

Etude expérimentale et numérique de l'influence d'un chargement de traction sur la réponse à l'impact de stratifiés tissés de faible épaisseur

Experimental and numerical study of the influence of a tensile preload on thin woven composite laminates under impact loading

Lara Boutros^{1,2}, Tania Langella³, Pablo Navarro¹, Steven Marguet¹, Jean-François Ferrero¹, Issam Tawk²,
Valentina Lopresto³, Antonio Langella³

1 : Université de Toulouse, Institut Clément Ader
UMR CNRS 5312, INSA/ISAE/MINES Albi/UPS
3 rue Caroline Aigle, 31400 Toulouse
e-mail : pablo.navarro@univ-tlse3.fr

2 : University of Balamand
Deir El-Balamand, El-Koura
Lebanon

3 : Department of Chemical, Materials and Production Engineering
University of Naples Federico II
P. le Tecchio 80, 80125 Naples, Italy

Résumé

Cet article porte sur l'étude de l'influence d'un chargement de traction combiné avec un essai d'impact sur la réponse de stratifiés tissés de faible épaisseur. En effet, l'impact sur structure composite est une source de dommage pénalisante, qui peut entraîner l'apparition de fissurations matricielles, de ruptures de fibres, ou de délaminage. Dans l'étude présentée, des stratifiés constitués de deux plis de tissus carbone/epoxy et d'un pli de tissus verre/epoxy sont impactés à basse vitesse tout en étant sollicités en traction. L'influence du niveau de chargement sur le dommage final, l'effort maximal et la raideur hors plan de l'éprouvette est étudiée. Dans un second temps, ces essais d'impact sous charge sont modélisés en utilisant la stratégie Semie-Continue. Cette stratégie permet d'avoir une représentation précise des dommages locaux induits par un impact à faible ou moyenne vitesse.

Abstract

This article deals with the influence of a tensile preload on the impact behavior of thin composite laminates. Impacts on composite structures is one of the most damaging loadings that can lead to matrix cracking, fiber breakages and delamination. In this study, woven composite laminates made with two plies of carbon/epoxy fabrics and one ply of glass/epoxy fabric are impacted with a low velocity while loaded in tension. The effect of the preload on the impact damage size and shape, and the peak load is experimentally quantified and discussed. Then, these preloaded impact tests are modeled using the Semi-Continuous strategy.

Mots Clés : Impact sous charge, composite tissés, MEF

Keywords : Impact under loading, woven composite fabrics, FEM

1. Introduction

Ce papier traite des impacts à basse vitesse sur des stratifiés tissés de faible épaisseur préchargés. Ce travail s'intéresse particulièrement à un chargement en traction qui pourrait être représentatif de l'action de la force centrifuge sur les pales d'hélicoptère [1,2]. Cette étude est réalisée en deux étapes : un premier volet expérimental, permettant d'observer l'influence de la précharge sur le dommage d'impact ; et un volet numérique où l'impact est modélisé grâce à la stratégie semi-continue présentée dans [3,4,5].

De nombreuses études traitent du comportement à l'impact des structures en composite. Ces travaux, réalisés pour différents matériaux et configuration, sont bien résumés dans les papiers

suisant [6,7,8]. Sous chargement dynamique d'impact, les stratifiés composite présentent un comportement fragile avec de nombreuses fissurations matricielles, du délaminage et des ruptures de fibres. Ces dommages peuvent entraîner une perte de raideur, et éventuellement la rupture complète de la structure. Le comportement à l'impact est influencé par de nombreux paramètres comme la séquence de drapage, la géométrie, la nature des matériaux constitutifs, ainsi que la masse, la géométrie et la vitesse de l'impacteur. L'architecture du matériau de renfort a aussi une grande influence, ce qui peut être observé plus particulièrement pour les composites tissés, pour lesquels les mécanismes d'endommagement locaux vont influencer la réponse globale du stratifié.

