

Dimensionnement d'assemblage collé par l'utilisation du critère couplé

J. Le Pavic^{a,c}, G. Stamoulis^b, T. Bonnemains^b, D. Da Silva^c, D. Thévenet^a

a. ENSTA Bretagne, FRE CNRS 3744, IRDL, F-29200 Brest, France

b. Univ. Bretagne Occidentale, FRE CNRS 3744, IRDL, F-29200 Brest, France

c. Airbus Safran Launchers – Rue du Général Niox, 33165 Saint-Médard-en-Jalles

jeremy.le_pavic@ensta-bretagne.org

Résumé

Le collage structural est une solution d'assemblage présentant de nombreux avantages par rapport aux solutions classiques. La prévision de la charge à rupture de ce type de structure reste un point-clé pour rendre fiable leur utilisation. Toutefois, les méthodes de dimensionnement restent rares. Aussi dans le contexte de cette étude, un outil prédictif de la tenue mécanique d'assemblages collés a été développé. Il repose sur l'utilisation d'une approche en contrainte et en énergie. Dans le but de réduire les coûts de calcul, et de le rendre utilisable en Bureaux d'Etude, cet outil de dimensionnement sera également développé dans un cadre semi-analytique. Afin d'établir une première validation de l'approche proposée une étude expérimentale à l'aide du dispositif Arcan modifié a été réalisée. La confrontation des prévisions issues des deux modèles (éléments finis et semi-analytique) a permis d'établir une bonne corrélation avec les résultats expérimentaux.

Mots clés : Collage structural ; Critère couplé ; Dispositif Arcan ; Modèle semi-analytique

1. Introduction

Cette étude porte sur l'établissement d'une méthode rapide destiné à prévoir la charge à rupture d'un assemblage collé. Ce type de liaison sera intégré dans les lanceurs spatiaux afin d'assembler la multitude de pièces de natures et de fonctions diverses qui les constituent. L'assemblage de ces derniers doit donc être fiable et robuste, tout en assurant de bonnes performances, une maîtrise des coûts et une maturité technologique suffisante. L'objectif de ce travail est de déterminer de manière rapide la tenue mécanique de ces assemblages collés.

La méthode des éléments finis (MEF) a prouvé son efficacité pour rendre compte du comportement mécanique de structure et donc assurer leur dimensionnement. Les changements brusques de géométrie et de propriétés matériaux des substrats et de l'adhésif induisent la présence de singularité dans ce type d'assemblage. L'utilisation d'outils numériques (MEF) conduit par conséquent à une distribution de contrainte qui tend vers l'infini à proximité de cette zone de singularité. Les critères en contrainte classiquement utilisés présentent alors des limites pour traiter ce type de configuration [1]. Ces zones néfastes pour la tenue de l'assemblage due aux effets de bord sont des lieux privilégiés pour l'amorçage de fissure. Afin de pallier ce problème, un critère de ruine numérique alliant une approche en contrainte et énergétique a été mis en œuvre [2]. L'étude expérimentale est menée sur un dispositif Arcan modifié dont la géométrie limite les effets de bords dans un assemblage collé [1]. Si les améliorations technologiques permettent d'augmenter de manière significative les capacités des machines, la réduction des coûts de calcul reste une préoccupation importante, particulièrement dans un cadre industriel.

Pour cela nous avons utilisé un modèle analytique de type sandwich basé sur la théorie des plaques minces (First-order Shear Deformation Theory) [3].

2. Dispositif expérimental : Arcan modifié

Le dispositif Arcan modifié a montré sa pertinence dans la détermination des propriétés d'un joint collé. Le montage utilisé est constitué de deux substrats en alliage d'aluminium 2017 assemblés par un joint d'adhésif. Les substrats présentent une géométrie spécifique avec des becs limitant les effets de bords comme le montre la Fig. 1a) [1]. Ce dispositif permet une sollicitation multiaxiale de l'assemblage collé avec un angle spécifique par rapport au plan normal du joint de colle, comme le montre la Fig. 1b).

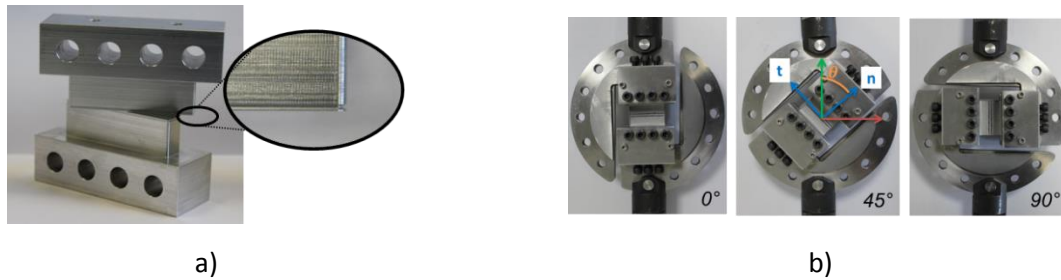


Figure 1. a) substrats Arcan et géométries des becs b) montage Arcan pour différents angles de chargement

Les contraintes à rupture normale (Z_N) et tangentielle (S_C) sont présentées dans le tableau 1. Elles ont été déterminées expérimentalement à l'aide du montage Arcan modifié. Les ténacités en mode I (G_I) et en mode II (G_{II}) sont issues de la littérature [4-5]. Pour la suite du travail numérique, la valeur moyenne de la ténacité en mode II (G_{II}) sera considérée, à savoir 202,5 N/m.

