

Étude expérimentale et numérique des impacts à basse vitesse sur stratifiés composites en environnement cryogénique

Laboratoire : Institut Clément Ader UMR CNRS 5312 - <https://ica.cnrs.fr/>

Encadrement : Pablo NAVARRO – Steven MARGUET

Durée : 36 mois

Financement : Bourse ministérielle / Contrat doctoral de 36 mois, suivant le taux en vigueur, 1er janvier 2024 : 2100 euros brut mensuel. Possibilité de complément via des enseignements jusqu'à 64h par année.

Contact : pablo.navarro@univ-tlse3.fr – 05.61.17.11.62

Modalité de candidature :

Envoyer un CV et une lettre de recommandation à pablo.navarro@univ-tlse3.fr

Les candidatures qui auront été sélectionnées feront l'objet d'une audition en vue d'un classement. Des éléments complémentaires pourront être demandés à cette occasion (mémoire de stage, complément de relevés de notes etc. ...). Lors de l'audition, le (la) candidat(e) explicitera brièvement son parcours et se positionnera par rapport au sujet en proposant des pistes de travail.

Description du sujet de recherche :

Résumé :

Dans le but de limiter le réchauffement climatique et de baisser les émissions de gaz à effet de serre, une solution envisagée comme vecteur énergétique du futur est l'hydrogène. Son stockage peut se faire sous deux formes : sous forme de gaz à très haute pression (700bars) ou bien sous forme liquide à très basse température (-254°C). Dans le domaine des transports en général, et en aéronautique en particulier, c'est souvent cette deuxième solution de stockage qui est envisagée. Il devient alors nécessaire de concevoir et de fabriquer des réservoirs légers, composés partiellement ou totalement de matériaux composites à fibres longues. Or, ces matériaux sont connus pour être à la fois particulièrement vulnérables aux impacts, l'une des sources de dommage les plus pénalisantes, et pour présenter des changements de propriétés mécaniques à basse température. Ainsi, l'objet de cette thèse sera d'étudier expérimentalement le comportement à l'impact et post-impact de stratifiés composites sous environnement cryogénique et de développer des stratégies de modélisation adaptées. Ce travail s'appuiera sur le modèle semi-continu de l'équipe et utilisera entre autres le caisson cryogénique qui sera disponible à l'ICA.

Contexte et état de l'art :

L'utilisation de l'hydrogène comme combustible pour le transport du futur apparaît aujourd'hui comme une piste sérieuse pour permettre de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Son transport et son stockage peuvent se faire sous deux formes : soit sous forme gazeuse, à très haute pression (700 bars) et à température ambiante, soit sous forme liquide à pression atmosphérique mais à très basse température (20K). Les premières pistes envisagées pour l'application de ce vecteur énergétique dans le domaine aéronautique tendent à privilégier la deuxième solution, c'est à dire un stockage sous conditions cryogéniques. Parmi les matériaux

envisagés pour la réalisation de tels réservoirs, les matériaux composites à fibres longues constituent des candidats prometteurs pour la fabrication de réservoirs légers et performants [1].

Ces matériaux présentent d'importantes variations de comportement mécanique à très basse température [2,3]. A l'échelle macroscopique, et par rapport aux comportements à température ambiante, on observe généralement une augmentation du module longitudinal en traction et de la contrainte limite, et une baisse de l'allongement à rupture quand on descend à des températures de 70K. Concernant la propagation des délaminages, des études [4,5] montrent qu'à une température de 77K la propagation des fissures interlaminaires est plus lente mais que cet effet s'inverse aux alentours de 20K.

La complexité des phénomènes de dégradation et de propagation des dommages observés à l'échelle macroscopique à très basse température est liée aux interactions complexes des constituants à l'échelle microscopique. En effet, des microfissurations engendrées par des contraintes résiduelles intralaminaires et interlaminaires liées aux différences de coefficients de dilatation thermique entre les matériaux constitutifs du stratifié et entre les différents plis, ont été mesurées [6]. Un exemple de résultat obtenu par calcul MEF publié dans [1] est donné dans la Figure 1. Des contraintes résiduelles de l'ordre de 40 MPa apparaissent dans la matrice lorsqu'un stratifié carbone/epoxy UD [0°/90°] est refroidi à 20K.

