

Dimensionnement d'un berceau moteur multi-matériaux collé

A. Benali^{1,3}, C. Cellard², L. Sohier², A. Moretti³, R. Créac'hcadec¹

¹ IRDL, UMR CNRS 6027, ENSTA Bretagne, Brest, France. {amen.benali, romain.creac'hcadec}@ensta-bretagne.{org, fr}

² IRDL, UMR CNRS 6027, Université de Bretagne Occidentale, Brest, France. {christophe.cellard, laurent.sohier}@univ-brest.fr

³ Engineering Conception Maintenance, Paris, France. {amen.ben-ali, alexandre.moretti}@ecm-be.com

Résumé — La méthode des éléments finis permet à l'ingénieur de déterminer la distribution des contraintes et de concevoir des joints collés. La présence de contraintes élevées qui résident dans le coin de l'interface, connues sous le nom d'effets de bord, peut compromettre la résistance de la structure. Pour les configurations de joints complexes, la méthode des éléments finis peut être assez coûteuse. L'approche proposée a amélioré les performances et le modèle plus rapide que le modèle d'assemblage conventionnel.

Mots clefs — assemblage collé, réduction du temps de calcul, effet de bord.

1. Introduction

L'utilisation du collage structural, en remplaçant les solutions conventionnelles d'assemblage, présente un gain potentiel en allègement des structures. Le gain potentiel est également indirect car le collage étant un procédé mieux adapté aux structures composites, il permet de généraliser l'utilisation de ces nouveaux matériaux. Néanmoins, le manque de compréhension des phénomènes physiques, qui gèrent la résistance des assemblages collés, impose de développer une approche de dimensionnement fiable et robuste qui prend en compte ces phénomènes. L'une des problématiques de conception des assemblages collés est la concentration des contraintes au bord libre du joint de colle générée par des effets de bord. On s'intéresse dans cette étude à optimiser la modélisation tout en tenant compte de ces effets à proximité des extrémités des joints collés qui peuvent causer des ruptures prématurées des assemblages.

L'objectif de cette étude est de réaliser un modèle 3D par éléments finis comme première phase préliminaire à la conception d'un berceau moteur multi-matériaux collé avec un adhésif époxy. Des études précédentes sur la caractérisation de cet adhésif ont été réalisées [1, 2]. Le calcul de telles structures est compliqué par la présence d'effets de bord près du bord libre du joint adhésif. Ces effets sont difficiles à saisir numériquement et nécessitent des raffinements de maillage importants qui rendent le calcul de telles structures très difficile en pratique [3]. La méthode proposée ici pour analyser ces effets de bord consiste à représenter numériquement l'effet de bord en utilisant un gradient de propriétés mécaniques pour l'adhésif. L'information liée aux effets de bord n'est plus corrélée au maillage, mais à des scalaires de la loi de comportement du joint adhésif. Cet artifice permet de limiter le coût de calcul et rend ainsi possible l'analyse des effets de bord pour les grandes structures industrielles.

2. Présentation de modèle éléments finis

2.1. Effet de bord dans des structures collées sous charge de traction

Cette étude préliminaire a pour but d'analyser les effets de bord d'un joint droit sous charge de traction qui présente un fort effet de bord. Dans le but d'identifier l'état de contrainte de Mises à l'interface avec un élément unique à travers l'épaisseur de la colle via une corrélation avec un maillage raffiné (80 éléments et 40 éléments). Pour cette raison, nous utilisons un gradient de module utilisant des sous-routines pour faire cette équivalence numérique. Dans un premier temps, l'implémentation de fonction module est présentée. Ensuite, nous introduisons la mise en œuvre numérique et le processus d'identification. Finalement, nous discutons les résultats de l'identification.

2.2. Étude préliminaire en 2D

Cette étude traite une éprouvette Arcan chargée en traction ($\gamma=0^\circ$) et en cisaillement ($\gamma=90^\circ$) (voir figure 1). En effet, dans cette étude, un modèle 2D est utilisé pour décrire les effets de bord d'un assemblage. L'utilisation de ce modèle dans un cadre industriel a pour but de répondre aux besoins d'un Bureau d'Études, notamment en terme de coût de calculs.