Contrainte à rupture [MPa]	$Z_N = 23$	$S_C = 36$
Ténacité [N/m]	$G_I = 191$	$130 \leq G_{II} \leq 275$

Table 1. Propriétés de l'adhésif Hysol®EA 9395™

Les prévisions de rupture numériques seront confrontées à des éprouvettes avec entaille de 5mm dans le joint de colle de chaque côté des substrats comme le montre la figure 2.

3. Détermination de la force à rupture

Les équations de la Mécanique Linéaire de la Rupture montrent que la solution élastique redevient valable en s'éloignant de la singularité. Le critère couplé permet de déterminer numériquement cette distance en associant une approche en contrainte (Eq. 1) et en énergie (Eq. 2) [2][6]. Le comportement du matériau est considéré purement élastique sous l'hypothèse de déformations planes.

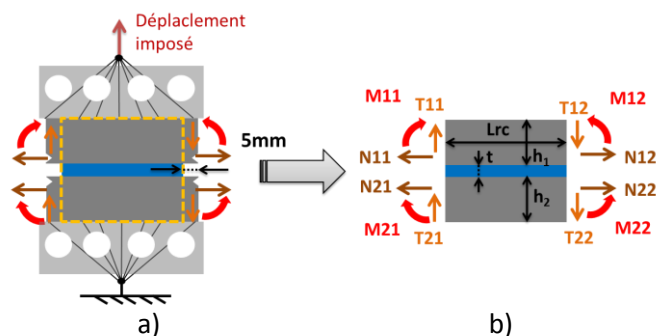


Figure 2. Evaluation des efforts de cohésion a) sur le modèle EF et b) Semi-Analytique

L'évaluation des efforts de cohésion à partir du modèle EF est effectuée sur une zone spécifique de la structure représentée sur la Fig. 2 (cadre pointillé). Ces efforts de cohésion servent par la suite à alimenter le modèle analytique de type sandwich. Cela permet alors d'obtenir la distribution de contrainte dans le joint de colle sans pour autant être dépendant de la qualité du maillage comme pour le modèle EF.

3.1 Critère en contrainte

En s'appuyant sur la distribution de contrainte obtenue numériquement où $\sigma_N(x)$ est la contrainte normale au plan du joint de colle et $\sigma_T(x)$ la contrainte tangentielle, on détermine une contrainte apparente $\sigma_{app}(x)$ dans la structure. Celle-ci est pondérée par un ratio de contrainte $r^\sigma(x)$. Cette contrainte apparente dépasse le critère en contrainte quadratique à une certaine distance de la singularité (Eq. 1). Pour les éléments finis, cette distance est très dépendante de la qualité du maillage et ne peut être suffisante pour déterminer la force à rupture de l'assemblage.

$$\sigma_{app}(x) \sqrt{\left(\frac{r^\sigma(x)}{Z_N}\right)^2 + \left(\frac{1-r^\sigma(x)}{S_C}\right)^2} = k_{app}(x) \cdot E^{eq} \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{\left(\frac{r^\sigma(x)}{Z_N}\right)^2 + \left(\frac{1-r^\sigma(x)}{S_C}\right)^2} \geq 1 \quad (1)$$

avec $\sigma_{app}(x) = \langle \sigma_N(x) \rangle_+ + \sigma_T(x)$ pour $\langle \sigma_N(x) \rangle_+ \geq 0$
et $r^\sigma(x) = \frac{\sigma_N(x)}{\sigma_{app}(x)}$

Cette expression fait apparaître un terme adimensionnel $k_{app}(x)$ présentant une relation linéaire avec la déformation de la structure ε et E^{eq} désigne le module d'élasticité du matériau étudié.

3.2 Critère énergétique

Le critère énergétique est formulé à partir du changement d'énergie potentielle entre un état initial $W_p(0)$ et un état fissuré $W_p(a)$, où a est la taille de la fissure. Le ratio entre cette variation d'énergie et la surface fissurée ΔS permet d'évaluer une énergie incrémentale G_{inc} . Lorsque cette grandeur dépasse la ténacité du matériau G^c , on suppose que la fissure peut se propager dans la structure (Eq. 2). La ténacité évolue avec la mixité de mode est évaluée uniquement par MEF [6].

$$G_{inc}(a) = -\frac{W_p(a) - W_p(0)}{\Delta S} = A_{inc}(a) \cdot E^{eq} \cdot \varepsilon^2 \cdot h \geq G^c(a) \quad (2)$$

Le terme $A_{inc}(a)$ est l'image adimensionnelle de l'évolution en énergie du système considéré et on observe une relation quadratique avec la déformation de la structure. h est une grandeur caractéristique de la structure afin de rendre adimensionnel le terme A_{inc} .

