



Fondation Lopez-Loreta

Comparaison expérimentale du comportement d'une structure composite entaillée soumis à des sollicitations multiaxiales : Thermodurcissable VS. Thermoplastique

Contexte

L'industrie de l'aviation civile prévoit de tripler le nombre de passagers d'ici le milieu du 21^e siècle. La consommation de kérosène sera donc largement augmentée et par conséquent la production de gaz à effet de serre aussi. **Une des manières de réduire la consommation d'un appareil est de réduire sa masse.** C'est pour cela que les matériaux composites ont été introduits. Ces derniers composaient 5% en masse de l'Airbus A300 en 1970. Le pourcentage est monté à 53% pour l'Airbus A350 en 2010.

Les matériaux composites (mélanges de fibres et de résine) étant plus fragiles que l'aluminium traditionnellement utilisé, **de très nombreux essais sont nécessaires pour estimer la durée de vie des structures** et pouvoir ainsi certifier l'avion. En effet, lors de la certification de l'Airbus A350, environ 70 000 essais ont été réalisés.

Le projet **VIRTUOSE** (*VIRTUal testing of aerONautical compoSite structurEs*) propose de **réduire significativement le nombre d'essais** permettant de valider la résistance mécanique des structures en matériaux composites. L'objectif de **VIRTUOSE** <https://websites.isae-supaeero.fr/virtuose/> est de développer une méthodologie de certification des structures composites **à l'échelle de l'éprouvette technologique** (Niveaux 2 et 3 - Figure 1) à l'aide d'un banc d'essais pour sollicitations multiaxiales et d'un modèle numérique par éléments finis.

En remplaçant de nombreux essais par des simulations numériques, **VIRTUOSE** pourrait permettre de **réduire de 20% le délai et le coût de la certification.**

Afin de valider les caractéristiques mécaniques d'un avion avant sa commercialisation, plusieurs types d'essais sont réalisés. Ils sont représentés sous la forme d'une pyramide (Figure 1).

L'aile d'avion (Niveau 5) est décomposée en sous-composants (Niveau 4) représentés **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Ces derniers sont constitués de sous-structures dites « technologiques » (Niveaux 2 et 3).

Le premier niveau de la pyramide (Figure 1) permet de déterminer les caractéristiques des matériaux utilisés ; à ce niveau **plusieurs milliers d'éprouvettes sont testées.** En effet le nombre de configurations augmente de manière exponentielle : **types de fibre × types de résines × séquences d'empilement × types d'efforts...**

Le volume des essais diminue au fur et à mesure de l'augmentation en taille et en complexité des spécimens (Niveaux 2, 3 et 4) car les essais des niveaux inférieurs réalisés en premier, réduisent le nombre de configurations pertinentes à tester.

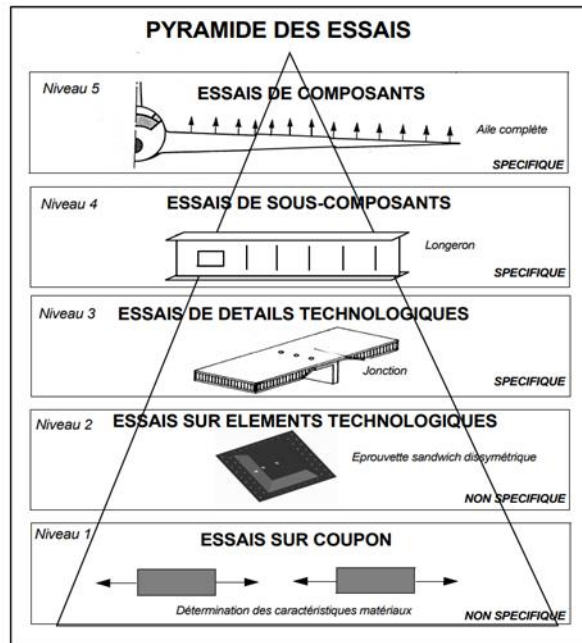


Figure 1 : Pyramide des essais utilisée pour la certification de structures aéronautiques [1]

L'essentiel des investigations dans le domaine des structures composites a pour objectif de déterminer des stratégies de modélisation qui permettent de capturer les scénarios de ruptures. Ceux-ci s'avèrent extrêmement complexes même aux plus petites échelles. Malgré cette complexité, les modélisations se font de plus en plus pertinentes et l'école française excelle dans ce domaine. Par exemple, l'*ONERA Damage Model* [3] a été classé « *best model* » au dernier *World Wide Failure Exercise*. Le *Discrete Ply Model* (DPM), porté par l'Institut Clément Ader (ICA), se révèle aussi très pertinent pour simuler la rupture de matériaux composites [4]–[6].

