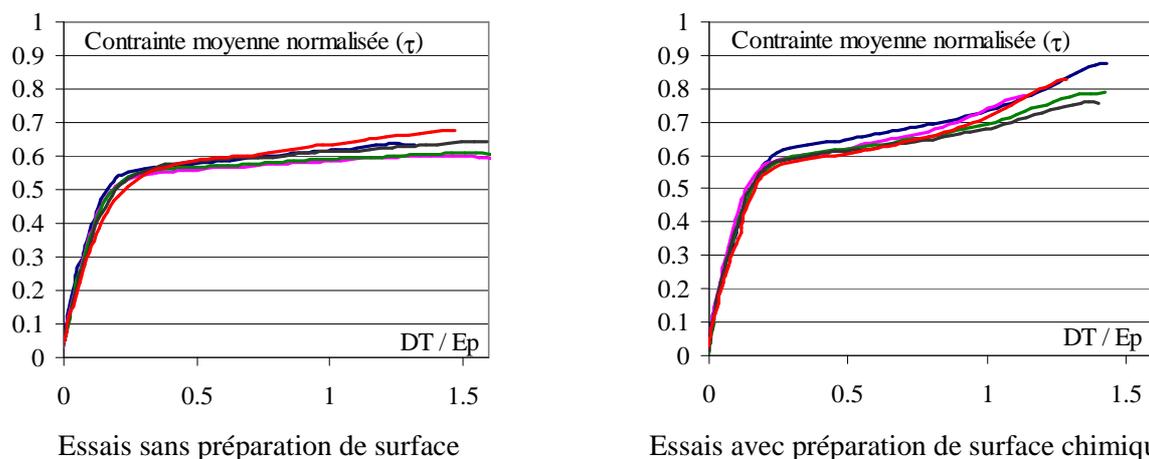


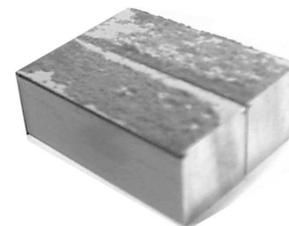
FIG. 4 – Essais de cisaillement avec le montage TAST Modifié.

Ainsi pour obtenir des résultats expérimentaux plus « fiables » sur le comportement de la colle sous des sollicitations de cisaillement, un montage TAST modifié a été proposé (figure 3). Pour limiter les effets de bords des becs sont d'une part usinés dans les substrats, proche de la surface de collage, et d'autre part un support rigide a été proposé pour limiter l'influence de la flexion du montage [7]. De plus, un avantage supplémentaire de cet essai est associé aux petites dimensions des éprouvettes collées utilisées : la

section nominale du plan moyen du joint de colle est de  $Sc = 10 \times 25\text{mm}^2$  et les substrats ont une hauteur de 10 mm. Les premiers résultats obtenus à partir d'un dispositif prototype sont prometteurs. De plus, ce dispositif est bien adapté à l'étude de l'influence du vieillissement de colle ; en effet, il utilise des petits échantillons pouvant être découpés facilement dans des plaques collées ayant été exposées à un vieillissement. Pour cet essai, le déplacement relatif des substrats est analysé par corrélation d'images permettant ainsi d'obtenir une information sur la déformation du joint de colle ( $DT/Ep$ ),  $DT$  représente le déplacement relatif des deux extrémités du joint de colle et  $Ep$  représente l'épaisseur du joint de colle. La figure 4 présente des résultats pour la colle considérée en utilisant la contrainte moyenne pour simplifier la présentation ; les essais ont été réalisés avec une épaisseur du joint de colle de 0,2 mm. Il est important de noter que pour cette colle, l'utilisation d'un traitement de surface chimique (réalisé par STRUCTIL) permet d'augmenter la résistance de l'assemblage collé pour des substrats en aluminium. La figure 5 présente les éprouvettes après rupture et souligne bien l'influence de la préparation de surface sur le mode de rupture de la colle. La caractérisation mécanique d'un assemblage collé inclut le comportement de la colle et le comportement de l'interface colle-substrat.



Essais sans préparation de surface



Essais avec préparation de surface chimique

FIG. 5 – Essais de cisaillement avec le montage TAST Modifié – éprouvette après rupture.