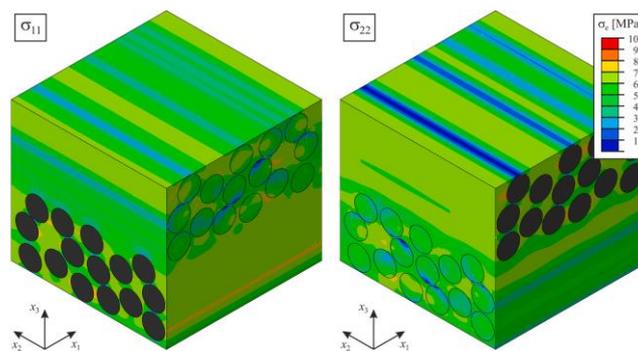
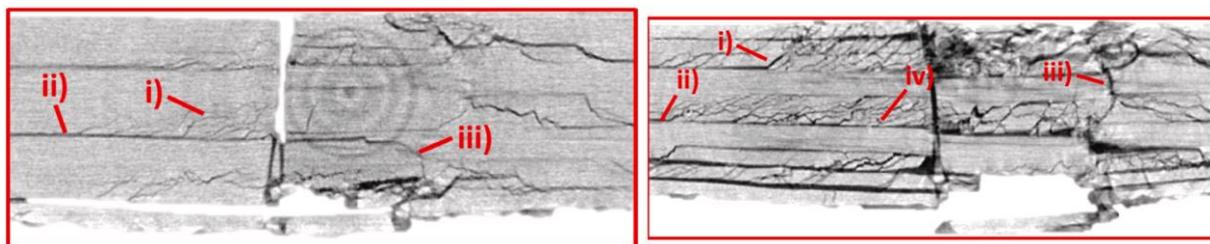


Figure 1 – Calcul des contraintes résiduelles microscopiques dans la matrice à l'échelle d'un VER [1].

L'impact est l'une des sources de dommage les plus courantes et les plus pénalisantes pour les structures composites. En effet, la fragilité et la nature fortement architecturée de ces matériaux les rendent plus vulnérables à ce type de sollicitations (fissurations matricielles, ruptures de fibres, délaminages) [7]. En environnement cryogénique, ces impacts sont d'autant plus dommageables que les caractéristiques intrinsèques des constituants sont affectées [8,9]. Un exemple d'une vue en coupe par tomographie à rayons X de deux stratifiés carbone/epoxy identiques impactés à 80 m/s par un impacteur de calibre 7.62mm à température ambiante et à -150°C est donné sur la Figure 2. Une plus grande densité de fissuration intralaminaires est observée pour l'impact en condition cryogénique.



(a) 80 m/s impact. Ambient temperature (b) 84 m/s impact. Cryogenic temperature

Figure 2 – Vue en coupe par tomographie à rayons X de deux stratifiés carbone/epoxy identiques impactés par un impacteur de calibre 7.62mm [8].

Il est important de noter que toutes les études publiées sur l'impact des structures composites en environnements cryogénique sont des études expérimentales faisant intervenir des températures n'allant pas en dessous de -198°C . En effet, les tests d'impacts sont généralement réalisés après immersion de l'éprouvette dans un bain de nitrogène liquide. De plus, aucun modèle d'impact avec prise en compte de l'environnement cryogénique n'a été trouvé.

La modélisation des stratifiés sous impact a fait l'objet de nombreuses études, la clé étant de développer une stratégie de modélisation qui puisse représenter la physique des dommages pour un temps de calcul raisonnable. Parmi toutes ces stratégies, les modèles à zones cohésives semblent avoir un grand potentiel [10]. A titre d'exemple la stratégie de modélisation semi-continue, développée au sein de notre équipe à l'ICA [11,12], dans laquelle les comportements des torons de fibres et de la résine sont séparés, permet de représenter fidèlement les fissurations intralaminaires, les ruptures de fibres et les délaminages pour des stratifiés UD, tissés et hybrides de faible ou de forte épaisseur sous chargement d'impact. Ainsi, un des objectifs de ces travaux de thèse sera de faire évoluer ce modèle, en ajoutant une brique de dépendance à la température (thermoélasticité, variation des propriétés macro,...).

