

## Identification des paramètres de modèle de zone cohésive À partir d'un essai DCB - Analyse de sensibilité

**r.ly**, j.jumel, *Laboratoire I2M, UMR CNRS 52 95, 351 Cours de la libération, 33400 Talence. Téléphone : 05 40 00 22 73, Adresse(s) électronique(s) : racine.ly@u-bordeaux.fr, julien.jumel@u-bordeaux.fr*

**f.lavelle**, *Centre National d'Études Spatiales CNES/DLA, 52 rue Jacques Hillairet, 75612 Paris Cédex. Téléphone : 01 80 97 72 28, Adresse(s) électronique(s) : florian.lavelle@cnes.fr*

**Mots clés : DCB, Sensibilités, Loi de zone cohésive, Identification de paramètres, fonction  $\chi^2$**

### 1 INTRODUCTION

Le collage est une technique d'assemblage de plus en plus utilisée dans le monde industriel du fait des nombreux avantages qu'il procure dont l'aspect esthétique, la tenue mécanique et l'intégrité des pièces assemblées entre autres. Cette expansion est telle qu'il tend à rivaliser avec les méthodes de fixations mécaniques classiques telles que le rivetage et les points de soudure qui, contrairement au collage, établissent des points de contact localisés ce qui est synonyme de raideur plus faible. En effet, la résistance mécanique d'un assemblage collé équivaudrait à un rivet tous les millimètres sur les pièces à assembler donc à un déchirement certain.

Exploiter au maximum le potentiel des assemblages collés nécessite une bonne compréhension des mécanismes de rupture et de propagation des fissures dans la conception de la structure. Plusieurs travaux ont été faits ces quarante dernières années pour caractériser la résistance et la ténacité des joints collés en utilisant le concept de la mécanique linéaire de la rupture (LEFM)[1]. Cependant, pour assurer la validité de cette approche, les déformations qui précèdent la propagation de la fissure ne doivent pas être non-linéaires ou du moins macroscopiquement[2]. À partir de là, la ténacité de l'assemblage collé peut être mesurée à travers la courbe de la force appliquée en fonction de la déformation, pour peu que le comportement de la colle soit indépendant de la géométrie des pièces assemblées. Les géométries les plus utilisées pour le mode d'ouverture pure (Mode I) sont la configuration DCB<sup>1</sup> et sa variante, TDCB<sup>2</sup>.

Au vue de ces constats et du fait que ces assemblages sont souvent sujet à de fortes charges qui induisent à leur tour de forts moments de flexion : Les conditions de la LEFM ne sont plus valables dans ce contexte donc il va falloir recourir à des approches numériques pour caractériser le comportement du joint de colle. C'est de cette nécessité que provient l'approche des modèles de zones cohésives. Leur particularité est de fournir une description locale et discrète du mécanisme de rupture en reliant con-

<sup>1</sup>DCB : Double Cantilever Beam

<sup>2</sup>TDCB : Tapered Double Cantilver Beam

traintes locales et sauts de déplacement à l'interface via une loi de traction-séparation, ce qui permet de s'affranchir entre autre de la singularité de contraintes que préconise la LEFM. Les premiers travaux ont été esquissés par Dugdale D.S et Barenblatt G.I. Par la suite, plusieurs développements et applications récents ont été proposés notamment pour la caractérisation de joints de colle suivant différents modes de rupture. En ce qui concerne le mode I nous pouvons citer Alfano 2007 [4], Valoroso 2013[5].

Dans cet article, nous avons étudié un modèle de zone cohésif tri-linéaire avec cinq paramètres. L'objectif étant d'identifier ces paramètres à posteriori avec des données expérimentales synthétisées issues du résultat de la simulation d'un essai DCB auquel nous avons rajouté du bruit. Cette identification repose souvent sur la minimisation d'une fonction erreur  $\chi^2$  non linéaire. Le calcul des gradients et de la matrice jacobienne, ainsi que la linéarisation de la fonction  $\chi^2$  au voisinage du minimum, nous indique la précision attendue sur la valeur des paramètres estimés.

## 2 MODÈLE : SUBSTRATS ET LOI DE ZONE COHESIVE

Les substrats utilisés pour les essais DCB sont en alliage d'Aluminium-Zinc AW7075-T6 de module d'Young  $E = 70GPa$  et de limite d'élasticité  $\sigma_{yAL} = 503MPa$ . Afin d'éviter les déformations plastiques comme évoqué dans l'introduction, une épaisseur  $h = 5mm$  a été fixée. Les autres dimensions des substrats étant la largeur  $b = 25mm$  et la longueur  $L = 200mm$ . En outre, nous avons choisi de modéliser les substrats par des poutres de Timoshenko pour rendre compte de l'effet du cisaillement transverse contrairement à l'approche de Bernoulli.

