

## Soutenance de thèse

**Salim CHAIBI** soutiendra sa thèse de doctorat, préparée au sein de l'ICA et intitulée «*Prévision des endommagements induits par un impact basse vitesse/basse énergie au sein de matériaux composites stratifiés carbone-époxy de dernière génération*»

**Le 16 septembre 2022 à 14h00, ONERA Châtillon**

devant le jury composé de

M. Christophe BOUVET	Professeur ISAE-SUPAERO	Directeur de thèse
M. Peter DAVIES	enseignant chercheur IFREMER	Rapporteur
M. Rodrigue DESMORAT	Professeur ENS Paris Saclay/LMPS	Rapporteur
M. Jérémy BLEYER	Maître de Conférences Ecole des Ponts Paris Tech/NAVIER	
M. Carlos DAVILA	Ingénieur de recherche NASA Langley Research Center	
Mme Emmanuelle ABISSET CHAVANNE	Professeure Arts et Métiers Paris Tech/I2M BORDEAUX	
M. Zoheir ABOURA	Professeur Université de Technologie de Compiègne	
M. Johann RANNOU	Ingénieur de recherche ONERA	Co-encadrant de thèse

**Résumé :** En aéronautique, les composites stratifiés sont aujourd'hui largement utilisés pour la fabrication de structures primaires, telles que les ailes et les fuselages. Ces structures peuvent être soumises à des impacts à faible vitesse et faible énergie, représentatifs de chutes d'outils, qui peuvent induire des dommages dans la pièce. Ainsi, le dimensionnement de structures composites doit être tolérant aux dommages pour satisfaire aux exigences de sécurité. Cependant, il est actuellement basé sur des campagnes d'essais expérimentales longues et coûteuses en raison de l'utilisation de critères phénoménologiques pour le dimensionnement dans l'industrie. Par conséquent, ce travail consiste en une étude expérimentale et numérique sur le comportement et la résistance d'une nouvelle génération de matériaux composites carbone/époxy avec interface renforcé soumis à un impact faible vitesse/faible énergie. L'objectif principal de ces travaux porte sur le développement d'un modèle robuste capable de prévoir la réponse de composites stratifiés sous impact, en se basant sur des observations expérimentales précises. Des essais expérimentaux sur des plaques stratifiées ont été réalisés avec des méthodes d'instrumentation avancées (telles que la thermographie infrarouge et la corrélation d'images numériques associées à des caméras ultrarapides) pour suivre l'évolution des endommagements en temps réels, améliorant ainsi la compréhension de la chronologie des dommages. De plus, des méthodes d'évaluation non destructives en 3D (tomographie à rayons X, balayage ultrasonique) ont été réalisées afin d'évaluer et de comprendre les mécanismes d'endommagement dans ce matériau spécifique. En parallèle, un modèle éléments finis 3D d'impact à solveur implicite a été développé et prend en compte les contacts (impacteur/composite et montage/composite), la non-linéarité géométrique, la fissuration transverse à l'aide d'un modèle d'endommagement continu, le délaminage en utilisant des éléments cohésifs et la rupture des fibres en considérant une approche de type champ de phase. Une attention particulière a été accordée aux couplages entre les différents mécanismes d'endommagement et de rupture, qui ont été observés expérimentalement. Les comparaisons entre les résultats

expérimentaux et les simulations sont très prometteuses en considérant les courbes de force/déplacement, l'énergie dissipée, la zone endommagée projetée, mais aussi la distribution des mécanismes d'endommagement et de rupture au sein des plaques composites étudiées.

**Mots-clés :** Impact basses vitesses, Tolérance aux dommages, endommagement des composites

**Summary:** Because of their high specific characteristics, composite materials, and especially unidirectional carbon/epoxy laminates, are increasingly used for the realization of aeronautical primary structures. These materials are however very sensitive to low energy impacts. In order to limit this sensitivity, progress has been made on new generations of unidirectional CFRP laminate composite materials. They now have epoxy resins that are loaded with thermoplastic nodules, which make it possible to boost their interfacial toughness compared to the previous generation. In the industry, the robust simulation of low energy impacts on laminated composites could be an essential and complementary tool for test campaigns to help define design rules. This role is not yet completely fulfilled because the current models are still not very robust. The proposed study therefore focuses on the prediction of the damages generated by a low velocity/low energy impact within a 4th generation carbon/epoxy material. It will be necessary to experimentally establish the damage scenario occurring within these laminated materials. A major campaign of impact tests will therefore be conducted at Onera on different configurations (layup, thicknesses, energy levels). One of the originalities of this thesis work deals with the instrumentation of these impact tests with state-of-the-art techniques such as image correlation (high speed cameras) or passive thermography (high frequency infrared camera), in order to follow the evolution of the damage and its consequences. Nondestructive testing will also be implemented in post-mortem analysis: X-ray microtomography (in order to establish the three-dimensional profile of the generated damages), or ultrasonic control (to analyze the delaminated areas). The damage scenarios of these new generations of composite materials thus established will provide a solid basis for the development of damage models. This thesis will be based on the damage models proposed at Onera. Particular attention will be paid to its ability to reproduce off-plan degradation mechanisms as well as the robustness of simulations, which is a key point for its transfer to industry. The material models will be integrated into implicit finite element solvers: the Zset code co-developed by ONERA and the Centre des Matériaux of the Ecole des Mines de Paris and the Abaqus commercial code. Most of the models in the literature rely on explicit solvers, their advantage lies in their ability to deal with non-smooth problems as is the case for impacts. But apart from their favorite areas of application (crash, stamping, ...) they have less favor with industrials who often prefer implicit solvers that are more versatile.

**Keywords:** Crashworthiness of composite structures, Damage tolerance, Low-velocity impact, Damage modeling on laminated composites