2.3. Implémentation de la fonction module : implémentation de sous-routine

2.3.1. Implémentation dans le modèle 2D

Cette étude s'est concentrée sur l'analyse numérique du comportement au bord du joint de colle à bord droit. Notre référence est l'étude des effets de bord de Cognard en 2008 [3]. Les simulations numériques par éléments finis présentées ont été réalisées tout d'abord en 2D sous l'hypothèse d'élasticité linéaire (voir figure 2). Les essais de type Arcan ont été mis en place pour étudier la répartition des contraintes au sein du joint adhésif. Dans un premier temps, les résultats sur la convergence des contraintes des analyses en 2D sont établis pour identifier le maillage approprié pour ce modèle puis la singularité est évaluée. Cette étude évalue la contrainte (champ ou distribution) et l'existence de singularités en bord libre. Les contraintes de von Mises en fonction de la densité de maillage sont présentées dans la figure 4. Les contraintes de von Mises convergent au niveau du bord libre de joint de colle pour 16 éléments dans l'épaisseur (points P2 et P3). Cependant, au bord supérieur de l'interface (point P1), elle présente une singularité.

Ici, nous supposons que le module d'élasticité varie le long de joint de colle. Le choix de la fonction est basé sur la forme exponentielle de la distribution des contraintes de Mises le long de la longueur de recouvrement. Le coefficient de Poisson est supposé constant et égal à 0,3 pour l'adhésif et l'adhérent. En considérant les propriétés de l'adhésif et le substrat aluminium tel que dans le tableau 1. Le module E varie en fonction des scalaires qui indiquent le profil de variation du module à travers la longueur de recouvrement. La variation du module à travers l'épaisseur peut être ignorée dans un premier temps. Le sous-programme défini (sous-routine : Umat) est utilisé pour modéliser l'adhésif. Le sous-programme est développé et appliqué pour caractériser les effets de bord en utilisant la distribution des contraintes de Mises au niveau de l'interface. Des scripts Python ont été créés et appelés depuis MATLAB pour exécuter des simulations et extraire les informations requises des résultats de simulation. Les modèles éléments finis en 2D ont été combinés avec l'algorithme génétique (GA) afin de déterminer la fonction optimale pour décrire l'effet de bord (voir figure 5).

2.3.2. Implémentation dans le modèle 3D

Dans cette partie on considère un élément de volume cubique représentatif pour l'éprouvette d'Arcan. Les dimensions de cet élément sont réduites avec un facteur de 10. Une longueur de recouvrement réduite de facteur de 10. Cet élément représentatif est utilisé par souci de simplification pour l'implémentation de la fonction module. Les simulations numériques par éléments finis pour le modèle 3D sont la suite de l'étude faite en 2D sous l'hypothèse d'élasticité linéaire (voir figure 3). Le

principe d'implémentation de fonction module reste le même. Les conditions aux limites et le chargement sont similaires avec une symétrie selon x et y. pour le modèle 3D on utilise 40 élément dans l'épaisseur

3. Présentation des résultats

Dans cette partie nous cherchons à décrire le comportement des effets de bord avec moins d'éléments dans l'épaisseur. Des simulations numériques ont été réalisées avec une attention particulière aux effets de bord. Une concentration importante de contraintes au bord libre (point P1) caractérise les joints collés. Ce paramètre de conception critique est pris en compte dans ces travaux et nous proposons une nouvelle approche qui réduit le temps de calcul et optimise la modélisation numérique des assemblages collés. L'approche est basée sur l'analyse des contraintes sur des éprouvettes Arcan en aluminium. Nous développons une méthode des éléments finis sous l'hypothèse d'élasticité linéaire pour décrire les effets de bord avec un minimum d'élément à travers l'épaisseur de l'adhésif en utilisant les sous-programmes Abaqus (UMat). La subroutine UMat est utilisée pour implémenter la graduation du module d'Young. La fonction du module d'Young varie de façon exponentielle en fonction de la longueur de recouvrement (x). L'identification des résultats se fait par le couplage algorithme génétique (GA) et UMat. La contrainte de von Mises au niveau de l'interface du joint adhésif a été utilisée pour déterminer les coefficients scalaires de la fonction du module d'Young pour décrire le comportement d'un joint à géométrie de bord droit en traction et en cisaillement.

