

## **Endommagements de composites stratifiés et sandwiches sous impact de gélatine moyenne vitesse**

### ***Damage on laminate and sandwich composites under gelatine medium velocity impact tests***

**Guillaume Barlow<sup>1</sup>, Olivier Dorival<sup>1,2</sup> et Guillaume Kemlin<sup>3</sup>**

1 : Icam, Site de Nantes  
35 Avenue du Champ de Manœuvre, 44470 Carquefou, France  
e-mail : guillaume.barlow@2019.icam.fr

2 : Université de Toulouse, Institut Clément Ader  
FRE CNRS 3687, UPS/INSA/ISAE/Mines Albi  
3 rue Caroline Aigle, 31400 Toulouse, France  
e-mail : olivier.dorival@icam.fr

3 : Multiplast  
Groupe Carboman  
24 Allée Loïc Caradec, 56000 Vannes, France  
e-mail : g.kemlin@multiplast.eu

### **Résumé**

Cet article illustre une étude expérimentale destinée à créer un chargement similaire à celui d'une explosion sous-marine sur des structures composites. Le principe consiste à utiliser l'impact d'une projectile mou (gélatine) afin de créer un chargement similaire à l'onde de pression supportée lors d'une explosion sous-marine. L'analyse des essais par stéréocorrélation sur trois stratifiés et deux sandwiches permet de différencier différents comportements à la rupture. Les résultats de cette analyse rejoignent les tendances observées lors d'essais de flexion quasi-statique effectués sur les mêmes matériaux.

### **Abstract**

This paper presents an experimental campaign in order to reproduce a loading similar to underwater blast on composite structures. The idea is to use a soft impact (gelatine) to generate a loading similar to the pressure wave occurring in underwater blast. Digital image stereo-correlation performed on three laminates and two sandwiches allows to identify various failure behaviors. These results are in agreement with observations performed during quasi-static bending tests on the same materials.

**Mots Clés :** Explosion sous-marine, endommagement des composites, essais d'impact moyenne vitesse, techniques expérimentales, corrélation d'images numériques

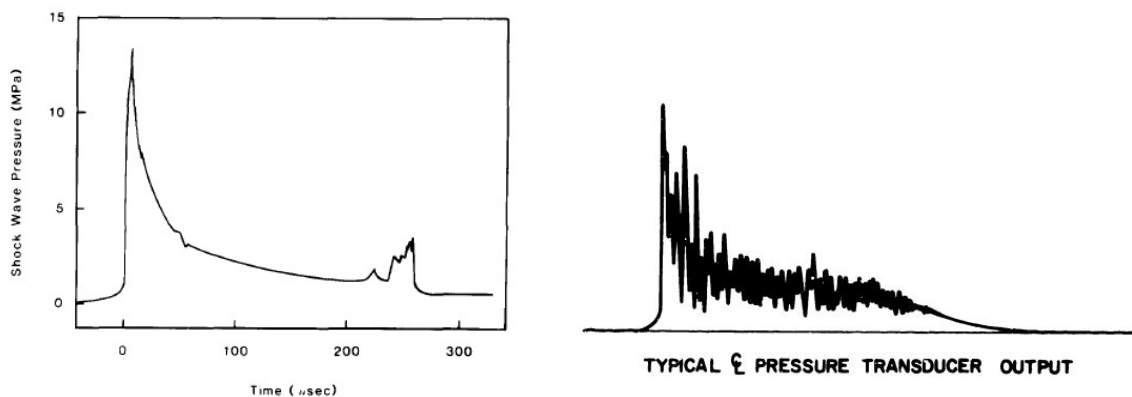
**Keywords :** Underwater blast, composite damage, medium velocity impact test, experimental techniques, digital image correlation (DIC)

## **1. Introduction**

La tenue des structures composites sous chargements sévères comme le slamming ou les explosions sous-marines est un enjeu important pour le secteur naval civil et militaire. Dans ce cadre, le projet SUCCESS (modélisation de la tenue des Structures Composites sous Sollicitations Sévères) vise à contribuer à la fois à l'amélioration des modèles (analytiques et/ou numériques) et à leur validation par des comparaisons expérimentales. Sur le plan expérimental, le premier écueil réside dans la difficulté de réaliser des essais d'explosion sous-marine en bassin de détonique [1, 2]. Le passage de l'onde de pression se caractérise par un violent pulse de pression suivi d'une chute exponentielle rapide. Un phénomène de cavitation peut éventuellement apparaître si la pression descend au dessous de zéro. Cette première phase est ensuite suivie d'un pulse secondaire puis d'une décroissance exponentielle, puis tertiaire, voir la *Fig. 1 (gauche)*.