## 5 Essai de traction-cisaillement

Pour caractériser le comportement d'une colle dans un assemblage jusqu'à rupture, en prenant en compte l'influence de la contrainte normale et de la contrainte de cisaillement, un dispositif de type Arcan a été développé [10]. Le dispositif proposé (figure 6) permet de limiter fortement les effets de bord par l'utilisation de becs et de maîtriser la répartition des contraintes dans le joint de colle [11].

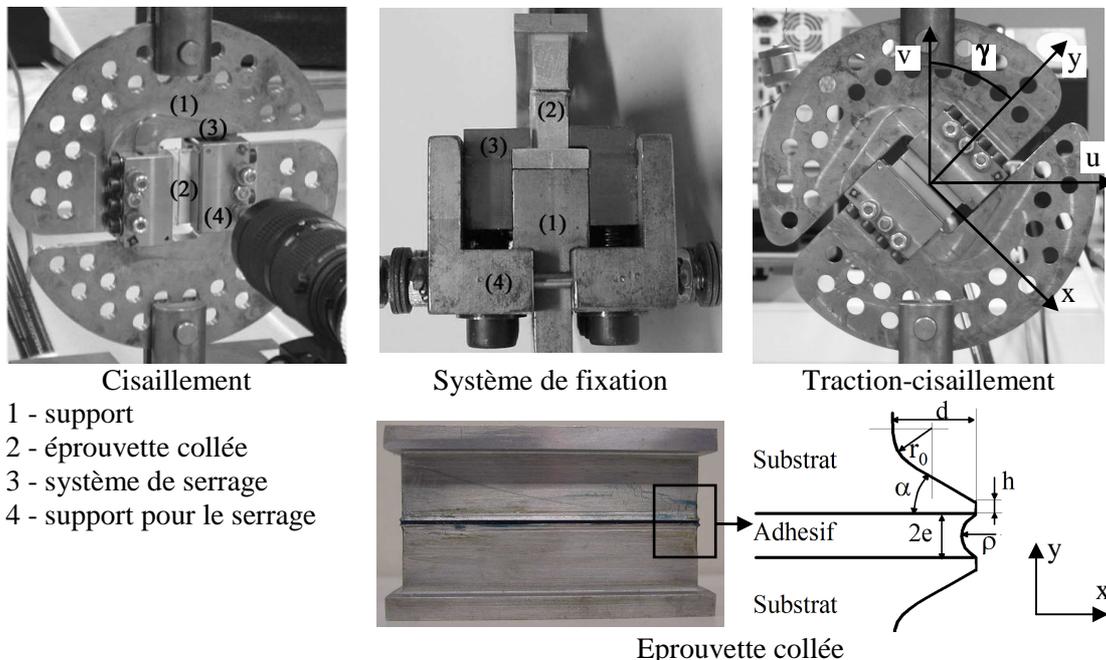


FIG. 6 – Montage Arcan et géométrie des éprouvettes.

La section du plan moyen du joint de colle est d'environ :  $Sc = 10 \times 65\text{mm}^2$ . Ce dispositif permet d'analyser le comportement d'adhésifs dans un assemblage pour une large plage de chargements radiaux de traction/compression-cisaillement ; en particulier, il permet de déterminer l'enveloppe de rupture de la colle dans le plan contrainte normale – contrainte tangentielle [10].