3.1. Résultats d'identification en 2D

Au tout début de l'analyse par éléments finis, nous présentons l'état de contrainte pour les deux maillages rectangulaires considérés (80 éléments représentant le modèle de Jean Yves Cognard [1] et 1 élément). Sur les figures 6 (a) et (b) les contraintes de von Mises normalisées sont présentées sur un chemin de nœud passant par l'interface pour les deux maillages différents : 80 éléments et 1 élément à travers l'épaisseur de colle. Les deux maillages avaient le même nombre de nœuds au plan d'interface. En effet, la plus grande concentration de contraintes a été observée pour le maillage fin (80 éléments). La distribution à 1 élément ne fournit aucune concentration de contraintes aux interfaces. On peut affirmer que la discrétisation avec un seul élément à travers l'épaisseur de l'adhésif est incapable de détecter la concentration de contraintes au bord libre (point P1). Près du bord libre, le maillage fin est nécessaire pour détecter la singularité de la contrainte. La figure 5 (c) montre les résultats avec l'identification. On obtient un profil similaire pour la distribution des contraintes pour ces maillages. Dans les deux modèles fournis, aucune différence significative dans la distribution des contraintes de von Mises n'a été observée. Pour notre nouveau modèle, une contrainte maximale a été observée au bord libre de la zone de recouvrement comme elle était supposée l'être dans les structures collées (voir figures 5 (b) et (c)).

3.2. Résultats d'identification en 3D

Dans cette partie on considère un élément de volume cubique représentatif pour l'éprouvette d'Arcan (figure 3). Dans la figure 3 (a), nous présentons la géométrie du modèle les deux maillages rectangulaires considérés (40 éléments présentés en figure 3 (b) et 1 élément présentés en figure 3 (c)). Sur les figures 6 (a) et (b) les contraintes de von Mises normalisées sont présentées pour la surface au niveau l'interface pour les deux maillages différents : 40 éléments et 1 élément à travers l'épaisseur de colle. Les résultats sur la figure 6, issus de l'identification d'une fonction de module d'élasticité, montrent la même tendance de contraintes von Mises pour 40 éléments que pour 1 éléments dans l'épaisseur. D'un point de vue qualitatif, nous pouvons affirmer que notre modèle reproduit le même état de contraintes que le modèle avec 40 éléments dans l'épaisseur. Le résultat de première identification confirme qu'il est possible de déterminer le comportement au bord du joint adhésif avec un seul élément dans l'épaisseur. Ces résultats montrent la faisabilité de notre méthode

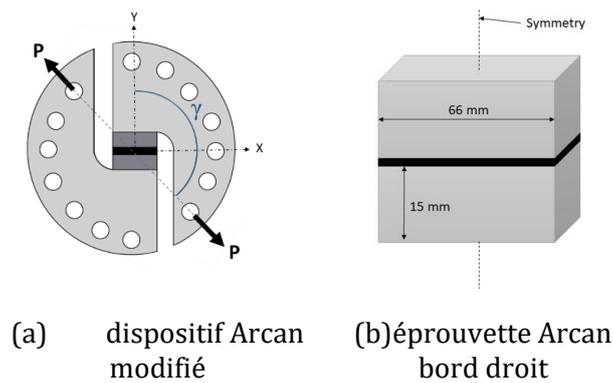
dimensionnement numérique avec un nombre minimum d'éléments dans l'épaisseur de l'adhésif sans compromettre l'efficacité du modèle (précision > 80% en 2D).

