

Un modèle Global/Local d'amorçage d'endommagement pour le prédimensionnement de structures composites de lanceurs spatiaux en présence de défauts.

A Global/Local defect/damage initiation model for launcher composite structures pre-sizing

Hélène BRUNET^{1,2}, Alexy TAILLEUR^{1,2}, Kevin MATHIS², Ange ROGANI³, Pablo NAVARRO¹, Steven MARGUET¹, Claire MOREL¹, Jean-François FERRERO¹

1 : Université de Toulouse, Institut Clément Ader
UMR CNRS 5312, INSA/ISAE/Mines Albi/UPS
3 rue Caroline Aigle, 31400 Toulouse

e-mail : helene.brunet@univ-tlse3.fr, alexy.tailleur@univ-tlse3.fr, pablo.navarro@univ-tlse3.fr, steven.marguet@univ-tlse3.fr, claire.morel@univ-tlse3.fr et jean-francois.ferrero@univ-tlse3.fr

2 : Direction Des Lanceurs, Centre National d'Etudes Spatiales
52 Rue Jacques Hillairet - 75012 Paris, France
e-mail : kevin.mathis@cnes.fr

3 : CT Ingenierie
24 Bd Deodat de Sévérac - 31770 Colomiers, France
e-mail : ange.rogani@ctingenierie.com

Résumé

Cet article traite de la mise en œuvre d'une approche numérique globale/locale pour prédire l'amorçage d'endommagement dans les structures composites stratifiées de grandes dimensions, en présence de défauts initiaux. L'objectif de cette méthode est de pouvoir prendre en compte ces défauts et dommages le plus tôt possible dans la phase de développement du lanceur. Des travaux présentés précédemment ont établi les interpolations 2D et 3D nécessaires pour passer du maillage 2D coque grossier global au maillage 3D fin de la zone locale sur laquelle les dommages sont étudiés. Ce papier présente les méthodes retenues pour l'introduction de défauts initiaux dans le modèle numérique, basées sur l'utilisation de variables d'endommagement. Des simulations d'essais de flexion 4 points sont menées pour étudier l'amorçage d'endommagement sur le modèle avec des défauts initiaux. Ces résultats sont alors comparés avec des résultats d'essais menés sur des éprouvettes pré-endommagées à l'aide d'impacts à la masse tombante pour évaluer la pertinence de la méthode.

Abstract

This article deals with the implementation of a global/local numerical approach to predict damage initiation in large laminated composite structures, in the presence of initial defects. The aim of this method is to be able to take these defects and damage into account as early as possible in the launcher development phase. Previous work has established the 2D and 3D interpolations required to go from the coarse global 2D shell mesh to the fine 3D mesh of the local zone over which the damage is studied. This paper presents the methods used to introduce initial defects into the numerical model, based on the use of damage variables. Simulations of 4-point bending tests are carried out to study damage initiation on the model with initial defects. These results are then compared with the results of tests carried out on pre-damaged specimens using falling mass impacts to assess the relevance of the method.

Mots Clés : sous-modélisation, endommagement, amorçage, validation expérimentale

Keywords : submodelling, damage, initiation, experimental validation

1. Introduction

La part de matériaux composites au sein des lanceurs spatiaux ne cesse d'augmenter, du fait des gains de masse qu'ils permettent. Dès lors, il devient nécessaire de développer des méthodes pour prendre

en compte les défauts et dommages dans ces structures dès la phase de prédimensionnement, avec une exigence de rapidité de calcul. Les approches globales/locales sont dans ce cadre une solution intéressante pour étudier l’amorçage et la propagation de défauts locaux dans des structures de grandes dimensions.

1.1. Outil de dimensionnement COLIBRI

Ces travaux s’inscrivent dans le cadre du développement de la plateforme COLIBRI, mise en oeuvre par le CNES lors de la conception et le dimensionnement des structures composites stratifiées des lanceurs spatiaux. Les défauts de fabrication et d’exploitation ainsi que l’endommagement sont pris en compte à la fin du processus de dimensionnement, une fois que l’architecture est fixée. La structure retenue est alors optimale au regard des spécifications choisies, mais pas nécessairement la plus à même de supporter la présence de défauts ou de tolérer de l’endommagement. Prendre en compte ces phénomènes en amont, dès la phase de prédimensionnement, est donc un enjeu important.