De nombreuses études traitent de l'influence d'un chargement de traction sur la réponse à l'impact des stratifiés composites. Dans la plupart des études [9,10,11], très peu d'influence de la précharge sur l'effort de réaction maximal est observée. Néanmoins, [12] et [13] montrent que la présence d'une précharge influence les mécanismes d'endommagement et mène généralement à des dommages d'impact plus importants.

Dans cette étude l'influence d'une précharge de traction est étudiée. Deux stratifiés constitués de 3 plis de tissus composites ainsi que deux structures sandwich sont considérées. Le niveau de préchargement est varié et son influence sur l'effort de réaction et le dommage d'impact est analysé. Dans un deuxième temps, les essais sur les stratifiés sont modélisés pour évaluer la capacité de la modélisation semi-continue à représenter les phénomènes observés expérimentalement.

2. Etude expérimentale

2.1 Présentation des essais

Les éprouvettes testées dans cette étude sont divisées en deux types (Type A et Type B) et en deux configurations par type (Conf1 et Conf2). Les éprouvettes Type A sont des stratifiés tissés constitués de 3 plis : deux plis de tissus carbone/époxy et un pli de tissus verre/époxy. Leur épaisseur est de 1.03 mm. Deux séquences de drapages sont testées, nommées Conf1 et Conf2 et décrites dans (Tab. 1). Ces configurations correspondent à deux drapages classiques pour les peaux des pales d'hélicoptère. Pour la Conf1 le pli inférieur ainsi que le pli du milieu sont des tissus carbone orientés à $\pm 45^\circ$ et le pli supérieur est un pli de verre orienté à $0^\circ/90^\circ$. La deuxième configuration (Conf2) est similaire sauf que le pli inférieur en tissus carbone est orienté à $0^\circ/90^\circ$.

Conf1	G (0/90) [°] C $\pm 45^\circ$ C $\pm 45^\circ$	
Conf2	G (0/90) [°] C $\pm 45^\circ$ C (0/90) [°]	

Tab. 1. Drapages étudiés.

Les éprouvettes Type B sont des panneaux sandwich composés de peaux en tissus composite et une âme en mousse polymère. L'âme est une mousse Rohacell A51 et les peaux sont constituées de 3 plis de tissus composite, avec soit le drapage Conf1, soit le drapage Conf2. L'épaisseur des panneaux est de 22.06 mm.

Les essais sont réalisés grâce à une tour de chute (Fig.1). Ces essais étant très spécifiques, aucune norme n'a été trouvée. Néanmoins, la procédure décrite ci-après est une adaptation de la norme AITM-0010. L'éprouvette est encastrée entre deux mors d'un outillage conçu spécifiquement pour réaliser le chargement de traction (Fig. 2). De plus l'éprouvette est posée sur un cadre rigide de dimension 75x125 mm. L'impacteur est hémisphérique de diamètre 16mm et a une masse de 2kg. La vitesse d'impact est de 3 m/s, ce qui correspond à une énergie d'impact de 9J. Cette valeur a été choisie afin d'obtenir un dommage visible et nous permettre d'observer plus facilement l'influence de la précharge sur celui-ci. L'effort de réaction ainsi que le déplacement de l'impacteur sont enregistrés au cours de l'essai.