Cette approche fournit des prédictions toujours précises pour le joint étudié sous une charge de traction. Les résultats obtenus pour la condition de chargement considérée indiquent que les effets de bord régissent le comportement mécanique de la structure collée. Ces résultats sont vraiment compétents pour cette première étude. Ainsi, on peut conclure que les résultats obtenus avec les contraintes de von Mises donnent une base pour un outil de conception de structure collée avec des effets de bord. L'approche proposée a amélioré les performances et le modèle est pratiquement 3 fois plus rapide que le modèle d'assemblage conventionnel.

En prospective la fonction du module d'Young doit être optimisée avec une variation suivant l'épaisseur. Enfin, il reste encore beaucoup à faire en utilisant des modèles de joints pour mieux comprendre la conception des assemblages collés avec des colles à gradient de propriétés.

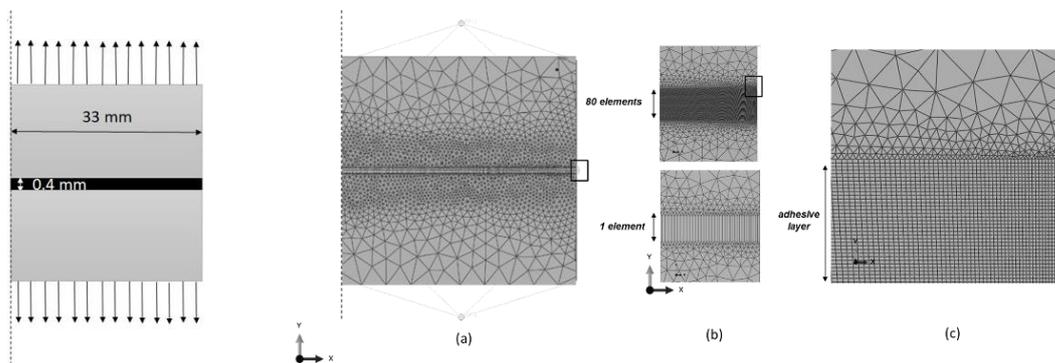
4. Équations, figures et références

4.1. Figures



(a) dispositif Arcan modifié (b) éprouvette Arcan bord droit

Fig.1 Présentation de dispositif Arcan



(a) dimensions et conditions aux limites

(b) maillage du modèle 2d

Fig.2 Présentation du modèle 2D

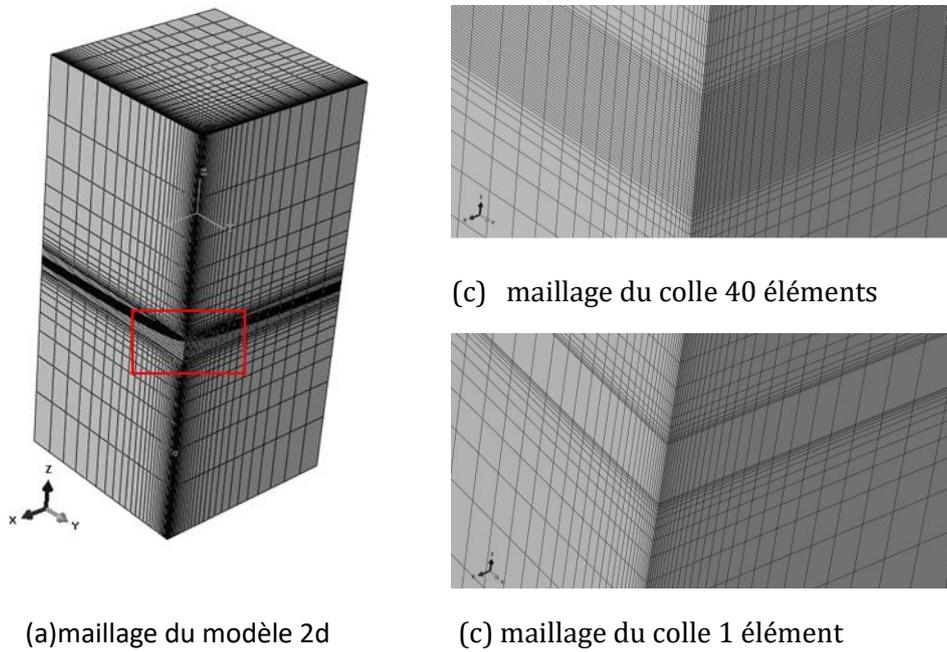


Fig.3 Présentation du modèle 3D

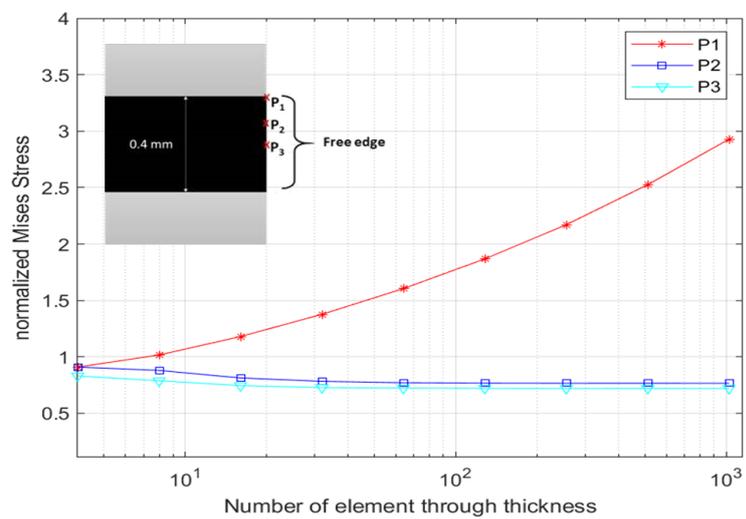


Fig.4 Evolution de la contrainte de von Mises en fonction de la densité de maillage au niveau de trois points en bord libre de joint de colle

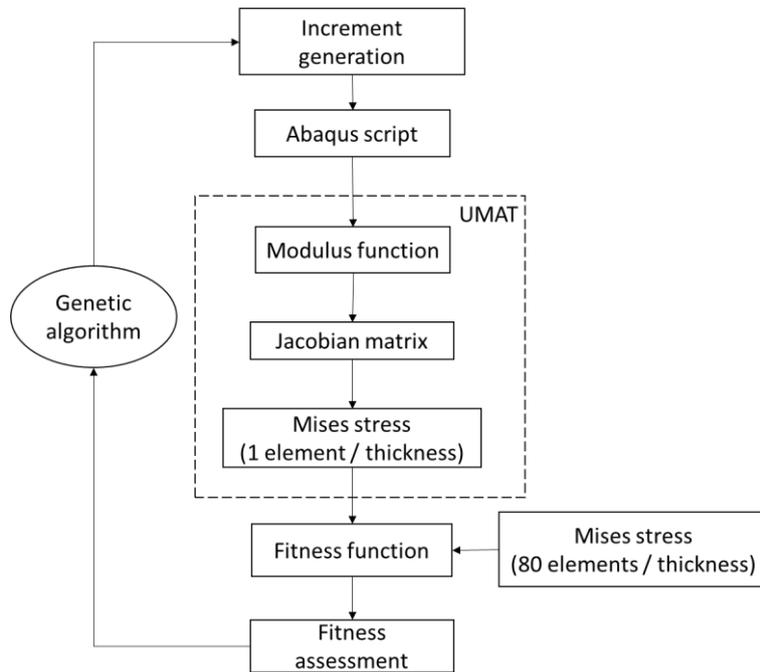


Fig.5 Procédure d'identification inverse pour déterminer les paramètres de la fonction du module d'Young