Cette propagation de fissure est simulée par éléments finis déboutonnant les nœuds à l'interface adhésif-substrat. Analytiquement, la propagation de la fissure est assimilée à une réduction de la longueur de collage dans la modèle [7] et la ténacité est supposée constante.

3.3 Critère de ruine de l'assemblage

Lorsque ces deux critères sont satisfaits simultanément pour une même distance a^* , on peut déterminer la force à rupture de l'assemblage à partir de l'équation (Eq. 2). On note que le résultat est similaire en utilisant l'équation (Eq. 1)[7] ce qui conduit à

$$F^{rupt} = K \cdot \sqrt{\frac{G^c(a^*)}{A_{inc}(a^*) \cdot E^{eq} \cdot \varepsilon^2 \cdot h}} \quad (3)$$

où K est la raideur de la structure étudiée, permettant de déterminer la force à rupture de l'assemblage.

4. Résultats

Les prévisions numériques utilisant le critère couplé (CC) sont confrontées aux efforts à rupture pour les trois angles de sollicitations ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) pour des éprouvettes munies d'entailles et représentées dans la Fig. 3. Les essais expérimentaux ont été répétés trois fois pour chaque angle de sollicitation.

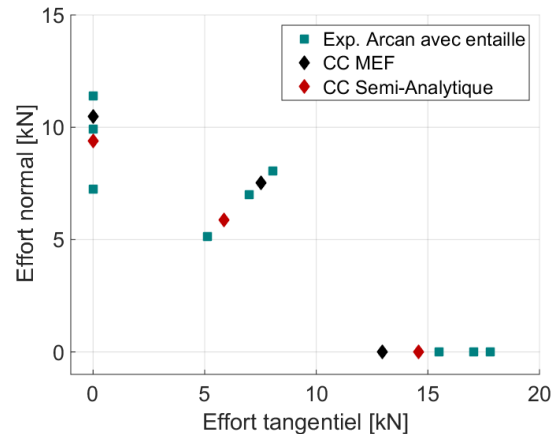


Figure 3. Comparaison des efforts à rupture expérimentaux et numériques

Les prévisions numériques de rupture obtenues par éléments finis sont en adéquation avec les valeurs expérimentales. Pour les essais à 0° et 90° , le modèle semi-analytique estime correctement la rupture de l'assemblage collé, tout comme l'approche MEF. En revanche à 45° (traction-cisaillement) le modèle semi-analytique présente un conservatisme plus important, du fait de la non prise en compte de l'évolution de la mixité de mode. En termes de délais de calcul, le gain est de l'ordre de 50 pour la méthode semi-analytique.

5. Conclusion

Cette étude propose une méthode de prévision de la charge à rupture d'un assemblage collé à l'aide d'un critère couplé. L'utilisation d'un modèle semi-analytique permet de réduire de manière significative le coût de calcul. Les prévisions obtenues restent conservatives par rapport aux essais expérimentaux. Cette méthode rapide répond aux contraintes d'une utilisation industrielle.

Références

- [1] J. Y. Cognard, R. Créac'hcadec, L. Sohier, and P. Davies, "Analysis of the nonlinear behavior of adhesives in bonded assemblies-Comparison of TAST and Arcan tests," *Int. J. Adhes. Adhes.*, 28, 393-404, 2008.
- [2] D. Leguillon, "Strength or toughness? A criterion for crack onset at a notch," *Eur. J. Mech. A/Solids*, 21, 61-72, 2002.
- [3] P. Weißgraeber, N. Stein, and W. Becker, "A general sandwich-type model for adhesive joints with composite adherends," *Int. J. Adhes. Adhes.*, 55, 56-63, 2014.
- [4] N. Ben Salem, M. K. Budzik, J. Jumel, M. E. R. Shanahan, and F. Lavelle, "Investigation of the crack front process zone in the Double Cantilever Beam test with backface strain monitoring technique," *Eng. Fract. Mech.*, 98, 272-283, 2013.
- [5] J. Jumel, M. K. Budzik, N. Ben Salem, and M. E. R. Shanahan, "Instrumented end notched flexure - Crack propagation and process zone monitoring. Part I: Modelling and analysis," *Int. J. Solids Struct.*, 50, 297-309, 2013.
- [6] N. Carrere, E. Martin, and D. Leguillon, "Comparison between models based on a coupled criterion for the prediction of the failure of adhesively bonded joints," *Eng. Fract. Mech.*, 138, 185-201, 2015.
- [7] S. Krenk, "Energy release rate of symmetric adhesive joints," *Eng. Fract. Mech.*, 43, 549-559, 1992.