



HAL
open science

Etude numérique et optimisation du comportement d'assemblages collés cylindriques sous chargements de traction

Jean-Yves Cognard, Laurent Sohier, Hervé Devaux

► **To cite this version:**

Jean-Yves Cognard, Laurent Sohier, Hervé Devaux. Etude numérique et optimisation du comportement d'assemblages collés cylindriques sous chargements de traction. 10e colloque national en calcul des structures, May 2011, Giens, France. pp.Clé USB. hal-00592858

HAL Id: hal-00592858

<https://hal.science/hal-00592858>

Submitted on 3 May 2011

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 numérique et optimisation du comportement d'assemblages collés cylindriques sous chargements de traction

J. Y. Cognard¹, L. Sohier², H. Devaux³

¹LBMS, Ensta-Bretagne, France, jean-yves.cognard@ensta-bretagne.fr

²LBMS, Université de Brest, France, laurent.sohier@univ-brest.fr

³HDS, Brest, France, hdv@hds-design.com

Résumé — Le collage structural permet de réduire le coût de fabrication et le poids de certaines structures, en particulier pour l'assemblage de matériaux différents ou de composites. L'optimisation de la conception d'assemblages collés nécessite des démarches de modélisation précises qui doivent prendre en compte les concentrations de contraintes pouvant exister. Une démarche est proposée pour optimiser le design de ces assemblages, différentes géométries sont proposées pour fortement limiter l'influence des effets de bords pour des assemblages cylindriques sous des chargements de traction.

Mots clefs — Assemblages collés, concentration de contrainte, optimisation.

1 Introduction

Le collage structural permet de réduire le coût de fabrication et le poids de certaines structures, en particulier pour l'assemblage de matériaux différents ou de composites. Cette technique d'assemblage offre de nombreux avantages, mais un manque de confiance des bureaux d'études limite encore aujourd'hui l'utilisation de cette technique. Ainsi, l'optimisation de la conception d'assemblages collés nécessite des démarches de modélisation précises qui doivent prendre en compte les concentrations de contraintes (associées principalement aux effets de bords) pouvant exister. Les concentrations de contraintes peuvent entraîner l'initiation et la propagation de fissures dans l'adhésif [1]. Plusieurs méthodes simplifiées ont été proposées dans le but de décrire le comportement de certains assemblages collés à partir de modèles 1D ou 2D [2]; mais, ces méthodes ne peuvent pas généralement de décrire l'influence des effets de bord qui ont souvent une large influence sur la charge maximale transmissible par les assemblages collés. Ainsi, l'analyse précise de la répartition des contraintes dans le joint de colle est un point important pour l'optimisation des performances des assemblages collés ; par exemple, le design d'assemblages collés qui limitent fortement les effets de bords est une solution très intéressante.

L'objectif de cette présentation est dans un premier temps d'analyser les concentrations de contraintes dans le cas d'assemblages cylindriques collés sous chargements de traction en utilisant des modèles éléments finis raffinés pour des comportements élastiques des constituants. Il a été montré, pour des assemblages de type simple recouvrement, qu'il est nécessaire de fortement limiter l'influence des effets de bord pour limiter le risque d'initiation de la rupture près des extrémités du joint de colle [3]. De plus, le comportement non-linéaire de la colle (plasticité) ne semble pas limiter l'influence des effets de bord [3]. Ainsi, pour les assemblages cylindriques, l'influence de plusieurs paramètres géométriques comme l'épaisseur du joint de colle, la longueur de recouvrement et l'épaisseur des tubes sur la répartition des contraintes dans l'adhésif est analysée. Dans un second temps, des géométries qui permettent de fortement limiter l'influence des effets de bord sont proposées en utilisant les résultats de méthodes asymptotiques [4, 5]. Une optimisation de la charge maximale transmissible par les assemblages cylindriques est proposée en utilisant des modèles prenant en compte la dépendance du comportement de l'adhésif vis-à-vis de la pression hydrostatique [6, 7]. Ce type de modèle est souvent utilisé pour représenter le comportement des polymères. Un modèle de type Exponent Drucker-Prager est utilisé et les paramètres ont été identifiés à partir d'essais réalisés en utilisant un caisson hyperbare dans le but d'analyser le comportement de l'adhésif sous des chargements caractérisés par des contraintes hydrostatiques négatives élevées [8].

2 Effets de bord pour des assemblages collés cylindriques

Cette partie présente une étude préliminaire pour analyser l'influence des effets de bords pour des jonctions collées cylindriques. Pour déterminer la répartition des contraintes dans l'assemblage et en particulier dans la colle, des analyses éléments finis utilisant des maillages raffinés sont utilisées sous les hypothèses de comportement élastique des matériaux et de liaisons parfaites à l'interface colle-substrat. Comme les codes éléments finis sont généralement basés sur des formulations en déplacement, la continuité du déplacement est assurée pour une interface parfaite mais pas la continuité du vecteur contrainte. Ainsi, des maillages raffinés sont aussi nécessaire proche des interfaces pour assurer une bonne qualité des résultats en contraintes, en particulier pour de larges différences de propriétés mécaniques des matériaux de l'assemblage. Différentes simulations ont montré que l'utilisation de 20 éléments linéaires pour une épaisseur de joint de colle de 0,1 mm permet d'obtenir de bons résultats numériques [3]. Les résultats sont présentés pour des substrats en aluminium (module d'Young : $E_a = 80$ GPa, coefficient de Poisson : $\nu_a = 0.3$) ; les paramètres matériaux pour la colle sont tels que : $E_j = 2.2$ GPa, $\nu_j = 0.3$.