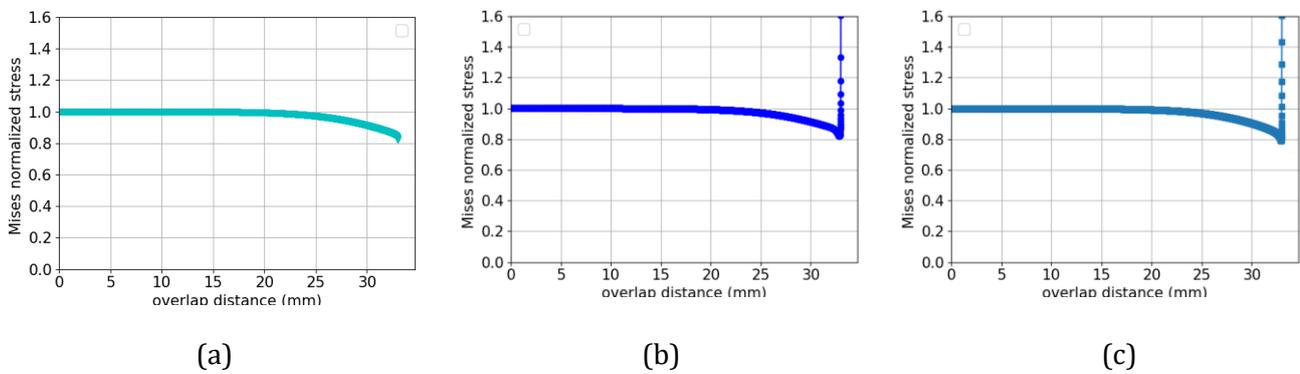
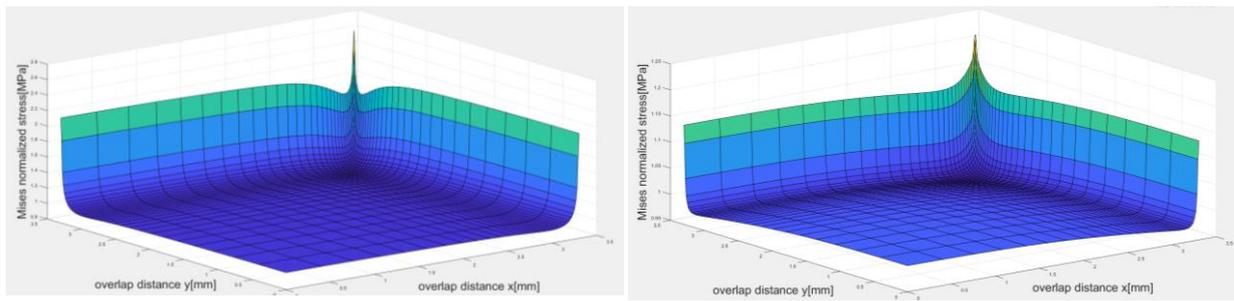


Fig.6 Distribution **2D** des contraintes de von Mises à l'interface colle \ substrat : (a) 40 éléments dans l'épaisseur du joint de colle (b) 1 élément avec la fonction du module d'Young identifiée



(a)

(b)

Fig.7 Distribution **3D** des contraintes de von Mises à l'interface colle \ substrat : (a) 40 éléments dans l'épaisseur du joint de colle (b) 1 élément avec la fonction du module d'Young identifiée

4.2. Tableaux

Table 1 – Propriétés élastiques des matériaux

	E (GPa)	ν
aluminum	80	0.3
araldite 420	2.2	0.3

Table 2 – Comparaison de temps de calcula après identification

Temps CPU(s)	Maillage fin	1 élément/épaisseur
Modèle 2D	18	7
Modèle 3D	76	30

2.3. Références bibliographiques

- [1] R. Créac'Hcadeac, J-Y. Cognard, and L. Sohier. JNC 16. AMAC, 2009.
- [2] Sohier, L., Cognard, J. Y., & Davies, P. (2013). Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 53, 65-74.
- [3] J.Y. Cognard, Computers & Structures (2008), Volume 86, Issues 17–18, Pages 1704- 1717.