Pour surmonter cette difficulté, une idée est de reproduire le même chargement tout en se passant de l'utilisation d'explosif. Une possibilité consiste à créer une onde de pression dans la chambre d'un vérin contenant de l'eau comme dans [3, 4, 5, 6]. Le dimensionnement du vérin afin d'atteindre les caractéristiques voulues de l'onde de pression nécessite des calculs complexes de couplage fluide/structure.

L'étude présentée ici propose d'utiliser une autre technique : l'impact direct par un projectile mou en gélatine, qui est d'habitude utilisé pour reproduire l'impact d'un oiseau dans le domaine aéronautique. En utilisant la théorie de l'hydrodynamique, Willbeck [7] a obtenu un profil de pression caractérisé par un pic de pression (pression de Hugoniot) suivi d'une décroissance exponentielle, puis un plateau à pression constante, en accord avec les essais [8, 9], voir la *Fig. 1 (droite)*. Ce type de chargement est finalement relativement proche du pulse rencontré lors d'une explosion sous-marine.



*Fig. 1. (gauche) Onde de pression lors d'une explosion sous-marine [1], et (droite) pression lors d'une essai d'impact mou [8], droite*

L'étude présentée a pour but de générer différents niveaux d'endommagement en fonction de l'énergie du chargement incident, pilotée par la vitesse d'impact. Les matériaux utilisés impliquent deux stratifiés carbone-époxy, un stratifié verre-vinylester, deux sandwichs verre-vinylester avec âme en mousse PET renforcée. La section 2 détaille le protocole expérimental ainsi que les matériaux testés. La section 3 illustre un essai d'impact gélatine et son exploitation, puis résume les résultats d'essais de flexion quasi-statique. En 4, quelques conclusions sont dressées par comparaison entre les différents matériaux testés.

## 2. Essais d'impact gélatine

### 2.1. Matériaux testés

Les matériaux testés sont constitués de trois stratifiés et deux sandwichs, voir le *Tab. 1*. Les deux premiers stratifiés sont en carbone/époxy pour une épaisseur nominale de 5.5 mm. Le stratifié 1 est principalement orienté dans la direction  $0^\circ$  tandis que le second est quasi-isotrope. Le stratifié 3 est un empilement de tissus 0/90 verre/vinylester d'épaisseur 8.5 mm. Les deux sandwichs sont constitués de peaux verre/vinylester quadriaxe de 2 mm d'épaisseur et d'une âme en mousse PET 80 kg/m<sup>3</sup> renforcée.

Ces matériaux ont été fabriqués en plaque, puis découpés afin d'obtenir des éprouvettes carrées de dimension 400 x 400 mm<sup>2</sup> pour les essais d'impact. Des éprouvettes de dimension 100 x 600 mm<sup>2</sup> destinées à des essais de flexion ont également été découpées dans les mêmes plaques.

### 2.2. Dispositif expérimental

Les tests d'impact consistent à envoyer un projectile en gélatine sur l'éprouvette composite. L'accélération du projectile est générée par une pression accumulée dans un réservoir fermé par une membrane