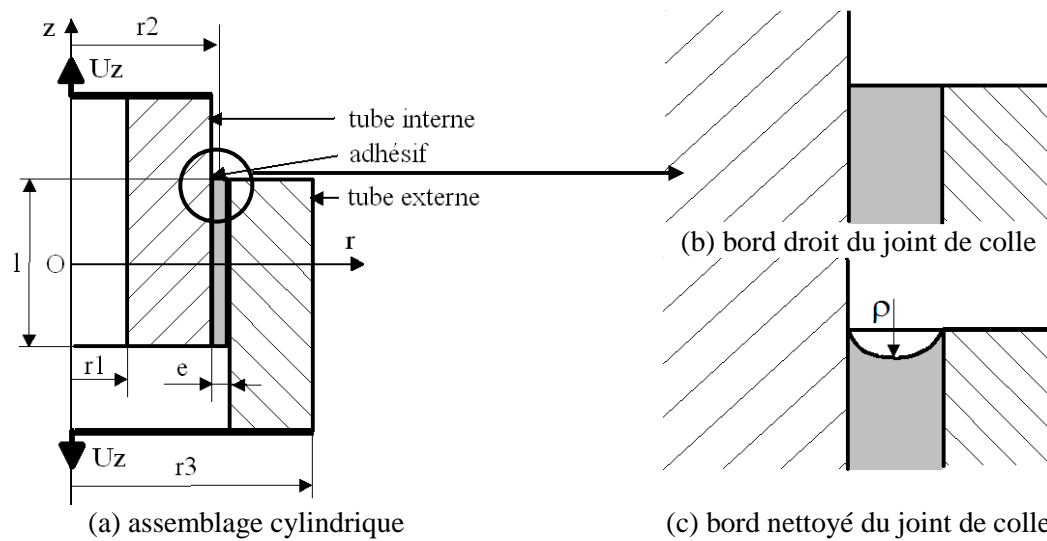
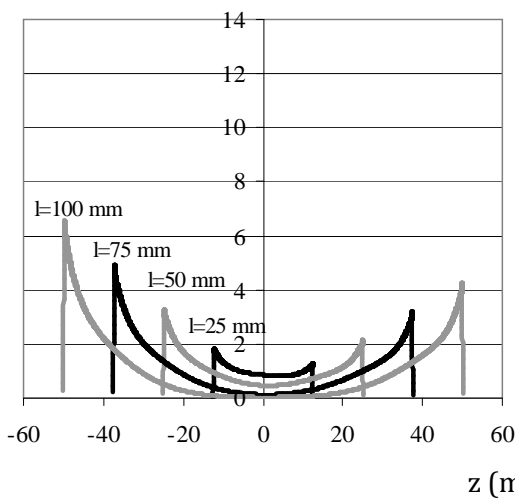


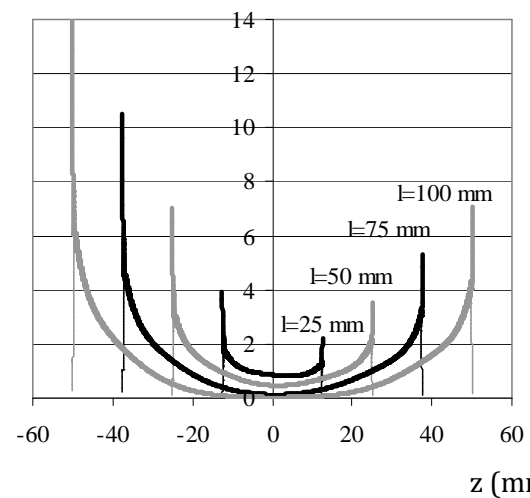
FIG. 1 - Présentation de l'assemblage cylindrique étudié et de deux géométries locales (zoom).

Contrainte de cisaillement



(a) contrainte de cisaillement dans le milieu du joint de colle

Contrainte de cisaillement

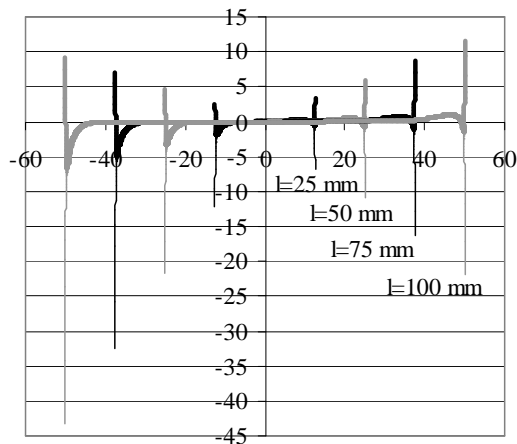


(b) contrainte de cisaillement dans le joint de colle (— : valeurs minimales ; — : valeurs maximales)

FIG. 2 – Contrainte de cisaillement dans l'épaisseur du joint de colle avec des bords droits pour une contrainte moyenne de cisaillement de 1 MPa.