Les structures dimensionnées à l’aide de COLIBRI présentent de grandes dimensions. Par ailleurs, des études préalables ont démontré la nécessité de prendre en compte le délaminage à l’aide d’éléments cohésifs dans un modèle 3D. Il n’est pas possible de réaliser des études d’amorçage et de propagation de défauts sur les structures complètes en conservant des temps de calcul raisonnables.

1.2. Approche globale/locale développée

Dans ce cadre, de précédents travaux [1] ont permis de développer une approche globale/locale descendante à couplage lâche, adaptée au prédimensionnement de grandes structures de lanceurs. Cette méthode est basée sur un raffinement du maillage dans la zone locale d’étude des défauts, avec une interpolation des champs de déplacements 2D basée sur un polynôme du quatrième ordre. [2] L’interpolation 3D, quant à elle, repose sur la théorie de Reissner-Mindlin, enrichie à l’aide de coefficients de correction pour mieux rendre compte des effets du cisaillement transverse. [3]. Cette nouvelle méthode de sous-modélisation a permis d’obtenir de bons résultats par rapport à un maillage fin de toute la structure, tout en conservant un temps de calcul acceptable dans le cadre du prédimensionnement. Une attention particulière doit toutefois être portée sur la génération du maillage 3D qui peut être chronophage.

1.3. Introduction des défauts au sein du modèle

Les défauts pris en compte au sein du modèle sont le délaminage, la fissuration matricielle transverse, les vides intra-plis et la rupture de fibre.

1.3.1. Représentation du délaminage

L’approche classique basée sur des éléments cohésifs a été choisie pour la représentation du délaminage. [4, 5, 6] Des éléments cohésifs d’épaisseur nulle sont introduits entre les plis d’orientation différentes du stratifié. Leur comportement est régi par une loi de traction séparation bilinéaire. Pour représenter des défauts préexistants à l’interface entre les plis, une variable d’endommagement d_{int} est introduite, permettant de simuler la perte de raideur des éléments cohésifs :

$$\begin{cases} K_{I,endo} = (1 - d_{int})K_I^0 \\ K_{II,endo} = (1 - d_{int})K_{II}^0 \end{cases} \quad (\text{Eq. 1})$$

Le critère d’amorçage retenu permettant de prédire l’apparition de délaminage est celui de Brewer & Lagace [7] :

$$\left(\frac{\langle\sigma_{33}\rangle}{Z_T}\right)^2 + \left(\frac{\langle-\sigma_{33}\rangle}{Z_C}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 \leq 1 \quad (\text{Eq. 2})$$

1.3.2. Représentation de l'endommagement intralaminaire et de la rupture de fibre

La fissuration matricielle transverse, les vides intra-plis et la rupture de fibres sont également modélisés à l'aide de variables d'endommagement d_l , d_t et d_{lt} permettant de réduire les admissibles matériaux. [8] Elles permettent de représenter respectivement l'endommagement dans le sens longitudinal, transverse et cisaillement plan dans le repère du pli. Ces variables évoluent entre 0 et 1, 0 correspondant à un élément sain et 1 à un élément complètement endommagé. Les équations Eq. 3 permettent de décrire les propriétés d'un élément 3D endommagé :

$$\begin{aligned}
 E_{11,endo} &= (1 - d_l)E_{11,0} \\
 E_{22,endo} &= (1 - d_t)E_{22,0} \\
 E_{33,endo} &= (1 - d_t)E_{33,0} \\
 G_{12,endo} &= (1 - d_{lt})G_{12,0} \\
 G_{23,endo} &= (1 - d_t)G_{23,0} \\
 G_{13,endo} &= (1 - d_l)G_{13,0} \\
 \nu_{12,endo} &= (1 - d_l)\nu_{12,0} \\
 \nu_{23,endo} &= (1 - d_t)\nu_{23,0} \\
 \nu_{13,endo} &= (1 - d_l)\nu_{13,0}
 \end{aligned} \tag{Eq. 3}$$