D'une manière générale, **les recherches académiques sont menées à l'échelle du coupon (quelques cm²)** essentiellement sous sollicitations uniaxiales [7]–[9] et plus rarement multiaxiales [10], [11]. Les tests aux échelles supérieures sont l'apanage des grands centres de recherche publics ou des industriels car cela fait partie des exigences de la certification par la pyramide des essais. De ce fait, **l'intérêt se porte davantage sur des grands panneaux proches de l'application finale (quelques m²)** [12], [13] ou sur de grandes structures [14].

Enfin, **à l'exception de la NASA Langley, seul l'ICA** fort de son expérience [1], [15] oriente sa recherche aux **deuxième et troisième niveaux de la pyramide (éprouvette technologique)**. **VIRTUOSE a donc un positionnement unique dans le panorama de la recherche mondiale sur les structures composites.**

Dans le domaine des composites, cette échelle d'étude (Niveaux 2 et 3 - Figure 1) s'impose car **le comportement d'un matériau composite dépend essentiellement de sa structure macroscopique** (contrairement aux matériaux métalliques). En conditions d'utilisation, des interactions fortes existent entre l'échelle des endommagements (fissurations de la résine, ruptures des fibres, décollements des plis...) et les échelles supérieures : géométrie des détails structuraux, flambements, conditions aux limites... Ainsi, on ne peut pas véritablement parler de « ruptures », mais plutôt de « scénarios d'endommagements » conduisant à la rupture totale. Ces derniers sont très difficiles à simuler numériquement tant les possibilités d'évolution des endommagements sont nombreuses.

VIRTUOSE s'appuie sur les avancées du projet VERTEX [16] financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), conduit par l'ICA. Dans cette première étude, l'équipe de recherche a proposé de manière quasi-unique dans le monde, un banc d'essais sur structures (Figure 2), instrumenté par **corrélation d'images numériques**, permettant de tester des éprouvettes **technologiques** (Niveaux 2 et 3 - Figure 1).

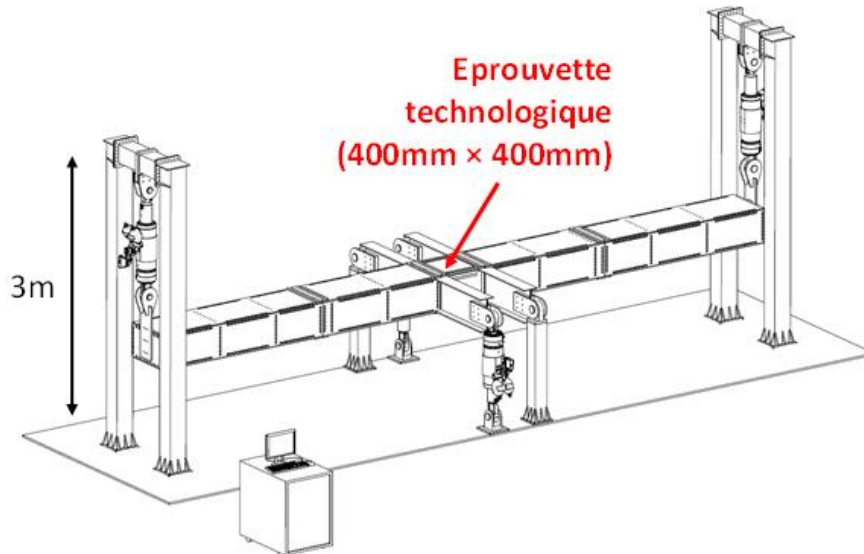


Figure 2 : Banc d'essais multiaxial issu du projet VERTEX

Des essais multiaxiaux peuvent à présent être conduits sur des éprouvettes qui ont une taille ($400 \times 400 \text{ mm}^2$) et un coût raisonnables tout en étant représentatives du point de vue des phénomènes mécaniques rencontrés. Un exemple d'essai est disponible sous la forme de vidéo en ligne ([Vidéo](#)).

Objectifs :

Une première campagne d'essais a été réalisée sur des éprouvettes entaillées en matériau thermoplastique. Des chargements de traction, cisaillement, traction+cisaillement ont été réalisés avec et sans pression. Une deuxième campagne est prévue courant 2023 sur un matériau thermodurcissable avec les mêmes chargements. L'objectif est de comparer les essais (TP vs. TD) en ce qui concerne le flambage, l'initiation de la rupture, la rupture finale, l'énergie dissipée, les scénarios de rupture. Les outils utilisés seront l'analyse d'image par stéréocorrélation et la caméra infrarouge. Il sera envisagé d'écrire un article scientifique dans une revue internationale à comité de lecture étant donné qu'une base a déjà été développée dans des travaux antérieurs.