La figure 1 présente la géométrie de l'assemblage cylindrique utilisé dans cette partie. Comme un chargement axial est utilisé, un modèle axisymétrique peut être utilisé pour limiter le coût des simulations. Les résultats sont présentés pour $r_1 = 10$ mm, $r_2 = 15$ mm, $r_3 = 20$ mm, $e = 0.2$ mm et pour différents valeurs de la longueur de recouvrement ($l = 25, 50, 75$ and 100 mm) ; de plus, un bord droit du joint de colle est utilisé. Pour faciliter la présentation des résultats, la contrainte moyenne de cisaillement est normalisée à 1. La figure 2a présente l'évolution de la contrainte de cisaillement (composante r_z) dans le milieu de la colle le long de la ligne de recouvrement (axe z en utilisant l'origine au milieu du joint). La figure 2b illustre l'évolution des valeurs maximales et minimales de la contrainte de cisaillement dans l'épaisseur de joint de colle le long de la ligne de recouvrement. Ces résultats soulignent la présence de forts gradients de la contrainte de cisaillement près de l'interface colle-substrat. La figure 3a présente l'évolution des valeurs maximales et minimales de la contrainte radiale dans l'épaisseur de joint de colle le long de la ligne de recouvrement. Il est important de noter la forte influence des effets de bords sur la contrainte de pelage. De plus, des résultats similaires sont obtenus pour les contraintes ortho-radiale et axiale. L'évolution de la contrainte équivalente de von Mises souligne aussi cette propriété (figure 3b).

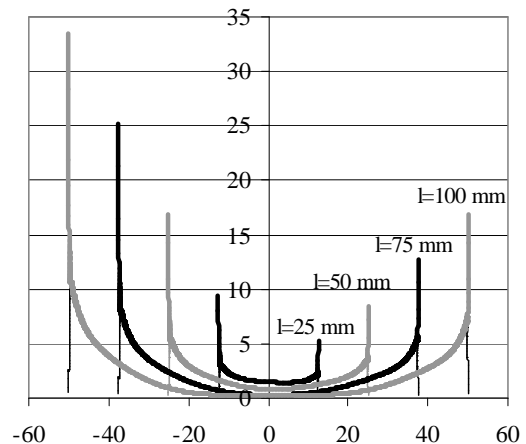
Contrainte radiale



z (mm)

(a) Contrainte radiale

Contrainte équivalente de von Mises

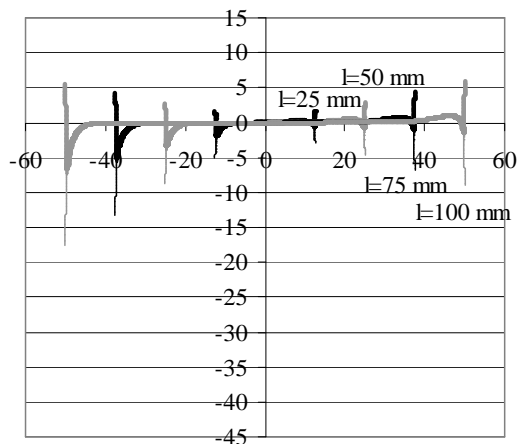


z (mm)

(b) Contrainte équivalente de von Mises

FIG. 3 - Contrainte dans l'épaisseur du joint de colle avec des bords droits pour une contrainte moyenne de cisaillement de 1 MPa ; (— : valeurs minimales ; — : valeurs maximales).

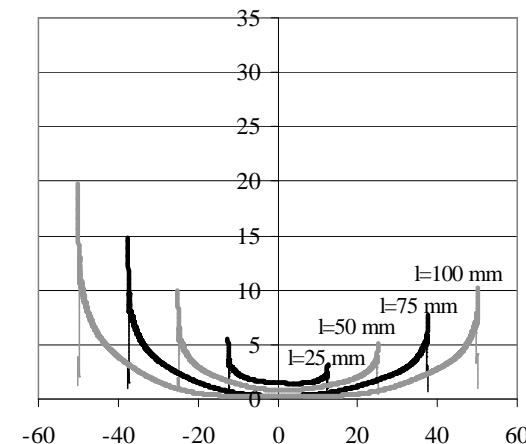
Contrainte radiale



z (mm)

(a) Contrainte radiale

Contrainte équivalente de von Mises



z (mm)

(b) Contrainte équivalente de von Mises

FIG. 4 – Contrainte dans l'épaisseur du joint de colle avec des bords nettoyés pour une contrainte moyenne de cisaillement de 1 MPa ; (— : valeurs minimales ; — : valeurs maximales).