- [1] Hohe, Jörg, Achim Neubrand, Sascha Fliegenger, Carla Beckmann, Michael Schober, Klaus-Peter Weiss, et Simon Appel. « Performance of fiber reinforced materials under cryogenic conditions—A review ». *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 141 (1 février 2021): 106226.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106226>.
- [2] Schutz, J. B. « Properties of composite materials for cryogenic applications ». *Cryogenics* 38, n° 1 (1 janvier 1998): 3 12.
[https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(97\)00102-1](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(97)00102-1).
- [3] Li, Yuanchen, Jinxin Meng, Junrong Luo, Panding Wang, Jia Ma, Zeang Zhao, et Hongshuai Lei. « Cryogenic mechanics and damage behaviors of carbon fiber reinforced polymer composites ». *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 169 (1 juin 2023): 107484.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2023.107484>.
- [4] Shindo, Yasuhide, Akihiro Inamoto, et Fumio Narita. « Characterization of Mode I fatigue crack growth in GFRP woven laminates at low temperatures ». *Acta Materialia* 53, n° 5 (1 mars 2005): 1389 96.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2004.11.032>.
- [5] Rizov, Victor, Yasuhide Shindo, Katsumi Horiguchi, et Fumio Narita. « Mode III Interlaminar Fracture Behavior of Glass Fiber Reinforced Polymer Woven Laminates at 293 to 4 K ». *Applied Composite Materials* 13, n° 5 (1 septembre 2006): 287 304.
<https://doi.org/10.1007/s10443-006-9008-9>.
- [6] Lord, Harold W., et Piyush K. Dutta. « On the Design of Polymeric Composite Structures for Cold Regions Applications ». *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 7, n° 5 (1 septembre 1988): 435 58.
<https://doi.org/10.1177/073168448800700503>.
- [7] S. Abrate. *Impact on composite structures*. Cambridge University Press (1998)
- [8] Pernas-Sánchez, J., S. M. García-Rodríguez, J. A. Artero-Guerrero, J. López-Puente, et J. Costa. « High velocity impact response of carbon/epoxy composite laminates at cryogenic temperatures ». *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 168 (1 mai 2023): 107456.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2023.107456>.
- [9] Kara, Memduh, Muhammed Kırıcı, Ahmet Caner Tatar, et Ahmet Avcı. « Impact behavior of carbon fiber/epoxy composite tubes reinforced with multi-walled carbon nanotubes at cryogenic environment ». *Composites Part B: Engineering* 145 (15 juillet 2018): 145 54.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.03.027>.
- [10] Abrate, S., J. F. Ferrero, et P. Navarro. « Cohesive Zone Models and Impact Damage Predictions for Composite Structures ». *Meccanica* 50, n° 10 (1 octobre 2015): 2587 2620.
<https://doi.org/10.1007/s11012-015-0221-1>.

[11] Manseri, L., P. Navarro, O. Dorival, S. Marguet, B. Mahmoud, et J. -F. Ferrero. « Development of a hybrid element to model intralaminar damage in thick composite plates under impact loading ». *Composites Part B: Engineering* 222 (1 octobre 2021): 109024.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109024>.

[12] Mahmoud, B., L. Manseri, A. Rogani, P. Navarro, S. Marguet, J-F. Ferrero, et I. Tawk. « Experimental and numerical study of the damage mechanisms in hybrid unidirectional/woven composites under impact loading ». *Composite Structures* 209 (1 février 2019): 606 15.

<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.098>.

Verrous scientifiques :

- Observer, analyser et interpréter les interactions entre les effets d'un froid cryogénique et une sollicitation d'impact sur les dommages d'un stratifié UD

- Modéliser, à une échelle qui permette de garder des temps de calcul raisonnable, les contraintes résiduelles intra et interlaminaires résultant du refroidissement d'un stratifié UD d'une température de 293K à une température de 20K.

Objectifs :

Les objectifs de cette thèse sont :

- Mettre en place un protocole expérimental qui, en s'appuyant sur l'enceinte cryogénique développée à l'ICA permette d'étudier l'évolution d'un dommage d'impact dans un stratifié quand il est refroidi à 20K.

- Développer un système expérimental qui puisse s'adapter à l'enceinte cryogénique pour réaliser des impacts à basse vitesse à une température de 20K.

- Développer une modélisation par Éléments Finis, basée sur le modèle semi-continu existant, permettant de prendre en compte les effets de la température sur le comportement des matériaux composites sous chargement d'impact et post impact.

Programme prévisionnel de la thèse :

La première année sera consacrée à un travail de recherche bibliographique sur les études expérimentales et numériques portant sur le comportement des composites à très basse température et à leur comportement sous chargement d'impact. En parallèle le modèle semi-continu développé dans l'équipe depuis 2008 devra être pris en main. Des premiers essais de caractérisation des matériaux composites étudiés à des températures allant de 293K à 20K pourront être mis en place dans l'enceinte cryogénique de l'ICA. L'objectif de ces essais est d'identifier les mécanismes d'endommagement afin de pouvoir les modéliser.

La deuxième année sera consacrée au développement d'un moyen d'essai adapté à l'enceinte cryogénique afin de permettre la réalisation d'essais d'impact à basse vitesse à des températures pouvant aller jusqu'à 20K. En parallèle, la prise en compte de l'effet de la température sera implémentée dans le modèle semi-continu.

Enfin durant la troisième année, les études expérimentales pourront être consolidées par des essais complémentaires spécifiques. Une phase de validation du modèle basée sur une démarche de dialogue essai/calcul sera menée. Le manuscrit de thèse sera rédigé.