Stratifié 1	UD carbone / <b>sergé carbone</b> / époxy [±45 / 0 <sub>3</sub> / ±45 / 0 <sub>3</sub> / 90 <sub>2</sub> ] <sub>sym</sub>
Stratifié 2	UD carbone / époxy [45 / -45 / 0 / 90 / 45 / -45 / 0 / 90 / 45 / 0 / 90 / -45 / 90 / 0 / -45 / 45 / 90 / 0 / -45 / 45]
Stratifié 3	<b>sergé verre</b> / vinylester [0 <sub>8</sub> ] <sub>sym</sub>
Sandwich 1	<b>tissu verre quadriaxe</b> / vinylester / mousse PET 80 kg/m <sup>3</sup> perforée [tissu <sub>2</sub> /âme 20mm/tissu <sub>2</sub> ]
Sandwich 2	<b>tissu verre quadriaxe</b> / vinylester / mousse PET 80 kg/m <sup>3</sup> piquée [tissu <sub>2</sub> /âme 25mm/tissu <sub>2</sub> ]

Tab. 1. Matériaux testés

PET. Lorsque la membrane cède sous l'effet de la pression, une onde de pression est relâchée dans le tube afin de pousser le projectile.

Celui-ci est de forme cylindrique avec une tête sphérique, de diamètre 100 mm et de masse 750 g. La gélatine est moulée et conservée au réfrigérateur 24h avant l'essai. Le projectile est ensuite placé dans un sabot en mousse de diamètre 120 mm afin de servir de propulseur lors de la poussée.

Des conditions limite pour l'éprouvette, de type simplement supportées, ont été réalisées en utilisant une plaque support d'épaisseur 50 mm en aluminium, percée d'une ouverture circulaire chanfreinée de diamètre 360 mm (diamètre de l'appui).

L'instrumentation consiste principalement en l'utilisation de quatre caméras rapides éclairées par des spots lumineux, cadencées à 20000 images/sec. Les deux premières, disposées à la sortie du tube, ont pour rôle de mesure la vitesse initiale du projectile et les conditions de l'impact. Les deux caméras disposées à l'arrière permettent, grâce à un mouchetis réalisé sur la face arrière de l'éprouvette, d'obtenir les déplacements et déformations par stéréo-corrélation. Sur certaines éprouvettes, des jauges de déformations ont été collées sur la face arrière afin de vérifier les données fournies par la stéréo-corrélation.

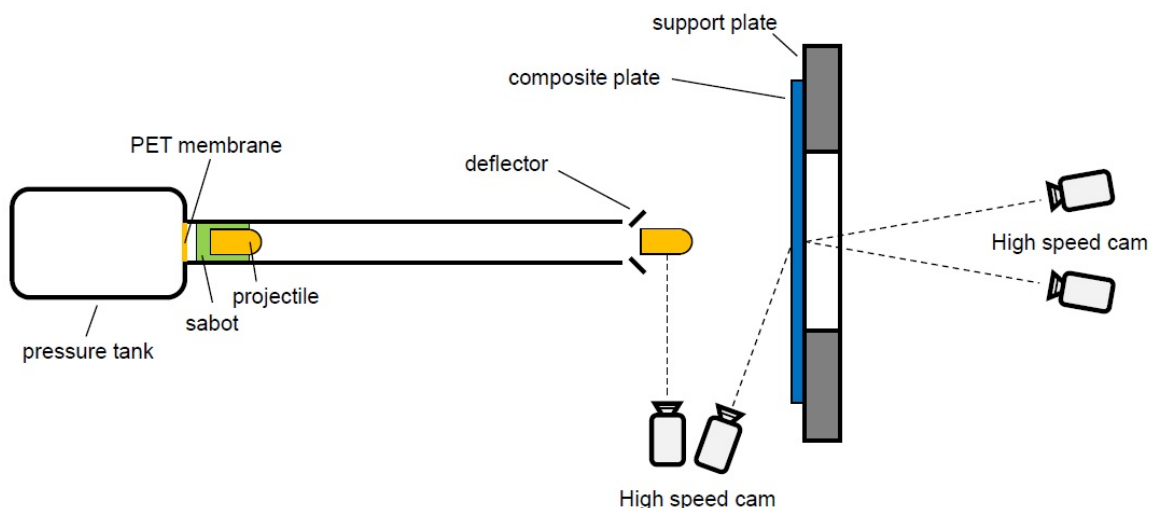


Fig. 2. Montage expérimental

### 3. Résultats

#### 3.1. Essais d'impact

La Fig. 3 montre les images de la caméra rapide enregistrant un impact à 92 m/s sur le stratifié 3. L'impact a lieu au temps 0 sec. Le projectile s'écrase sur l'éprouvette en coulant vers l'extérieur, conformément à la théorie développée dans [7, 9], et aux simulations numériques réalisées [10].