Les joints simple recouvrement et cylindrique sous chargement axial sont associés à de fortes concentrations de contrainte. Mais une différence importante entre ces deux assemblages est associée

au fait que la contrainte de pelage génère une sollicitation de traction pour le joint simple recouvrement et une sollicitation de compression pour le joint cylindrique. C'est un point important pour le critère de résistance de la colle dans l'assemblage.

L'utilisation de joints de colle nettoyés, associés à un nettoyage du joint de colle avant la cuisson, permet une réduction significative des concentrations de contraintes ; et en particulier une forte limitation de la concentration de la contrainte de pelage (figure 4).

Une modification de la géométrie du bord libre du joint de colle (par exemple, l'utilisation de chanfreins [9-11]) peut réduire l'influence des effets de bords; mais, pour fortement limiter les concentrations de contraintes il semble nécessaire de modifier la géométrie des substrats près des bords libres de la colle [3].

3 Critère de résistance de la colle dans l'assemblage

Les résultats présentés dans la partie précédente montrent que l'état de contrainte dans un joint collé est complexe et dépend fortement de la géométrie de l'assemblage près des bords libres de la colle. La réduction de l'influence des effets de bords peut entraîner une augmentation de la charge transmissible par l'assemblage. Ainsi, il est nécessaire d'utiliser des critères de résistance précis de la colle pour optimiser ces assemblages. Différentes études soulignent qu'il est nécessaire d'utiliser des modèles prenant en compte l'influence de la pression hydrostatique pour représenter le comportement d'un adhésif dans un assemblage [6, 7]. Dans cette étude, nous nous limitons à l'utilisation d'un comportement élastique de la colle. En partant des résultats obtenus pour la colle Huntsman™ Araldite® 420 A/B obtenus en utilisant un montage Arcan modifié (joint d'épaisseur 0.4 mm et vitesse de traverse de la machine de traction de 0,5 mm/min) il est possible de définir la limite d'élasticité de la colle (en négligeant les effets visqueux). L'essai Arcan permet de déterminer le comportement de la colle pour différents chargements de traction/compression-cisaillement [12]. Une représentation de la limite d'élasticité par une fonction de type Exponent Drucker-Prager donne de bons résultats [8] :

$$F_0 = a (\sigma_{vm})^b + p_h - p_{t0} = 0 \quad (1)$$

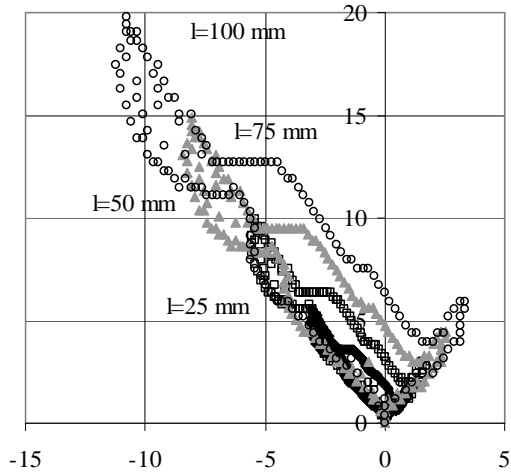
où σ_{vm} est la contrainte équivalente de von Mises et p_h la contrainte hydrostatique. a , b et p_{t0} sont des paramètres matériau. Les résultats de l'identification sont présentés dans le tableau 1 et la limite d'élasticité initiale est représentée sur la figure 5b.

TAB. 1 – paramètres matériaux pour la définition de la fonction seuil initiale

a (SI)	B	p_{t0} (MPa)
1. E-6	4.87	31.7

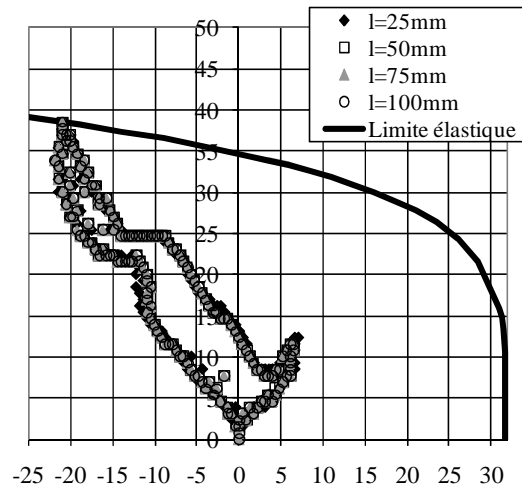
La figure 5 présente, dans le diagramme contrainte hydrostatique-contrainte équivalente de von Mises la sollicitation de la colle pour une épaisseur de 0,1mm avec des bords nettoyés et pour les quatre valeurs de la longueur de recouvrement. Pour une contrainte moyenne de cisaillement de 1 MPa, les contraintes hydrostatique et de von Mises sont calculées pour tous les éléments du maillage, et seulement l'enveloppe de ces points est tracée pour simplifier la présentation. En utilisant la propriété de linéarité du problème élastique, il est possible de déterminer la charge maximale transmissible par l'assemblage en utilisant la limite d'élasticité. Ainsi, il est possible de définir, pour une longueur de recouvrement donnée, la valeur maximale de la contrainte de cisaillement moyenne : $\tau_{moyen\ max}$. Les résultats sont résumés dans le tableau 2 et il est possible de noter que la valeur maximale de la contrainte de cisaillement moyenne diminue avec la longueur de recouvrement ; mais, la charge maximale transmissible, P_1 , augmente légèrement avec la longueur de recouvrement. La figure 5b présente la sollicitation de la colle pour la charge maximale transmissible pour les quatre longueurs de recouvrement. Il est important de noter que les différentes enveloppes sont similaires pour les différentes longueurs de recouvrement. De plus, il est possible de noter l'effet bénéfique de la contrainte de pelage en compression sur la valeur maximale de charge transmissible.