En ce qui concerne le modèle de zone cohésive, nous cherchons à identifier ses paramètres ici, ( $E_a$ ,  $\sigma_y$  et  $\varepsilon_r$ ) ainsi que la précision avec laquelle elles peuvent être obtenues. Pour cela nous introduisons dans notre calcul les données mécaniques ci-dessous pour l'adhésif LOCTITE EA9395 AERO obtenues à travers une campagne d'essai suivant la norme standard ISO 527-2.

Loctite EA9395			
$E_a$ [GPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_r$ [MPa]	$\varepsilon_m$ [%]
4	18	62	30

Table 1: Caractéristiques mécaniques de la loi de zone cohésive - Adhésif EA9395

## 3 FONCTION $\chi^2$

L'objectif de la méthode du  $\chi^2$  est de trouver le jeu de paramètres qui minimise au mieux une fonction objectif qui représente la somme de la différence entre les forces expérimentale et numérique pour des pas de chargement identiques, et pondérée par l'inverse de l'écart-type sur la mesure. De ce fait, plus le vecteur des forces simulées se rapproche des données expérimentales, plus la valeur du  $\chi^2$  est faible. Et inversement, plus il s'en écarte plus la valeur du  $\chi^2$  est élevée dû à l'augmentation de l'erreur sur la mesure.

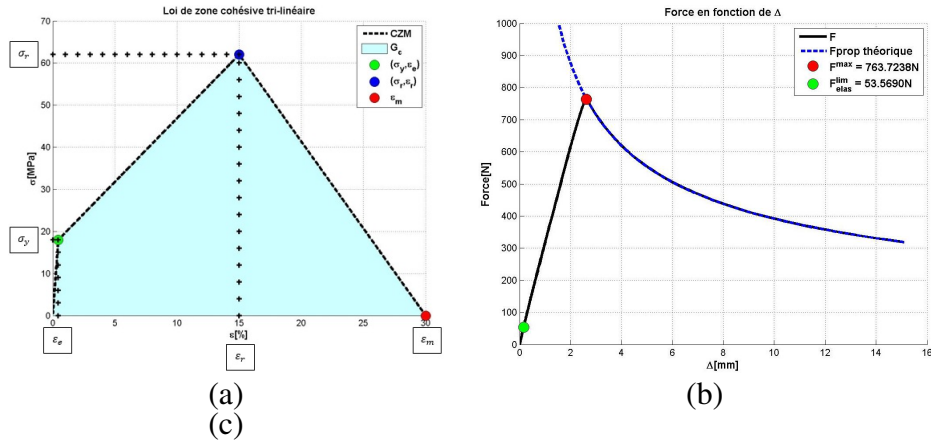


Figure 1: (a) : Loi de zone cohésive tri-linéaire, (b): Courbe  $F - \Delta$

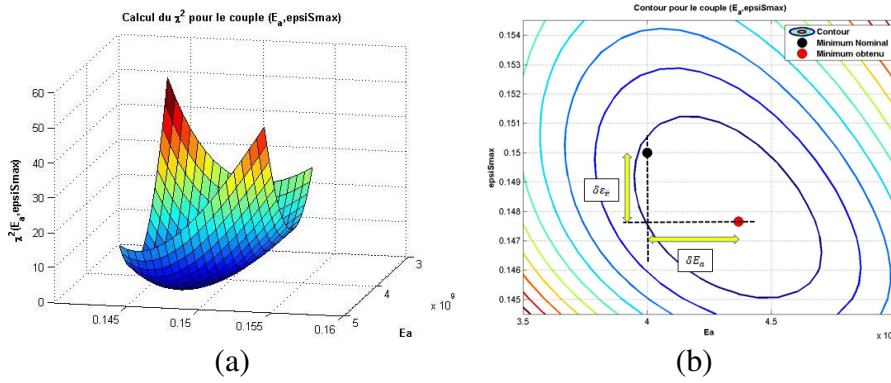


Figure 2: (a) :  $\chi^2$  de  $(E_a, \epsilon_r)$ , (b) : contour de  $(E_a, \epsilon_r)$