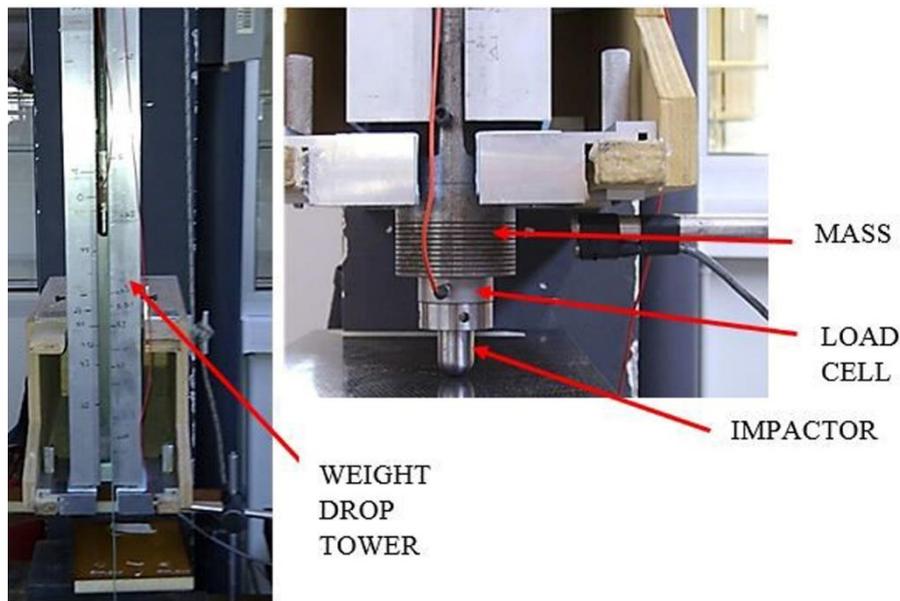


Fig. 1. Tour de chute.

La Fig. 2 montre que le dispositif qui permet d'introduire la précharge en traction est constitué de 4 principales pièces : une base fixe, un cadre en U fixé sur la base fixe, un mors fixe et un mors mobile attaché à une cellule d'effort. La traction est introduite via un système vis-écrou.

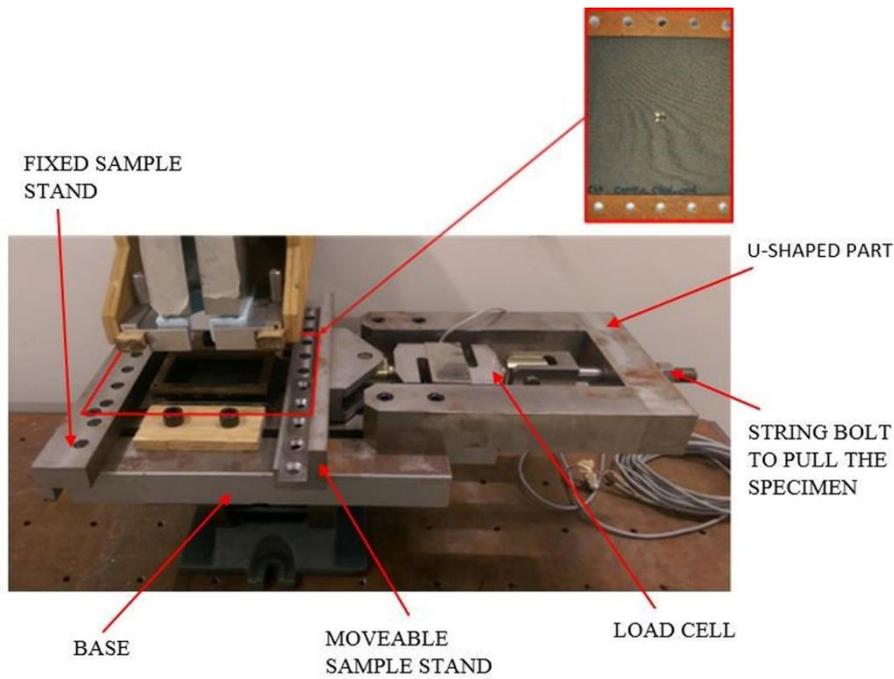


Fig. 2. Dispositif pour introduire la précharge en traction.

Tab. 2 montre les niveaux de préchargement considérés pour cette campagne. Trois valeurs de précharge sont choisies : la première correspond à la valeur sans précharge, la deuxième (15kN) correspond à une précharge intermédiaire, et la troisième est la valeur maximale de la charge que l'on peut appliquer sans que l'éprouvette ne casse de manière explosive sous impact.