Contrainte équivalente de von Mises (MPa)



Contrainte hydrostatique (MPa)
(a) contrainte moyenne de 1 MPa

Contrainte équivalente de von Mises (MPa)



Contrainte hydrostatique (MPa)
(b) charge maximale transmise

FIG. 5 - Sollicitation de la colle avec des bords nettoyés dans le diagramme contrainte hydrostatique-contrainte équivalente de von Mises.

TAB. 2 – charge maximale transmissible pour l’assemblage cylindrique collé

Recouvrement : l	25 mm	50 mm	75 mm	100 mm
$\tau_{\text{moyen maxi}}$	8.65 MPa	4.85 MPa	3.24 MPa	2.43 MPa
$P_1 / P_{l=25}$	1.00	1.12	1.12	1.13

4 Géométries permettant de limiter l’influence des effets de bords

Les résultats présentés précédemment soulignent la forte influence des concentrations de contraintes sur la charge maximale transmissible par un assemblage cylindrique collé. Ainsi, dans cette partie, différentes géométries qui permettent de fortement limiter l’influence des effets de bords pour des assemblages plans [3] sont analysées dans le cas d’assemblages cylindriques en prenant en compte quelques contraintes de fabrication. La figure 8 présente les différentes géométries étudiées ; les substrats avec des épaulements sont proposés pour faciliter la fabrication et pour réduire les concentrations de contraintes [13].

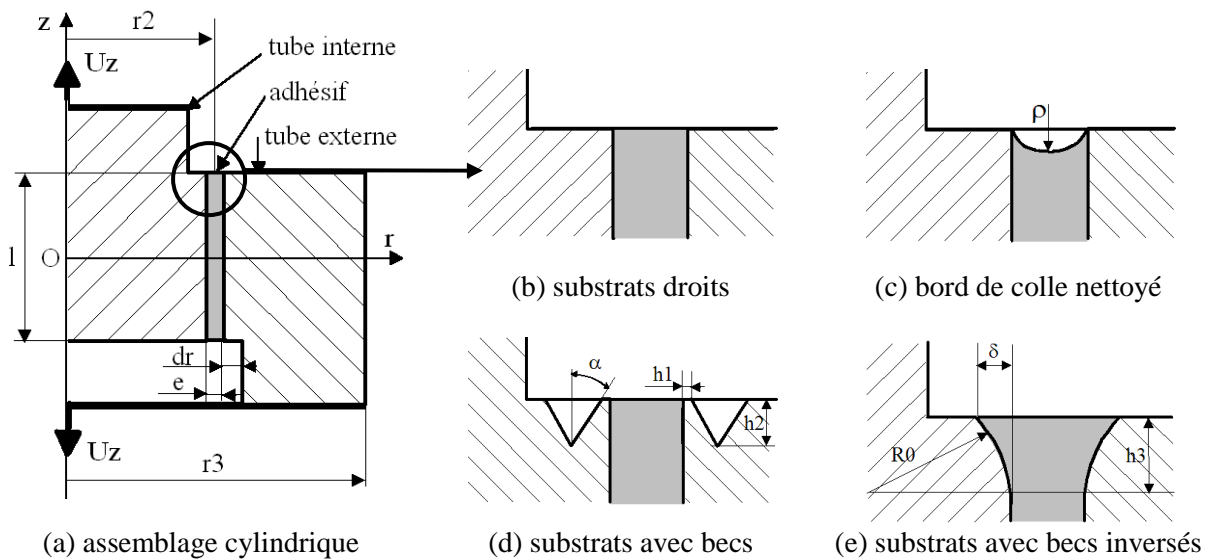
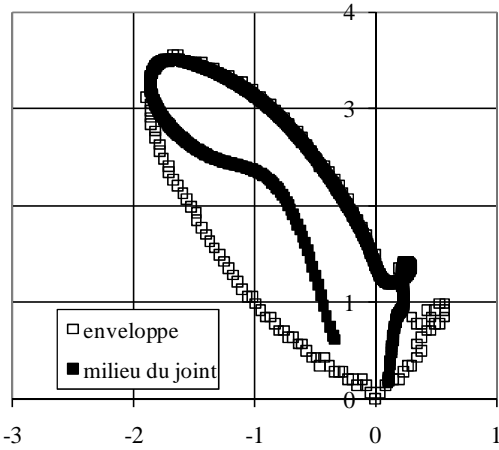


FIG. 8 - Présentation des joints collés cylindriques avec différentes géométries (zoom).