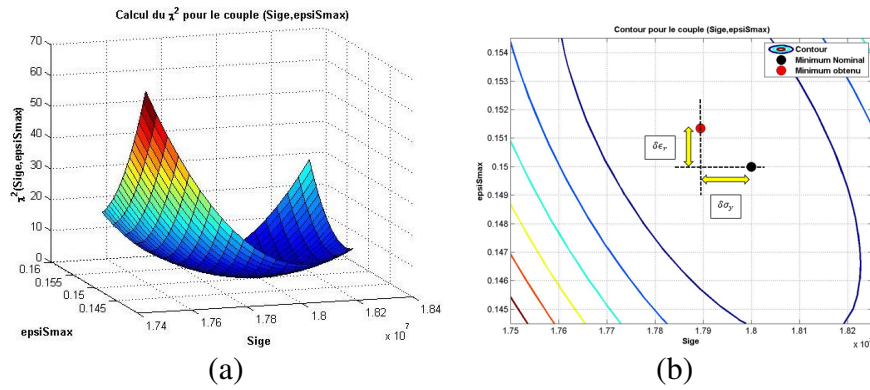


Figure 3: (a) :  $\chi^2$  de  $(\sigma_y, \epsilon_r)$ , (b) : contour de  $(\sigma_y, \epsilon_r)$

Dans cet article, nous avons illustré les deux jeux de paramètres suivants  $(E_a, \epsilon_r)$  et  $(\sigma_y, \epsilon_r)$  comme évoqué en section 2.2.

Ainsi pour le couple  $(E_a, \varepsilon_r)$ , le  $\chi^2_{min} = 0.066$  avec des écarts sur les paramètres de  $|\delta E_a| = 0.36 GPa$  et  $|\delta \varepsilon_r| = 0.0023$ . Alors que pour le second couple, le  $\chi^2_{min} = 0.033$  avec  $|\delta \sigma_y| = 0.105 MPa$  et  $|\delta \varepsilon_r| = 0.0013$ . Ces points ont été mesuré sur les courbes de contour. Toutefois, autour du minimum les variations du  $\chi^2$  peuvent être approchées par un développement limité à l'ordre 2. Cela abouti à une écriture matricielle comme proposée par Richard S. et al.[6] pour approximer les incertitudes sur les paramètres identifiés. À l'issue du calcul, nous obtenons un  $|\delta E_a| = 0.336 GPa$  et un  $|\delta \varepsilon_r| = 0.00234$  pour le premier couple. Tandis que pour le second, on obtient  $|\delta \sigma_y| = 0.107 MPa$  et  $|\delta \varepsilon_r| = 0.00134$

#### 4 DISCUSSIONS

L'identification des paramètres choisis de la loi cohésive s'est faite par la minimisation de la fonction  $\chi^2$ . L'une des méthodes employées a été de tracer sa courbe de niveaux sur le plan des paramètres et de mesurer l'écart entre les valeurs de paramètres qui réalisent le minimum et celles nominales. Les écarts obtenus sont une réalisation des incertitudes sur ces paramètres, au sens qu'elles dépendent de la valeur du  $\Delta \chi^2$  obtenue par la loi  $\Gamma$  incomplète inversée. La seconde méthode a été de linéariser le  $\chi^2$  autour du minimum par un développement limité d'ordre 2. À l'issue de ces deux approches, les incertitudes sur l'identification des deux couples  $(\sigma_y, \varepsilon_r)$  et  $(E_a, \varepsilon_r)$  selon les deux méthodes sont quasi-identiques. Ici, les grandeurs macroscopiques qui ont été exploitées sont la force  $\bar{F}$  et l'écartement en bout d'éprouvette  $\Delta$ . Dès lors que les résultats obtenus avec la minimisation de la fonction  $\chi^2$  sont satisfaisants, il est licite d'envisager de les appliquer sur d'autres grandeurs macroscopiques telles que  $G(\theta)$ .

#### References

- [1] Gledhill RA. Kinloch AJ. Yomani S and Young RS. Relationships between mechanical properties of and crack propagation in epoxy resin adhesives. *Polymer*, 19:574–582, 1978.
- [2] Cavalli MN. Thouless MD. The effect of damage nucleation on the toughness of an adhesive joint. *Journal of Adhesion*, 00:1–18, 2000.
- [3] Li S. Thouless MD. Waas AM. Schroeder JA. Zavattieri PD. Use of mode I cohesive-zone models to describe the fracture of an adhesively-bonded polymer-matrix composite. *Composites science and technology*, 65:281–293, 2005.
- [4] Alfano M. Furguielea F. Leonardia A. Malettaa C. Paulino GH. Fracture analysis of adhesive joints using intrinsic cohesive zone models. *Atti del Congresso IGF19*, pages 77–84, 2007.
- [5] Richerd McGowan S. Caroline Smith L. Catherine Browman P and Bruce Kay A. Methods for least-squares parameter identification for articulatory movement and the program parfit. *Haskins Laboratories Status Report on Speech Research*, 101:220–230, 1990.