TEST n°	Type A- Type B Conf 1		Type A- Type B Conf 2	
	Tensile preload value	Corresponding Tensile strain value	Tensile preload value	Corresponding Tensile strain value
1	0 kN	0 %	0 kN	0 %
2	15 kN	0,5 %	15 kN	0,2 %
3	22.5 kN	0,6 %	30 kN	0,5 %

Tab. 2. Niveaux de précharge appliqués.

Trois essais sont réalisés pour chaque configuration et chaque niveau de chargement pour s'assurer de la reproductivité des résultats.

2.2 Résultats

Dans ce paragraphe, l'influence de la précharge sur la courbe effort de réaction/déplacement et sur la taille du dommage est analysée.

Fig. 3 et Fig. 4 présentent les courbes effort/déplacement pour les éprouvettes Type A. Fig. 4 correspond à la Conf1 et Fig. 5 à la Conf2. Les lignes continues correspondent aux essais à précharge nulle et les lignes pointillées correspondent au premier et second niveau de chargement.

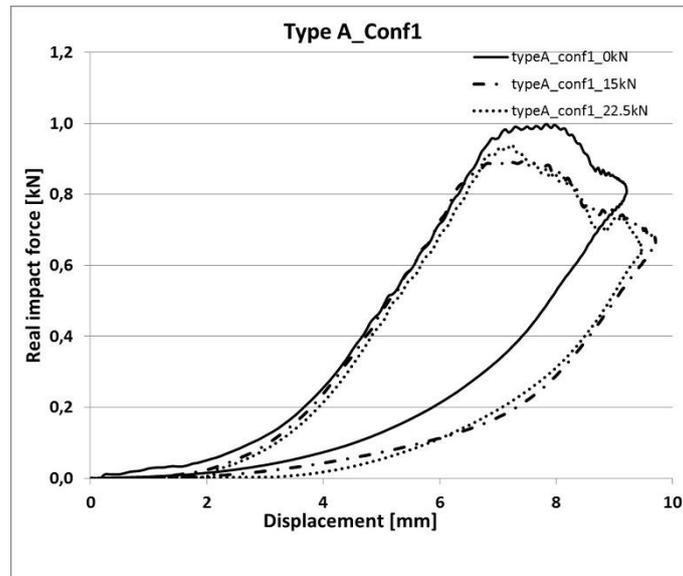


Fig. 3. Courbes effort/déplacement pour les éprouvettes TypeA_Conf1 pour les différents niveaux de précharge.

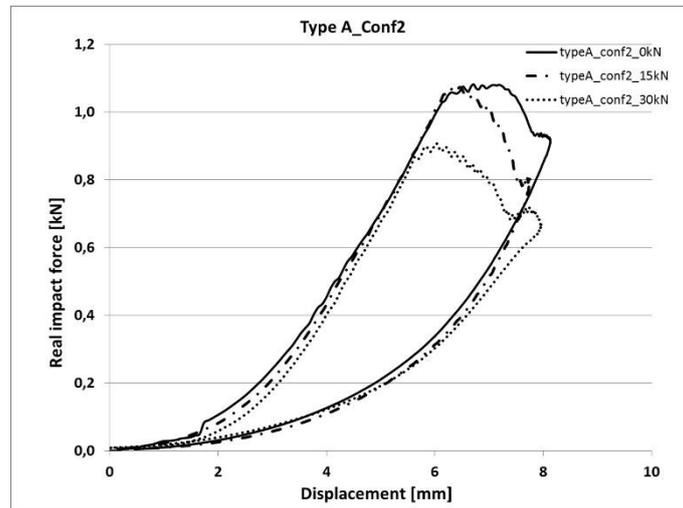


Fig. 4. Courbes effort/déplacement pour les éprouvettes TypeA_Conf2 pour les différents niveaux de précharge.