La figure 9 présente dans le diagramme contrainte hydrostatique-contrainte équivalente de von

Mises, l'état de contrainte dans le milieu du joint de colle et dans le joint complet pour une longueur de recouvrement de $l=50$ mm, des becs inversés et un nettoyage du bord de la colle. Il est important de noter que pour une épaisseur du joint de colle de 0.2 mm l'état de contrainte dans le milieu du joint de colle est proche de l'état de contrainte dans le joint complet (figure 9a). Pour une valeur donnée de la contrainte moyenne de cisaillement, une augmentation de l'épaisseur du joint de colle entraîne une réduction de la valeur maximale de la contrainte équivalente dans le milieu du joint (figure 9). Ainsi, une augmentation de la valeur maximale de l'effort transmissible par l'assemblage peut être obtenue si les effets des effets de bords restent faibles. Il est important de noter que pour une épaisseur du joint de colle de 0.8 mm le point dimensionnant n'est pas dans le milieu du joint de colle (figure 9b).

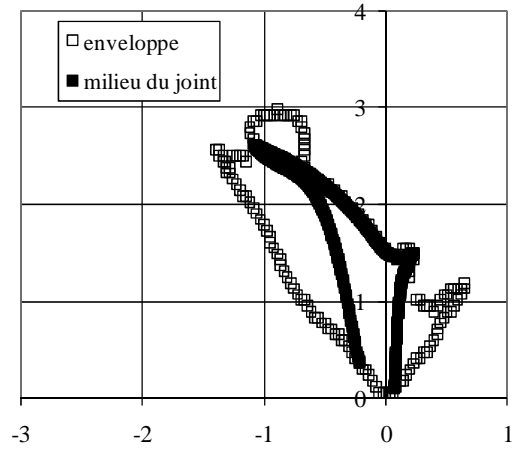
Contrainte équivalente de von Mises (MPa)



Contrainte hydrostatique (MPa)

(a) épaisseur du joint de colle de 0.2 mm

Contrainte équivalente de von Mises (MPa)

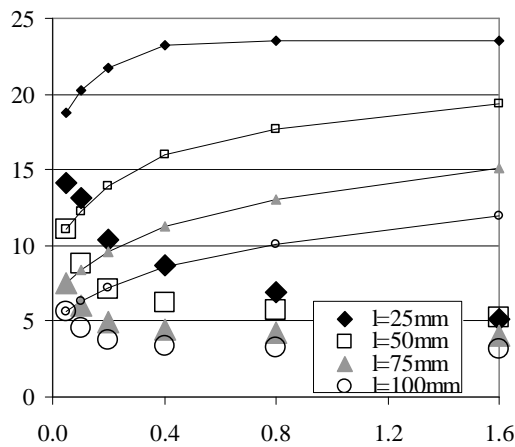


Contrainte hydrostatique (MPa)

(b) épaisseur du joint de colle de 0.8 mm

FIG. 9 - Influence de l'épaisseur du joint de colle pour des bords nettoyés, des becs inversés, une longueur de recouvrement $l=50$ mm et pour une contrainte moyenne de cisaillement de 1 MPa.

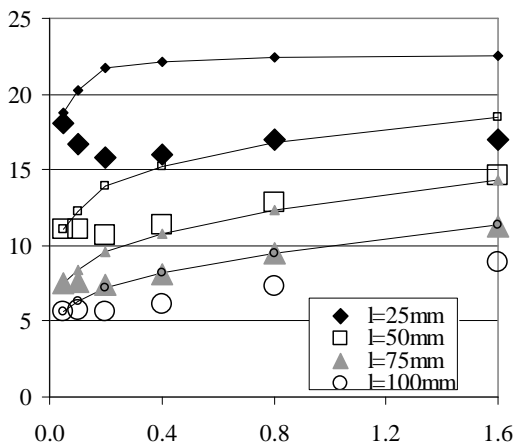
$\tau_{\text{moyen maxi}}$ (MPa)



Epaisseur du joint (mm)

(a) bords droits

$\tau_{\text{moyen maxi}}$ (MPa)



Epaisseur du joint (mm)

(b) bords nettoyés

FIG. 10 - Influence de l'épaisseur du joint de colle pour des substrats droits (— : en prenant en compte seulement la partie médiane du joint de colle).

Les simulations ont été réalisées pour un rayon moyen du joint de colle de $r_2 = 15$ mm et pour un rayon extérieur du tube extérieur de $r_3 = 30$ mm. Les épaulements sont définis à partir du paramètre $d_r = 1$ mm. Les bords nettoyés des bords libres du joint de colle sont définis à partir du rayon $\rho = 1.5 e$, e étant l'épaisseur du joint de colle. Les becs sont définis à partir des paramètres suivants : $h_1 = 0.1$ mm, $h_2 = 1$ mm et $\alpha = 30^\circ$, pour fortement limiter l'influence des effets de bords tout en limitant la zone affectée par l'usinage de ces becs. Ces becs sont utilisés pour analyser le comportement des adhésifs avec un montage Arcan modifié [3]. Les becs inversés sont définis à partir des paramètres

suivants : $h_3 = 2 \text{ mm}$ et $\delta = e$; le rayon R_0 est calculé pour obtenir un cercle tangent à l'interface colle-substrat pour éviter les points anguleux qui peuvent aussi générer des concentrations de contraintes. Ces géométries ont été utilisées pour analyser la durabilité d'assemblages collés en environnement naval [12].

