Construction d'une base de données éléments finis pour l'identification des paramètres d'un modèle d'endommagement mésoscopique d'un composite stratifié AS4/8552

Sujet de stage de Master 2 / dernière année d'école d'ingénieur — février à juillet 2027

Laboratoire	**Institut Clément Ader, équipe MSC**
Encadrement	Christophe BOUVET, Tobias BIANCHI
Durée	24 semaines, de mi-février à fin juillet 2027
Gratification	gratification réglementaire en vigueur (environ 625€/mois)
Moyens	licences Abaqus/Explicit, heures de calcul sur le mésocentre CALMIP, poste de travail
Contact	christophe.bouvet@isae-supaero.fr ; tobias.bianchi@utoulouse.fr

Mots-clés — composites stratifiés ; AS4/8552 ; Discrete Ply Model ; base de données de simulations ; métamodèle ; identification bayésienne ; pyramide d'essais.

1. Contexte

La certification des structures composites stratifiées repose sur une pyramide d'essais (Figure 1). Des centaines d'éprouvettes élémentaires, essayées sur plusieurs lots et dans plusieurs environnements, servent à qualifier un matériau et à établir ses valeurs admissibles. Viennent ensuite les éléments technologiques, les sous-structures et les démonstrateurs [1]. Remplacer une partie de cette pyramide par des essais virtuels est un objectif affiché de la communauté depuis une décennie [2, 3].

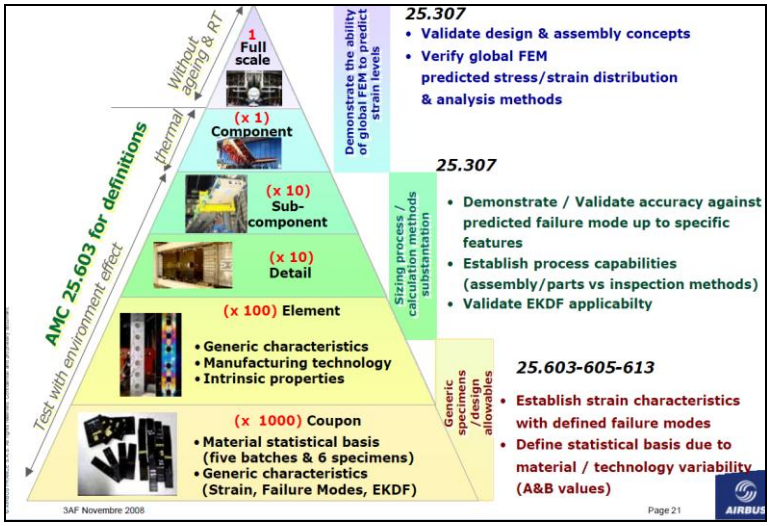


Figure 1. Pyramide des essais (d'après J.L. Léon-Dufour, Airbus, journées 3AF, 2008)

Les modèles mésoscopiques d'endommagement rendent cet objectif crédible. Le *Discrete Ply Model* (DPM) (Figure 2) en est un exemple abouti. Chaque pli y est représenté par un élément dans l'épaisseur, et la fissuration matricielle comme le délaminage sont portés par des éléments d'interface placés là où les fissures apparaissent. Avec un même jeu de paramètres, le modèle reproduit la rupture de stratifiés en pull-through [4], troués [5] et entaillés, y compris avec les effets d'échelle [6].

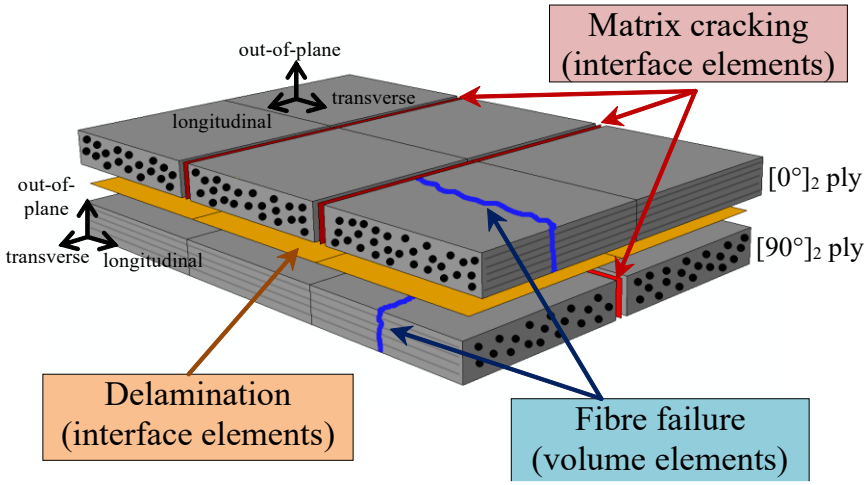


Figure 2. Principe du Discrete Ply Model [4,5,6]