Pour prévoir l'apparition de ces différents modes d'endommagement, les critères de Hashin avec prise en compte des phénomènes hors plan ont été retenus. [9] Ils permettent par ailleurs d'identifier les modes de rupture séparément. Les équations Eq. 4 et Eq. 5 permettent respectivement de prédire la rupture de la matrice en traction et en compression. Les équations Eq. 6 et Eq. 7 permettent quant à elles respectivement de prédire la rupture translaminaire de fibres en traction et la rupture de fibres en compression.

$$\left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_T} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_T^2} \right) + \left(\frac{\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2}{S_{12}^2} \right) \leq 1 \tag{Eq. 4}$$

$$\left[\left(\frac{Y_C}{2S_T} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_C} + \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2S_T} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}^2 + \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_T^2} \right) + \left(\frac{\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2}{S_{12}^2} \right) \leq 1 \tag{Eq. 5}$$

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_t} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} \right) \leq 1 \tag{Eq. 6}$$

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_c} \right)^2 \leq 1 \tag{Eq. 7}$$

2. Validation expérimentale de l'amorçage de l'endommagement

L'objectif de l'approche est de pouvoir prédire les sites d'amorçage d'endommagement, connaissant les zones présentant des défauts initiaux. Pour cela, une campagne de validation expérimentale a été menée. Des stratifiés croisés de 32 plis ($[(90, 0)_{16}]_s$) de Carbone T700 / Cyanate Ester ont été fabriqués, au sein desquels ont été prélevées des éprouvettes parallélépipédiques de dimensions 280mm × 60mm × 4.16mm.

2.1. Introduction de défauts initiaux

Afin d'inclure des défauts initiaux, les éprouvettes ont été pré-endommagées en réalisant un impact au poids tombant à l'aide d'une tour de chute. Ces éprouvettes étant par la suite sollicitées en flexion 4 points pour observer l'amorçage d'endommagement, deux sites d'impact ont été choisis : l'un situé entre les deux poinçons, zone dans laquelle l'éprouvette sollicitée sera soumise à de la flexion pure, et

l'un situé entre un poinçon et un appui, où l'éprouvette sera soumise à des sollicitations de cisaillement et de flexion. Cette procédure est représentée sur la Figure 1 :

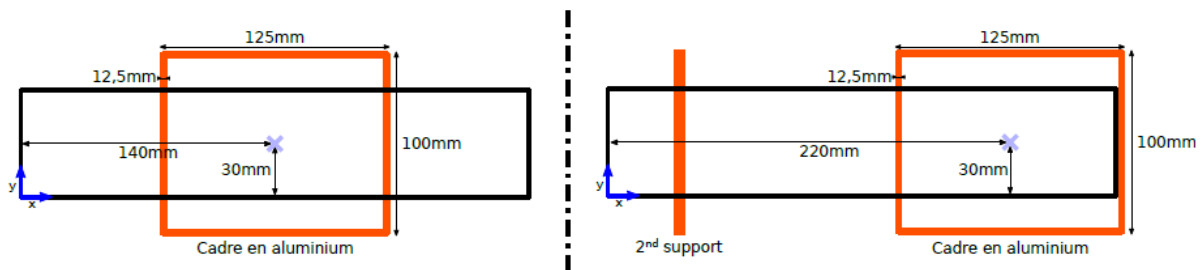


FIG. 1. – Schéma des configurations de pré-endommagement des éprouvettes [2]