La forme de la courbe est classique : l'effort d'impact augmente avec l'indentation jusqu'à une valeur maximale. A ce stade, le stratifié est tant endommagé qu'il ne parvient pas de reprendre le chargement : l'effort de réaction diminue. La dernière partie de la courbe, pour laquelle le déplacement diminue, correspond au rebond de l'impacteur. L'aire sous la courbe correspond à l'énergie dissipée dans les mécanismes d'endommagement (fissurations matricielles, délaminages et ruptures de fibres). On n'observe pas d'influence de la précharge sur la raideur apparente et sur l'énergie absorbée. Par contre, une influence sur l'effort maximal est notée. En effet, la valeur de l'effort maximal diminue quand le niveau de précharge augmente. La variation maximale est de 11% pour la Conf1 et de 18.2% pour la Conf2. La valeur du pic d'effort est généralement pilotée par la rupture des fibres. Comme la Conf2 présente plus de fibres orientées dans la direction de la précharge, la chute de la valeur de l'effort maximal mesurée est la plus forte.

Fig. 5 et Fig. 6 présentent les courbes effort/déplacement pour les éprouvettes Type B, c'est-à-dire les éprouvettes sandwiches. Fig. 5 correspond à la Conf1 et Fig. 6 à la Conf2.

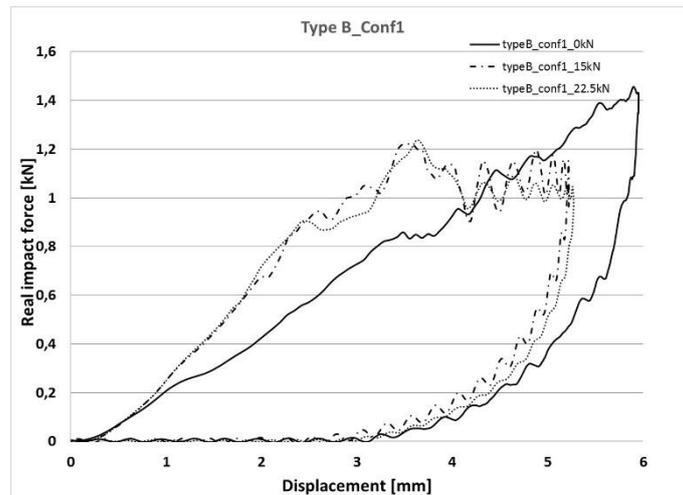


Fig. 5. Courbes effort/déplacement pour les éprouvettes TypeB_Conf1 pour les différents niveaux de précharge.

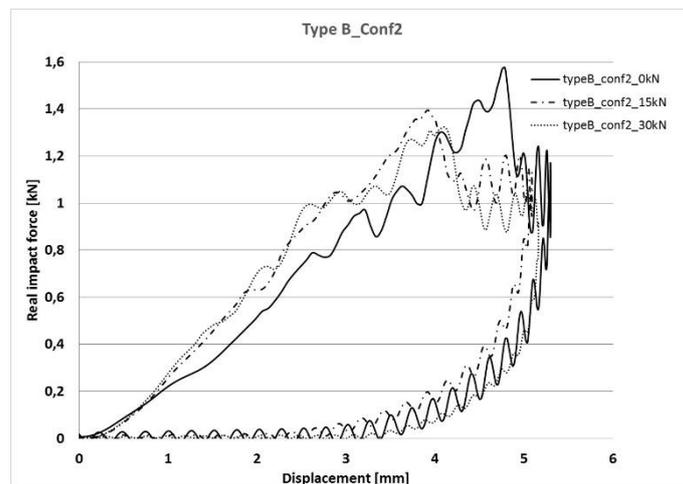
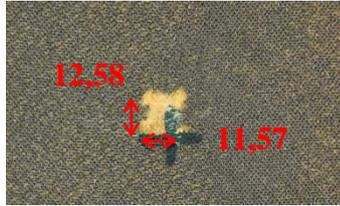
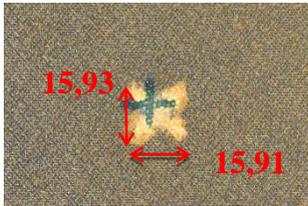
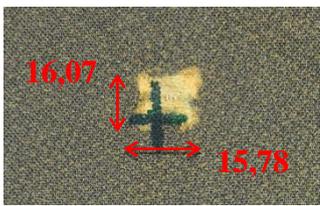
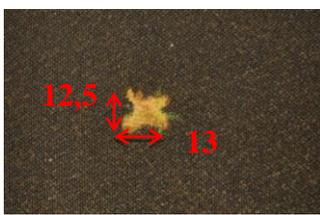
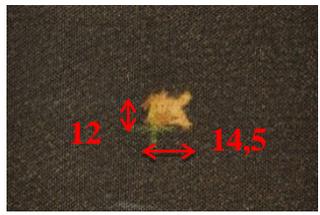