Son coût de calcul en limite toutefois l'usage : un calcul explicite d'éprouvette demande plusieurs heures sur quelques dizaines de cpus, alors qu'identifier ses paramètres ou propager les incertitudes jusqu'aux valeurs admissibles [7] demanderait des centaines à des milliers de calculs. En pratique, les paramètres sont donc repris des rapports de qualification, et ceux que ces rapports ne donnent pas, comme les ténacités translaminaires, sont calés à la main sur un essai. Le projet dans lequel s'inscrit le stage vise à lever ce verrou par un métamodèle du DPM, construit par apprentissage sur une base de simulations [8, 9].

2. Objectifs et démarche

L'objectif du stage est de construire cette base de simulations pour un matériau et une matrice d'essais réels, et de l'utiliser pour une première identification des paramètres du DPM. Il s'appuie sur la qualification publique du carbone/époxy Hexcel AS4/8552 par le NCAMP [10], qui donne, sur trois lots et une vingtaine d'éprouvettes par essai, la moyenne et la dispersion des modules et des résistances. Dix-huit configurations d'essai sont retenues, en environnement ambiant sec et avec des plis à 0°, 90° et ±45° : essais sur pli unidirectionnel (traction, compression, cisaillement plan et interlaminaire), stratifiés non entaillés et troués en traction et en compression, sur trois drapages (quasi-isotrope, « soft » et « hard »). Un benchmark DPM existant couvre déjà ces cas, et une chaîne d'export des résultats de calcul vers une base de données est disponible en version de travail.

La démarche repose sur un tri des paramètres du modèle, selon l'essai qui permet de les déterminer. Les propriétés élastiques du pli, ses déformations à rupture en traction et en compression et sa loi de plasticité en cisaillement se lisent directement sur les essais unidirectionnels. Les ténacités en modes I et II des interfaces sont connues par des essais DCB et ENF déjà réalisés. Trois paramètres restent sans mesure directe et ne sont accessibles qu'à travers la réponse des stratifiés troués. Les deux premiers sont les ténacités translaminaires en traction et en compression, qui gouvernent la propagation de la rupture des fibres à partir du bord du trou. Le troisième est la résistance en cisaillement plan qui intervient dans le critère d'amorçage de la fissuration matricielle ; la valeur conventionnelle mesurée à 5 % de déformation sur l'essai de cisaillement plan n'en donne qu'un ordre de grandeur. De ce paramètre dépend la fissuration matricielle qui se développe autour du trou avant la rupture et qui, avec le délaminage qu'elle amorce, réduit la concentration de contraintes. Seuls ces trois paramètres varient dans la base, calculée sur les douze configurations de stratifiés : elle compte ainsi de l'ordre de 400 calculs.

Un métamodèle scalaire est ensuite construit sur cette base par processus gaussiens [11]. Pour chaque essai, il associe aux trois paramètres les grandeurs mesurées, modules et résistances, et remplace un calcul de

plusieurs heures par une évaluation quasi instantanée. Il permet de mesurer la sensibilité de chaque essai aux trois paramètres, puis de les identifier dans un cadre bayésien [12] sur les essais troués en traction et en compression, ce qui donne leurs valeurs les plus probables et leurs incertitudes. Les autres stratifiés sont enfin prédits sans nouveau calage, et ces prédictions sont comparées aux résultats NCAMP. Chaque calcul de la base conserve par ailleurs les champs complets de déformation, de contrainte et d'endommagement : la base constituera le premier corpus d'apprentissage d'un métamodèle prédisant ces champs, étape suivante du projet.