Les plaques ont été posées en appui simple sur un cadre en aluminium puis impactées avec un impacteur en acier hémisphérique de 2kg et de diamètre 16mm. La recherche de l'énergie d'impact engendrant des Barely Visible Impact Damage (BVID) s'est effectuée via des impacts successifs d'énergie croissante sur une éprouvette de chaque configuration. Pour les impacts entre les deux poinçons centraux, l'endommagement apparaît pour des énergies d'impact de 6J et 8J. Pour les sites d'impact entre un appui et un poinçon, l'énergie nécessaire à la création d'endommagement se situe à 10J. Cette différence s'explique par la variation de conditions aux limites entre les deux configurations. Des tomographies des éprouvettes ont été réalisées après chaque impact afin de déterminer leur état d'endommagement. Un tomographe à rayons X permet alors d'obtenir ces informations sur une zone d'environ 57mmx50mm centrée autour du point d'impact avec une résolution de 14 μ m. Un exemple de tomographie post impact est visible sur la Figure 2 :

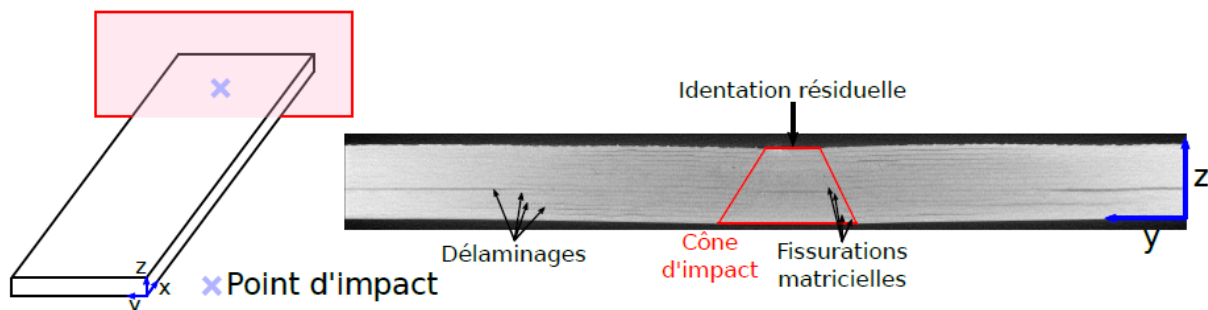


FIG. 2. – Tomographie d'une éprouvette post impact - coupe suivant X [2]

On observe des délaminages et des fissurations matricielles. On cherche désormais à rendre compte de ces défauts dans le modèle numérique afin de générer un modèle pré-endommagé.

2.2. Introduction de défauts dans le modèle local

Un modèle global aux dimensions de l'éprouvette a été créé, dans l'objectif de simuler un essai de flexion 4 points. Un zone de 50mm \times 50mm est alors extraite du modèle global. Elle comprend à la fois la zone d'intérêt autour du cône d'impact et la zone de transition nécessaire pour mitiger les effets du raffinement du maillage [1, 2].

Un post-traitement via des méthodes de traitement d'image est appliqué aux tomographies des éprouvettes impactées, de façon à récupérer une image binaire non déformée. Les pixels blancs correspondent à de l'endommagement. A partir de ces tomographies post-traitées, on réalise des projections dans les différents plans de l'éprouvette afin de pouvoir déterminer les variables d'endommagement d_l , d_t , d_{lt} et d_{int} . Une attention particulière a été portée à la représentation de la forme des endommagements

à l'aide d'une méthode de double interpolation, ce qui a notamment permis de mieux séparer les fissurations matricielles du délaminage dans les projections. Cependant, les fissurations matricielles ne sont pas aisément détectables à l'aide des méthodes de calcul de la variable d_t implémentées. Une fois les variables d'endommagement déterminées, elles sont introduites dans le modèle local afin de pouvoir réaliser une simulation d'essai de flexion 4 points sur des éprouvettes pré-endommagées. Une illustration du modèle éléments finis local avec les défauts initiaux est visible en Figure 3 :

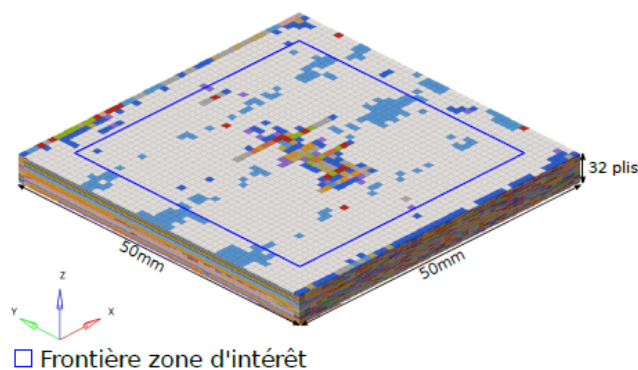


FIG. 3. – Modèle éléments finis local endommagé de l'essai de flexion 4 points [2]