La figure 10 présente l'influence de l'épaisseur du joint de colle sur la valeur maximale de la contrainte moyenne de cisaillement, c'est-à-dire sur la valeur maximale de l'effort maximal transmissible par l'assemblage. Les résultats sont présentés pour les six géométries et pour les quatre longueurs de recouvrement étudiées en utilisant des grandes marques. De plus, les résultats obtenus en utilisant seulement l'état de contrainte dans la section moyenne (rayon moyen) de la colle sont aussi présentés en utilisant des petites marques reliées par des traits fins.

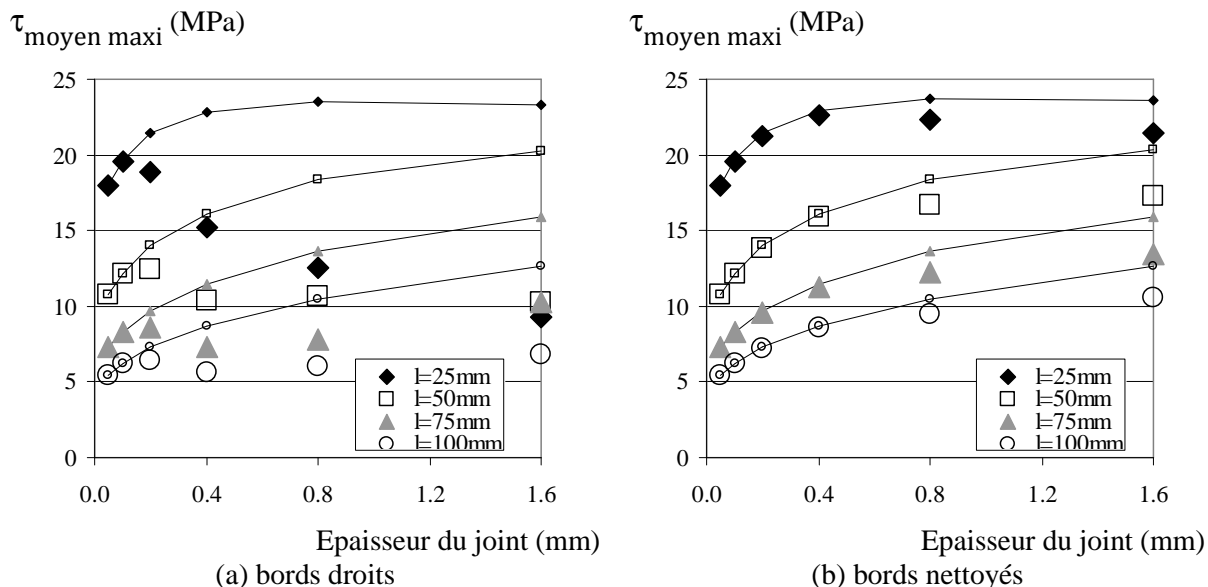


FIG. 11 - Influence de l'épaisseur du joint de colle pour des substrats avec des becs (——— : en prenant en compte seulement la partie médiane du joint de colle).