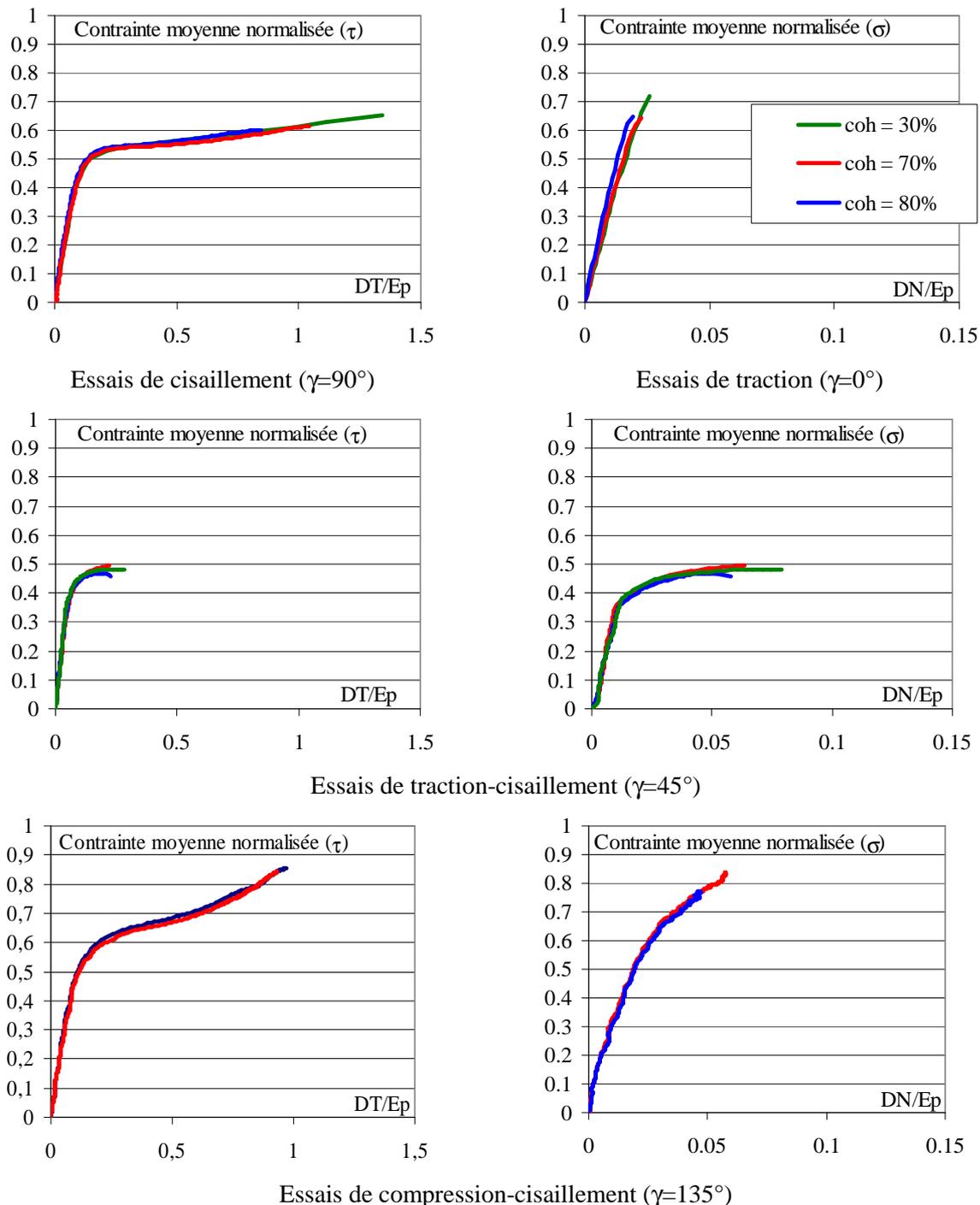


FIG. 7 – Essais de traction-cisaillement avec le montage Arcan.

La figure 7 présente des résultats obtenus pour des essais de cisaillement ( $\gamma = 90^\circ$ , figure 6) et pour des essais de traction dans la direction normale au plan moyen du joint de colle ( $\gamma = 0^\circ$ ) pour des éprouvettes sans préparation chimique de la surface et une épaisseur de joint de colle de l'ordre de 0,4 mm. Les résultats sont présentés en utilisant les contraintes moyennes de cisaillement ou de traction en fonction des déplacements relatifs tangentiels et normaux (respectivement DT, DN) normalisés par l'épaisseur du joint de colle Ep. Pour des sollicitations de cisaillement les résultats sont similaires à ceux obtenus avec le montage TAST modifié. Pour la sollicitation de traction, les déformations du joint de colle sont beaucoup plus faibles qu'en cisaillement et le mode de rupture (% de surface de rupture cohésive de la colle) a aussi une influence. La figure 7 présente aussi des résultats pour des essais de traction-cisaillement ( $\gamma = 45^\circ$ ) et de compression-cisaillement ( $\gamma = 135^\circ$ ). Pour simplifier la présentation des résultats les contraintes moyennes et déformations moyennes sont représentées avec des valeurs positives. De plus, il est important de noter la différence importante des déformations dans la direction tangentielle et dans la direction normale (un facteur

10 existe sur les échelles). Ces résultats soulignent quelques points du comportement complexe d'une colle dans un assemblage qui nécessitent la mise en place de modèles de comportement adaptés (influence de la pression hydrostatique, écoulement non-associé, ...).