Afin de ne pas créer une propriété pour chaque valeur de variable d'endommagement, un ensemble fini de valeurs a été considéré. Sur la Figure 3, chaque couleur correspond à un niveau d'endommagement différent, les éléments en blanc ayant un niveau d'endommagement nul.

2.3. Simulation de l'essai de flexion 4 points

Les éprouvettes subissent des tomographies avant et après l'essai de flexion 4 points, et les variables d'endommagement sont calculées à ces deux moments. Une simulation de flexion 4 points est ensuite menée sur le modèle de l'éprouvette pré-endommagée, afin de comparer les résultats obtenus avec ceux issus des essais de flexion réels. Il est alors possible de comparer l'évolution des variables d'endommagement obtenues expérimentalement avec les indices de ruptures donnés par le modèle.

2.4. Comparaison essais/calcul

L'approche globale/locale descendante développée permet de prédire les sites d'endommagement observés expérimentalement. Les résultats numériques ont tendance à être conservatifs. Par ailleurs, le modèle développé ne permet pour le moment de prendre en compte que l'amorçage des endommagements, et pas leur propagation. Ainsi, certains endommagements comme le délaminage induit par la propagation d'une rupture intralaminare n'apparaît pas avec la méthode numérique. Cependant on constate que cette dernière rend bien compte d'un endommagement intralaminare dans le pli adjacent, qui est un signe avant-coureur d'un délaminage.

2.5. Implémentation d'une boucle de retour

Dans l'avenir, une boucle de retour sera implémentée afin de permettre un dialogue entre le modèle local et le modèle global. Cela doit permettre d'étudier l'influence sur la structure globale d'un défaut ayant un impact sur la raideur globale, ainsi que d'étudier la propagation des défauts. Comme vu précédemment, cela pourrait être particulièrement important pour la prise en compte des délaminages consécutifs à la fissuration matricielle transverse, ainsi que dans le cadre industriel de la réutilisation des lanceurs.

Références

- [1] A. Tailleur, K. Mathis, P. Navarro, S. Marguet, J.-F. Ferrero, A. Rogani « Models for conference proceedings », in : JNC23 : Journées Nationales sur les Composites 2023, Besançon, France, , pp. , 2023.
- [2] A. Tailleur « Développement d'une approche numérique Global/Local pour la prise en compte de dommages lors du prédimensionnement de structures composites de grandes dimensions », Ph.D. thesis, Institut Clément Ader - Université Toulouse III Paul Sabatier, 2024.
- [3] D. Gay, Matériaux composites, Lavoisier, Paris, 6e édition revue et augmentée edn., 2015.
- [4] G. Barenblatt « The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks », *Journal of Applied Mathematics and Mechanics* Vol. 23 n° 3, pp. 622–636, 1959, ISSN 0021-8928.
- [5] G. Barenblatt « The Mathematical Theory of Equilibrium Cracks in Brittle Fracture », vol. 7 of *Advances in Applied Mechanics*, Elsevier, , pp. 55–129, 1962.
- [6] D. Dugdale « Yielding of steel sheets containing slits », *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* Vol. 8 n° 2, pp. 100–104, 1960, ISSN 0022-5096.
- [7] J. C. Brewer, P. A. Lagace « Quadratic Stress Criterion for Initiation of Delamination », *Journal of Composite Materials* Vol. 22 n° 12, pp. 1141–1155, 1988.
- [8] E. Abisset « Un mésomodèle d'endommagement des composites stratifiés pour le virtual testing : identification et validation », Ph.D. thesis, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2012.
- [9] Z. Hashin « Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites », *Journal of Applied Mechanics* Vol. 47 n° 2, pp. 329–334, 1980, ISSN 0021-8936.