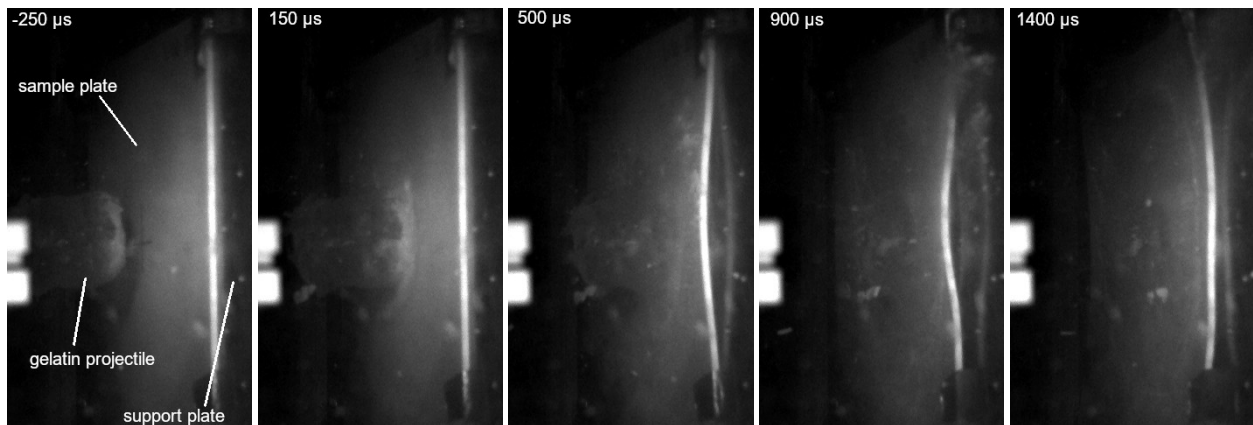


Fig. 3. Images de l'impact à 92 m/s sur le stratifié 3

La Fig. 4 (gauche) montre le déplacement hors-plan  $w$  obtenu par stéréo-corrélation dans le logiciel VIC 3D pour la déflexion maximum ( $t = 1200 \mu\text{s}$ ) sur le stratifié 3 impacté à 106 m/s. Le déplacement reste nul sur la plaque support qui sert de référence, et semble axisymétrique.

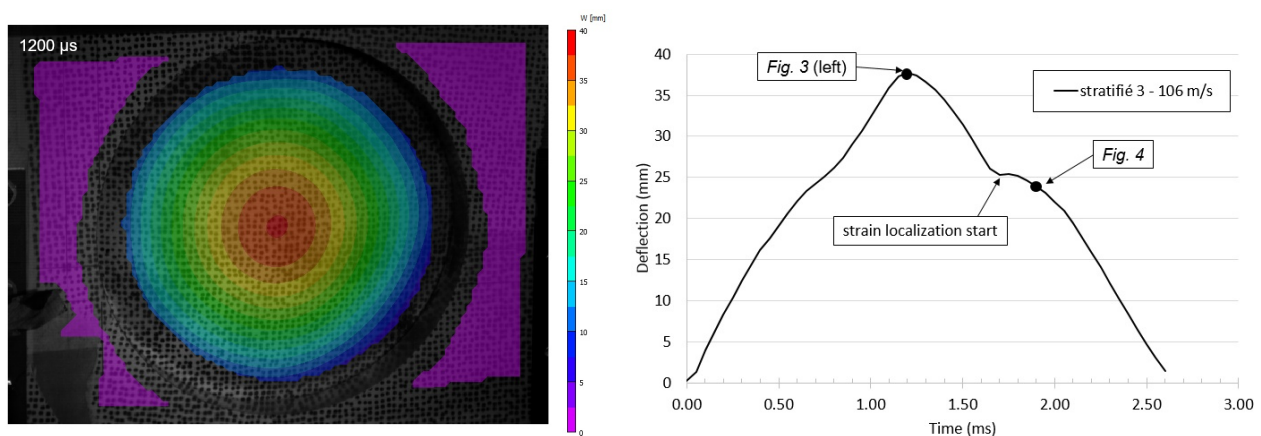


Fig. 4. Corrélation d'image du stratifié 3 impacté à 106 m/s : déplacement hors-plan (gauche), courbe déflexion-temps (droite)