## 6 Conclusions

L'objectif à moyen terme de cette étude est de développer des outils capables de prévoir le comportement de structures assemblées par collage. La détermination et la modélisation du comportement non linéaire et des critères de rupture des adhésifs dans un assemblage sont complexes. Les résultats présentés dans ce papier montrent, pour un adhésif dans un assemblage sous sollicitation monotone, des comportements dépendant fortement du mode de sollicitation (traction/compression-cisaillement) ; d'autres aspects comme l'analyse des effets visqueux du comportement de la colle doivent être étudiés [10]. De plus pour limiter l'influence des effets de bords pouvant être particulièrement importants pour les assemblages collés, il est nécessaire d'utiliser des dispositifs expérimentaux adaptés et de prendre des précautions pour réduire l'influence des défauts de positionnement lors des essais. Les trois essais présentés pour des sollicitations de cisaillement d'une colle dans un assemblage donnent des résultats relativement similaires. Des différences sur les déformations à rupture sont observées, des analyses numériques, prenant en compte le comportement non linéaire de l'adhésif et les effets tridimensionnels, peuvent apporter des éléments de réponse sachant que pour ces essais, l'état de contrainte dans l'adhésif n'est pas homogène, pour un comportement élastique linéaire de la colle [11]. De plus, il est nécessaire d'étudier plus en détail l'influence de la nature de la préparation de surface des substrats et l'influence de charges d'addition pouvant exister dans le comportement de l'adhésif sur le comportement mécanique de la colle dans un assemblage.

## Remerciements

Les auteurs remercient la société STRUCTIL pour son aide dans cette étude et les personnes du groupe CMS du DGA/DET/CEP/MC/TCM pour la contribution à la réalisation des études expérimentales.

## References

- [1] Adams R.D., Adhesive bonding: Science, technology and applications, Woodhead Publishing, 2005.
- [2] Dolev G., Ishai O., "Mechanical Characterization of Adhesive Layer in-situ and as Bulk Material", Journal of Adhesion, vol. 12, 283-294, 1981.
- [3] Jeandreau J.P., "Analysis and design data for adhesively bonded joints", Int. J. Adhes. Adhes., 11, 71-79, 1991.
- [4] Da Silva L.F.M., and Öchsner A., Modeling of adhesive bonded joints, Springer, Berlin, 2008.
- [5] Leguillon D., Sanchez-Palancia E., Computation of singular solutions in elliptic problems and elasticity, Editions Masson, Paris, 1987.
- [6] Hildebrand M., "Non-linear analysis and optimization of adhesively bonded single lap joints between fibre-reinforced plastics and metals", Int. J. Adhes. Adhes., 14, 261-267, 1994
- [7] Cognard J.Y., Créac'hacdec R., Sohier L., Davies P., "Analysis of the non-linear behavior of adhesives in bonded assemblies. Comparison of TAST and ARCAN tests", Int. J. Adhes. Adhes., 28, 393-404, 2008.
- [8] Dean G., Crockera L., Reada B., Wrightb L., "Prediction of deformation and failure of rubber-toughened adhesive joints", Int. J. Adhes. Adhes., 24, 295-306, 2004.
- [9] Chai H., The effects of bond thickness, rate and temperature on the deformation and fracture of structural adhesives under shear loading, International Journal of Fracture, 130, 497-515, 2004.
- [10] Cognard J.Y., Davies P., Sohier L., Créac'hacdec R., "A study of the non-linear behavior of adhesively-bonded composite assemblies", Compos. Struct., 76, 34-46, 2006.
- [11] Cognard J.Y., "Numerical analysis of edge effects in adhesively-bonded assemblies. Application to the determination of the adhesive behaviour", Comp. Struct., 86, 1704-1717, 2008.
- [12] Bouvart D., Schmit F., "Lois de comportement d'assemblages collés alliage léger/adhésif élastoplastique", ETCA 88 R 001, 1988.
- [13] Schmit F., "Etude des effets de la vitesse de déformation sur la tenue mécanique d'assemblages collés sollicités en cisaillement par torsion", ETCA 90 R 017, 1990.