Fig. 6. Courbes effort/déplacement pour les éprouvettes TypeB_Conf2 pour les différents niveaux de précharge.

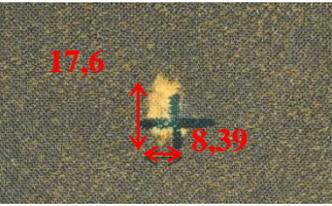
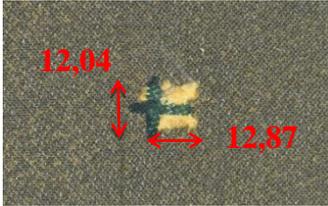
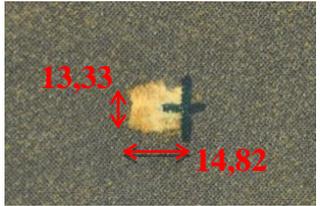
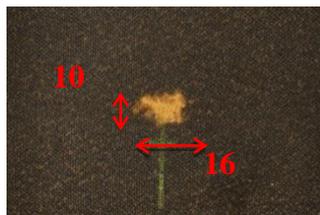
Contrairement à ce qui a été observé pour les éprouvettes Type A, une influence de la précharge sur la raideur hors plan est notée. En effet pour la Conf1, la pente mesurée sous précharge est 43% plus grande que quand il n'y a pas de précharge. Pour la Conf2 la même tendance est observée et la différence de pente est de 25%. En revanche aucune différence de raideur n'est observée entre les deux niveaux de précharge. Pour ce qui est de l'effort maximal, ici aussi une baisse du pic d'effort est mesurée quand le niveau de précharge augmente.

Finalement, les dommages post-impact observés visuellement sont analysés. Tab. 3 et Tab. 4 présentent les faciès de rupture pour tous les types d'éprouvette et pour tous les niveaux de charge. Pour toutes les configurations, une augmentation de la taille du dommage dans la direction perpendiculaire au chargement est observée. En effet on note une augmentation de 27% pour TypeA_Conf1, de 48% pour TypeB_Conf1, de 43% pour TypeA_Conf2 et de 41% pour

TypeB_Conf2. Ces résultats sont cohérents : les fibres dans la direction du chargement sont les plus sollicitées et vont rompre plus facilement, ce qui a pour effet d'allonger le dommage dans la direction perpendiculaire à la précharge.

Tensile load direction	Tensile strain value		
	0%	0.5%	0.6%
Type A Conf1			
Type B Conf1			

Tab. 3. Faciès de rupture pour la Conf1.

Tensile load direction	Tensile strain value		
	0%	0.2%	0.5%
Type A Conf2			
Type B Conf2			

Tab. 4. Faciès de rupture pour la Conf2.