Le traitement de l'ensemble des images permet d'accéder à la déflexion en fonction du temps, voir la Fig. 4 (droite), qui montre une inflexion après le passage par la flèche maximum. Cette inflexion traduit la propagation d'une fissure verticale à partir du haut de l'éprouvette et qui s'arrête à plusieurs centimètres du centre. Cette rupture coïncide avec la localisation des déformations  $\varepsilon_{xx}$  visible sur la Fig. 5 à  $t = 1900 \mu\text{s}$ .

La campagne d'essai a permis d'effectuer plusieurs impacts en échelonnant la vitesse. Les courbes obtenues montrent l'évolution des flèches pour plusieurs vitesses d'impact. La Fig. 6, par exemple, donne les résultats pour le sandwich 2.

La confrontation entre les courbes et l'observation des éprouvettes post-mortem montre que les comportements à rupture sont propres à chaque matériau. Les stratifiés carbone-époxy 1 et 2 possèdent

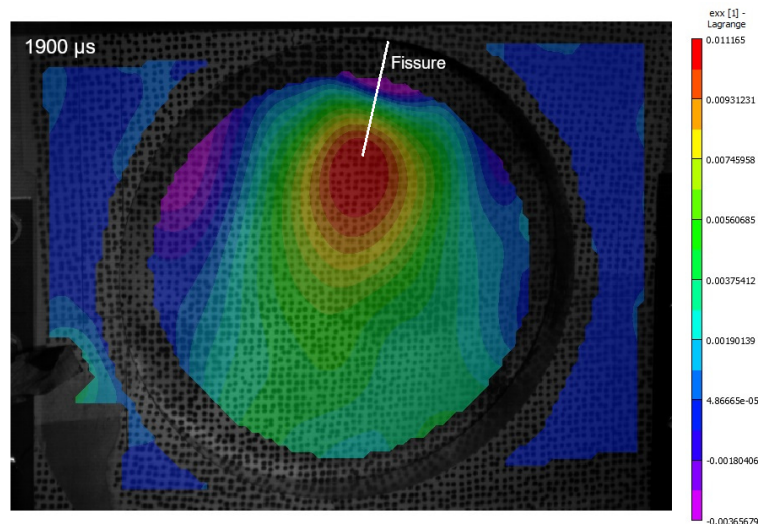


Fig. 5. Localisation des déformations  $\varepsilon_{xx}$  sur le stratifié 3 impacté à 106 m/s : déformations

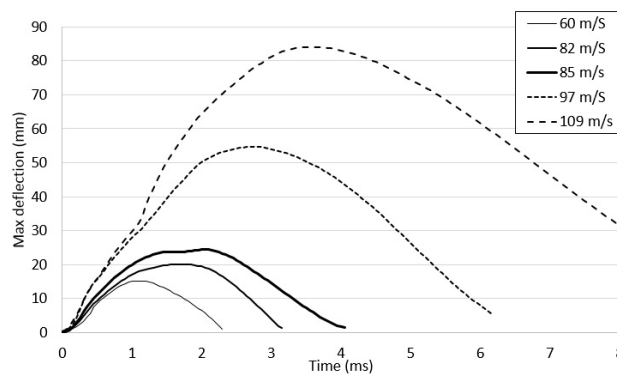


Fig. 6. Déflections maximales en fonction du temps pour le sandwich 2

une rupture brutale et pour le 1, relativement aléatoire. Sa structure très orientée à  $0^\circ$  semble conférer ce comportement : sitôt qu'une rupture apparaît, le matériau s'affaisse immédiatement. Le stratifié 3 possède une rupture beaucoup plus progressive.