Les étapes du travail proposé sont les suivantes :

- bibliographie sur le DPM, les plans d'expériences numériques et l'identification bayésienne ;
- prise en main du DPM et déclinaison des dix-huit configurations NCAMP, premier écart entre la fiche matériau nominale et les essais ;
- fiabilisation de la chaîne d'export et post-traitement des calculs selon les définitions normalisées des grandeurs NCAMP ;
- vérification du tri des paramètres, plan d'expériences par hypercube latin [13] et calculs de la base sur le mésocentre CALMIP ;
- construction et validation des métamodèles scalaires, analyse de sensibilité par indices de Sobol [14] ;
- identification sur les données NCAMP et prédiction des essais non utilisés pour l'identification.

3. Profil recherché

Étudiant·e de Master 2 ou de dernière année d'école d'ingénieur en mécanique des structures, mécanique numérique ou calcul scientifique.

- **Indispensable :** mécanique des milieux continus, méthode des éléments finis, bonne maîtrise de Python.
- **Souhaitable :** mécanique de l'endommagement des composites, pratique d'Abaqus, plans d'expériences, processus gaussiens ou statistique bayésienne.

Candidature : CV, relevés de notes et lettre de motivation à transmettre par courriel aux contacts indiqués en tête du sujet.

Références

[1] R. Cumbo, A. Baroni, A. Ricciardi et S. Corvaglia, « Design allowables of composite laminates: A review », *Journal of Composite Materials* 56(23) (2022), 3617–3634. doi:10.1177/00219983221117216

[2] C. S. Lopes, C. González, O. Falcó, F. Naya, J. Llorca et B. H. A. H. Tijs, « Multiscale virtual testing: the roadmap to efficient design of composites for damage resistance and tolerance », *CEAS Aeronautical Journal* 7(4) (2016), 607–619. doi:10.1007/s13272-016-0210-7

[3] O. Falcó, R. L. Ávila, B. H. A. H. Tijs et C. S. Lopes, « Modelling and simulation methodology for unidirectional composite laminates in a Virtual Test Lab framework », *Composite Structures* 190 (2018), 137–159. doi:10.1016/j.compstruct.2018.02.016

[4] L. Adam, C. Bouvet, B. Castanié, A. Daidié et E. Bonhomme, « Discrete ply model of circular pull-through test of fasteners in laminates », *Composite Structures* 94(10) (2012), 3082–3091. doi:10.1016/j.compstruct.2012.05.008

[5] V. Achard, C. Bouvet, B. Castanié et C. Chirol, « Discrete ply modelling of open hole tensile tests », *Composite Structures* 113 (2014), 369–381. doi:10.1016/j.compstruct.2014.03.031

[6] J. Serra, C. Bouvet, B. Castanié et C. Petiot, « Scaling effect in notched composites: The Discrete Ply Model approach », *Composite Structures* 148 (2016), 127–143. doi:10.1016/j.compstruct.2016.03.062

[7] O. Vallmajó, I. R. Cózar, C. Furtado et al., « Virtual calculation of the B-value allowables of notched composite laminates », *Composite Structures* 212 (2019), 11–21. doi:10.1016/j.compstruct.2018.12.049

[8] M. Maurizi, C. Gao et F. Berto, « Predicting stress, strain and deformation fields in materials and structures with graph neural networks », *Scientific Reports* 12(1) (2022), art. 21834. doi:10.1038/s41598-022-26424-3

[9] T. Pfaff, M. Fortunato, A. Sanchez-Gonzalez et P. W. Battaglia, « Learning mesh-based simulation with graph networks », *International Conference on Learning Representations (ICLR)* (2021). arXiv:2010.03409

[10] E. Clarkson, *Hexcel 8552 AS4 Unidirectional Prepreg Qualification Statistical Analysis Report*, rapport NCP-RP-2010-008 Rev D, National Center for Advanced Materials Performance (NCAMP), National Institute for Aviation Research, Wichita State University (2011).

[11] C. E. Rasmussen et C. K. I. Williams, *Gaussian Processes for Machine Learning*, MIT Press, Cambridge (MA) (2006).

[12] M. C. Kennedy et A. O'Hagan, « Bayesian Calibration of Computer Models », *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)* 63(3) (2001), 425–464. doi:10.1111/1467-9868.00294

[13] M. D. McKay, R. J. Beckman et W. J. Conover, « A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code », *Technometrics* 21(2) (1979), 239–245. doi:10.2307/1268522

[14] I. M. Sobol', « Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates », *Mathematics and Computers in Simulation* 55(1–3) (2001), 271–280. doi:10.1016/s0378-4754(00)00270-6