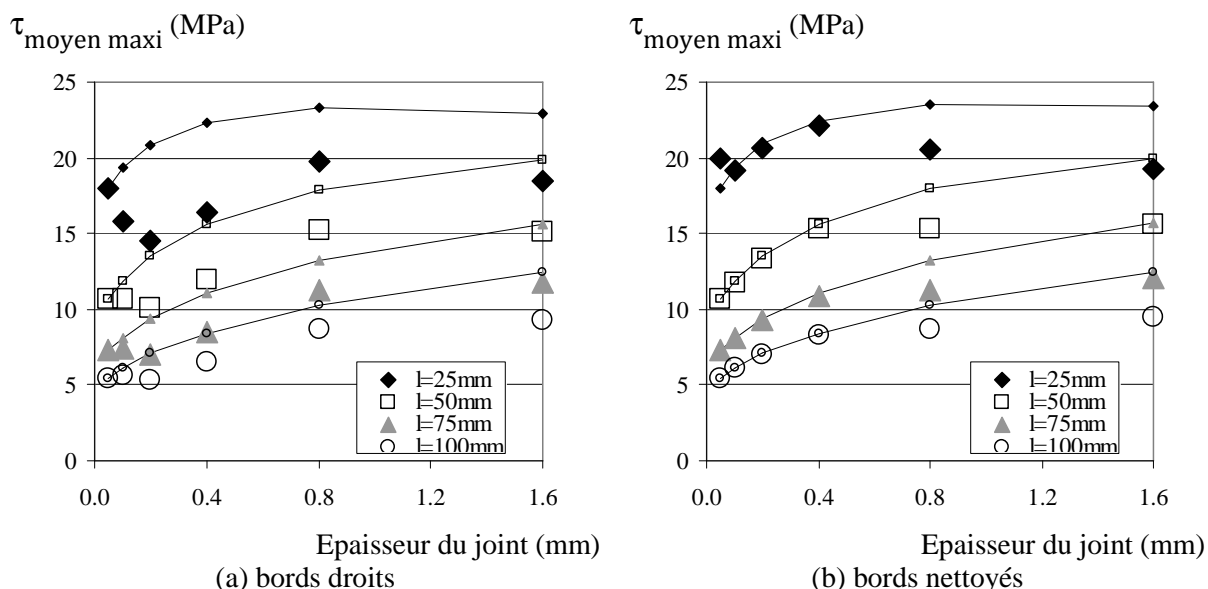


FIG. 12 - Influence de l'épaisseur du joint de colle pour des substrats avec des becs inversés (——— : en prenant en compte seulement la partie médiane du joint de colle).

La figure 10 souligne l'effet bénéfique des épaulements pour les bords droits des substrats (figure 8). Pour l'application étudiée, l'utilisation des becs ou des becs inversés permet d'augmenter les performances des assemblages collés par rapport aux substrats avec des bords droits (figures 11 et 12). Il est important de noter que l'état de contrainte dans la partie médiane du joint est pratiquement indépendant de la géométrie locale près des bords libres des joints de colle ; mais, cet état de

contrainte n'est pas représentatif de la sollicitation dans le joint de colle, en particulier lorsque les concentrations de contraintes sont importantes.

5 Conclusion

Le collage structural permet de réduire le coût de fabrication et le poids de certaines structures, en particulier pour l'assemblage de matériaux différents ou de composites. L'optimisation de la conception d'assemblages collés nécessite des démarches de modélisation précises qui doivent prendre en compte les concentrations de contraintes (associées principalement aux effets de bords) pouvant exister.

Les résultats numériques présentés permettent de proposer des règles de conception pour optimiser la charge transmissible par les assemblages cylindriques collés sous chargement de traction. Sous l'hypothèse de comportement élastique des composants, un point clé est de fortement limiter l'influence des effets de bords pour augmenter la charge transmissible par l'assemblage collé. Une optimisation des paramètres géométriques des deux géométries proposées (utilisant des becs ou des becs inversés) peut encore augmenter les performances des assemblages.

De plus, des études numériques et expérimentales doivent être développées pour analyser le comportement des géométries proposées pour des applications industrielles. Il est aussi nécessaire d'étudier l'influence de chargements plus complexes (traction-torsion, flexion) et l'influence du comportement non-linéaire de l'adhésif.

Références

- [1] G. Dean, L. Crocker, B. Read and L. Wright, Prediction of deformation and failure of rubber-toughened adhesive joints, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 24, 295-306, 2004.
- [2] L.F.M. Da Silva and A. Öchsner, *Modeling of adhesive bonded joints*, Springer, Berlin, 2008.
- [3] J.Y. Cognard, Numerical analysis of edge effects in adhesively-bonded assemblies. Application to the determination of the adhesive behaviour, *Computer & Structures*, 86, 1704-1717, 2008.
- [4] D. Leguillon and E. Sanchez-Palencia, *Computation of singular solutions in elliptic problems and elasticity*, Editions Masson, Paris, 1987
- [5] E.D. Reedy and T.R. Guess, Comparison of butt tensile strength data with interface corner stress intensity factor prediction, *International Journal Solids Structures*, 30, 2929-2936, 1993.
- [6] R.S. Raghava and R. M. Cadell, The macroscopic Yield Behaviour of Polymers, *Journal of Material Science*, 8, 225-232, 1973.
- [7] R. Mahnken and M. Schlimmer, Simulation of strength difference in elasto-plasticity for adhesive materials, *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, 63, 1461-1477, 2005.
- [8] J.Y. Cognard, R. Créac'hcadec, J. Maurice, P. Davies, M. Peleau and L.F.M. Da Silva, Analysis of the influence of hydrostatic stress on the behaviour of an adhesive in an assembly, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 24, 1977-1994, 2010.
- [9] Adams R.D., Harris J.A., The influence of local geometry on the strength of adhesive joints, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 69-80, 1987.
- [10] G. Belingardi, L. Goglio, A. Tarditi, Investigating the effect of spew and chamfer size on the stresses in metal/plastics adhesive joints, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 22, 273-282, 2002.
- [11] Z.M. Yan, M. You, X.S. Yi, X.L. Zheng and Z. Li, A numerical study of parallel slot in adherend on the stress distribution in adhesively bonded aluminium single lap joint, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 27, 687-695, 2007.
- [12] M. Bordes, P. Davies, J.Y. Cognard, L. Sohier, V. Sauvart-Moynot and J. Galy, Prediction of long term strength of adhesively bonded joints in sea water, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 29, 595-608, 2009.
- [13] J.Y. Cognard, H. Devaux and L. Sohier, Numerical analysis and optimisation of cylindrical adhesive joints under tensile loads, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 30, 706-719, 2010.