Les sandwiches 1 et 2 mènent à des déflexions beaucoup plus importantes, mais conservent une rupture progressive. Les délaminages entre l'âme et les peaux, principaux initiateurs de la rupture, sont bloqués par les renforts, ce qui permet aux matériaux concernés de recharger en contrainte, et leur confère un comportement progressif à la rupture.

### 3.2. Essais de flexion quasi-statique

Des essais de flexion quasi-statique ont été menés sur des éprouvettes de dimension  $600 \times 100 \text{ mm}^2$ . Les essais en chargement monotone ont permis de retrouver les comportements précédents, voir la Fig. 7 : les stratifiés 1 et 2 montrent une rupture brutale et quasi-instantanée et ne peuvent pas recharger dès l'apparition des premiers endommagements. Les scénarios d'endommagement observés sont la propagation de délaminage inter-plis complets. Le stratifié 3 montre une rupture beaucoup plus progressive qui s'explique par un scénario d'endommagement complètement différent : pas de délaminage observés, la rupture se produit par ruptures des plis localisées au milieu de l'éprouvette (entre les appuis), où la flexion est maximum.

Les sandwiches 1 et 2 rompent pour une déflexion beaucoup plus faible, mais la rupture n'est pas instantanée. L'initiation est une fissure de cisaillement dans l'âme qui se propage jusqu'aux peaux pour donner un délaminage âme/peaux. Du fait de la présence de renforts dans l'épaisseur, ces délaminages

sont stoppés régulièrement, ce qui donne un caractère progressif à la rupture.

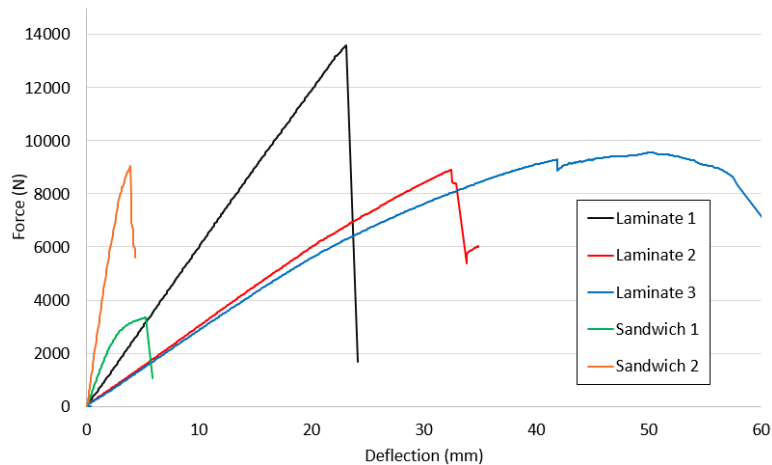


Fig. 7. Essais de flexion quasi-statique monotone

Suite à ces observations, le stratifié 3 et les sandwichs 1 et 2 ont été soumis à des essais de flexion avec cycle de charge/décharge, en augmentant la charge progressivement, de manière à quantifier la perte de raideur des éprouvettes. Ces résultats peuvent être interprétés par le calcul d'une variable d'endommagement "macro" qui mesure la perte de raideur par rapport à la raideur initiale, voir la Fig. 8.