Profil recherché

M2 en mécanique – connaissances des structures composites et de python.
Appétence pour le travail expérimental

Déroulement du stage

Le stage se déroulera à l'Institut Clément Ader (ICA, UMR CNRS 5312), sur le site toulousain, dans le cadre du projet VIRTUOSE (**VIR**tual **T**esting of aeronautical comp**OS**it**ES**) financé par la fondation Lopez-Loreta [17]. Les recherches s'intégreront dans les activités du groupe Matériaux et Structures Composites (MSC).

L'équipe du projet VIRTUOSE est constituée de 8 personnes [18]. Le stage sera encadré par Joël Serra et Christophe Bouvet. La durée du stage est de 6 mois avec un démarrage en Mars-Avril 2023.

Contacts

- C. Bouvet : christophe.bouvet@isae-supero.fr
- J. Serra : joel.serra@isae-supero.fr

Bibliographie

- [1] B. Castanié, "Contribution à l'étude des structures sandwichs dissymétriques," PhD Thesis, 2000.
- [2] B. Castanié, "Essais de certification d'une voilure en matériaux composites." Cours de structures composites du master recherche en mécanique de l'université Paul Sabatier, 2017.
- [3] F.-X. Irisarri, F. Laurin, N. Carrere, and J.-F. Maire, "Progressive damage and failure of mechanically fastened joints in CFRP laminates – Part II: Failure prediction of an industrial junction," *Composite Structures*, vol. 94, no. 8, pp. 2278–2284, Jul. 2012.
- [4] C. Bouvet, B. Castanié, M. Bizeul, and J.-J. Barrau, "Low velocity impact modelling in laminate composite panels with discrete interface elements", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 46, no. 14–15, pp. 2809–2821, Jul. 2009.
- [5] V. Achard, C. Bouvet, B. Castanié, and C. Chirol, "Discrete ply modelling of open hole tensile tests", *Composite Structures*, vol. 113, pp. 369–381, Jul. 2014.
- [6] J. Serra, C. Bouvet, B. Castanié, and C. Petiot, "Scaling effect in notched composites: The Discrete Ply Model approach", *Composite Structures*, vol. 148, pp. 127–143, Jul. 2016.
- [7] P. Soden, A. Kaddour, and M. Hinton, "Recommendations for designers and researchers resulting from the world-wide failure exercise", *Composites Science and Technology*, vol. 64, no. 3–4, pp. 589–604, Mar. 2004.
- [8] F. P. van der Meer and C. G. Dávila, "Cohesive modeling of transverse cracking in laminates under in-plane loading with a single layer of elements per ply", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 50, no. 20–21, pp. 3308–3318, Oct. 2013.
- [9] M. J. Swindeman, E. V. larve, R. A. Brockman, D. H. Mollenhauer, and S. R. Hallett, "Strength Prediction in Open Hole Composite Laminates by Using Discrete Damage Modeling", *AIAA Journal*, vol. 51, no. 4, pp. 936–945, Apr. 2013.
- [10] D. Perreux, J.-F. Maire, and C. Siqueira, "Multiaxial testing of composite materials", *Mat. Tech.*, vol. 6–7, 1994.

- [11] J. G. Michopoulos, J. C. Hermanson, and T. Furukawa, "Towards the robotic characterization of the constitutive response of composite materials", *Composite Structures*, vol. 86, no. 1–3, pp. 154–164, Nov. 2008.
- [12] M. Rouse, R. Young, and R. Gehrki, "Structural Stability of a Stiffened Aluminum Fuselage Panel Subjected to Combined Mechanical And Internal Pressure", 2003.
- [13] R. Ferguson, "Large scale composite testing at Airbus Filton site" in *Proceedings of the 2nd International Conference on Composites Testing and Model Identification. Bristol, UK, 2004.*
- [14] D. C. Jegley and A. Velicki, "Development of the PRSEUS multi-bay pressure box for a hybrid wing body vehicle," in *56th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2015, p. 1871.
- [15] B. Castanié, "Combined Shear/Compression Structural Testing of Asymmetric Sandwich Structures," *Experimental Mechanics*, vol. 44, no. 5, pp. 461–472, Oct. 2004.
- [16] B. Castanié, rapport ANR, "Projet VERTEX." 2012.
- [17] J. Serra, J. E. Pierré, J. C. Passieux, J. N. Périé, C. Bouvet, and B. Castanié, "Validation and modeling of aeronautical composite structures subjected to combined loadings: The VERTEX project. Part 1: Experimental setup, FE-DIC instrumentation and procedures", *Composite Structures*, vol. 179, pp. 224–244, Nov. 2017.
- [18] J. Serra et al., "Validation and modeling of aeronautical composite structures subjected to combined loadings: The VERTEX project. Part 2: Load envelopes for the assessment of panels with large notches", *Composite Structures*, vol. 180, pp. 550–567, Nov. 2017.