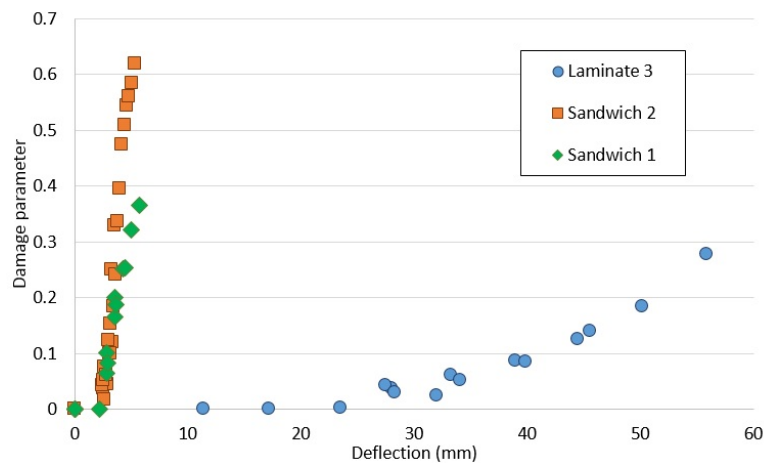


Fig. 8. Endommagement "macro" mesuré par des cycles de charge/décharge en flexion

#### 4. Conclusions

Le travail présenté, basé sur la similarité entre un chargement d'explosion sous-marine et un impact mou à moyenne vitesse, a été appliqué sur cinq matériaux composites du naval. L'exploitation de ces essais montre que les comportements à rupture sous sollicitations dynamiques sévères sont représentatifs des endommagements observés lors d'explosions sous-marine réalisées en bassin de détonique rapportés dans la littérature, ce qui permet de valider l'approche proposée.

De plus la comparaison avec des essais de flexion quasi-statique montre des similitudes de comportement à rupture et a permis de distinguer entre rupture brutale ou rupture progressive des matériaux testés.

## Remerciements

Ce travail a été réalisé avec le soutien financier de la DGA-DGE dans le cadre du projet SUCCESS. Les auteurs souhaitent également remercier Calcul-Meca pour les échanges techniques concernant les simulations numériques de préparation des essais.

## Références

- [1] A. Mouritz « The effect of underwater explosion shock loading on the flexural properties of grp laminates », *International Journal of Impact Engineering* Vol. 18 n° 2, pp. 129 – 139, 1996, ISSN 0734-743X.
- [2] H. Arora, P. A. Hooper, J. P. Dear « The Effects of Air and Underwater Blast on Composite Sandwich Panels and Tubular Laminate Structures », *Experimental Mechanics* Vol. 52 n° 1, pp. 59–81, 2012, ISSN 1741-2765.
- [3] H. D. Espinosa, S. Lee, N. Moldovan « A Novel Fluid Structure Interaction Experiment to Investigate Deformation of Structural Elements Subjected to Impulsive Loading », *Experimental Mechanics* Vol. 46 n° 6, pp. 805–824, 2006, ISSN 1741-2765.
- [4] L. F. Mori, S. Lee, Z. Y. Xue, D. T. Q. A. Vazir and, K. P. Dharmasena, H. N. G. Wadley, J. W. Hutchinson, H. D. Espinosa « Deformation and fracture modes of sandwich structures subjected to underwater impulsive loads », *J. Mech. Mat. Struct.* Vol. 2 n° 10, pp. 1981–2006, 2007.
- [5] E. Wang, N. Gardner, A. Shukla « The blast resistance of sandwich composites with stepwise graded cores », *International Journal of Solids and Structures* Vol. 46 n° 18, pp. 3492 – 3502, 2009, ISSN 0020-7683.
- [6] S. Avachat, M. Zhou « Experimental Analysis of Dynamic Deformation and Damage in Composite Sandwich Structures Subjected to Underwater Impulsive Loads », in : V. Chalivendra, B. Song, D. Casem (Eds.), *Dynamic Behavior of Materials, Volume 1*, Springer New York, New York, NY, ISBN 978-1-4614-4238-7, , pp. 275–286, 2013.
- [7] J. Wilbeck « Impact behavior of low strength projectiles », 1978.
- [8] J. Barber, H. Taylor, J. Wilbeck « Characterization of bird impacts on a rigid plate : part 1 », 1975.
- [9] J. Barber, H. Taylor, J. Wilbeck « Bird impact forces and pressures on rigid and compliant targets », 1978.
- [10] L. Márquez, H. L. Sourne, J.-C. Petiteau « Arbitrary Lagrangian-Eulerian method to study gel projectile impact against composite naval plates », submitted to 7th ECCOMAS thematic conference on the mechanical response of Composites, 18-20 September 2019 Girona Spain.