3. Etude Numérique

Les essais présentés dans la partie précédente sur les éprouvettes stratifiées en tissus composite (Type A) ont été modélisée par la méthode des éléments finis en utilisant la stratégie semi-continue présentée dans [2,3,4,5]. Cette modélisation se fait à l'échelle de la maille du tissu. L'idée est de représenter les torons de fibres avec des éléments barres stabilisés par un élément de résine spécifique endommageable. Les plis sont ensuite assemblés grâce à des éléments d'interface spécifiques qui permettent de lier deux éléments 2D. Cette stratégie est implémentée dans des éléments utilisateurs du code de calcul explicite Radioss. Le calcul est réalisé en deux temps : dans un premier temps l'éprouvette est chargée en traction et dans un deuxième temps la plaque est impactée.

Une comparaison des courbes effort/déplacement obtenues par le modèle et expérimentalement sont donnée dans la Fig. 7. Une bonne corrélation est observée, que ce soit en termes de raideur initiale ou d'effort maximal.

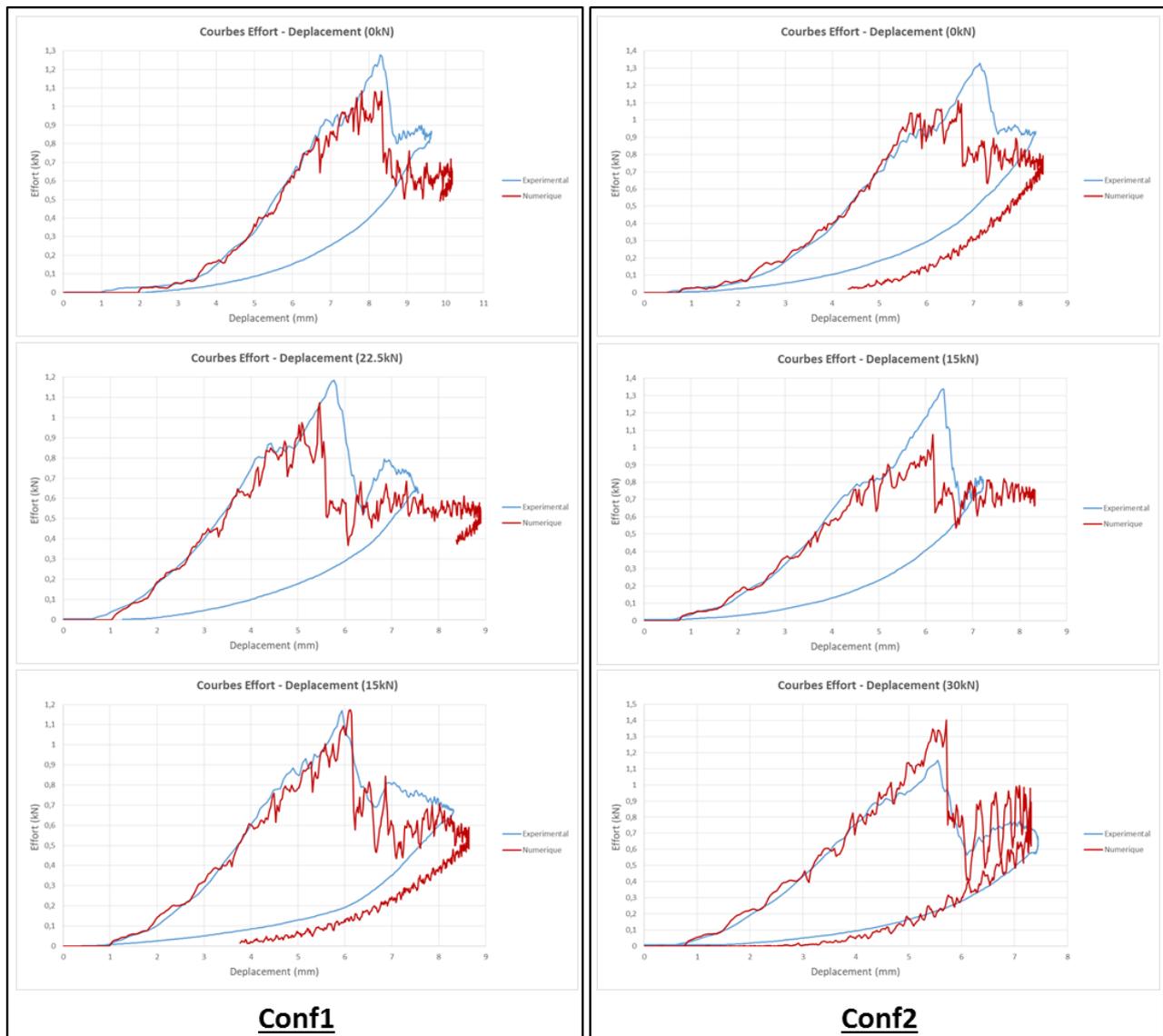
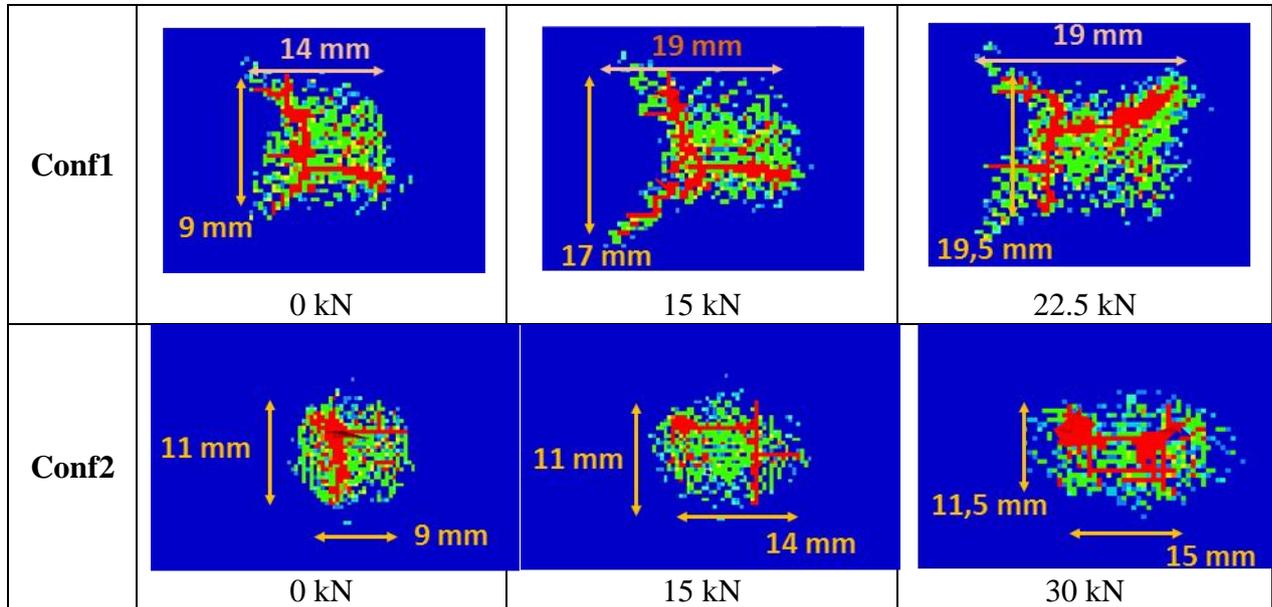


Fig. 7. Comparaison Expérimental/Numérique des courbes effort déplacement

Les faciès de rupture obtenus après calcul sont donnés dans la Tab. 5. Les tailles obtenues numériquement sont en adéquation avec les mesures des dommages expérimentaux. De plus, la modélisation semi-continue proposée permet de bien représenter l'augmentation de la taille du dommage dans la direction perpendiculaire au chargement.



Tab. 5. Faciès de rupture numérique pour la Conf1 et la Conf2.

4. Conclusion

Cet article présente une étude effectuée concernant l'influence d'une précharge en traction sur la réponse à l'impact de stratifiés de faible épaisseur en tissus composites. Deux drapages différents ainsi que deux types d'éprouvettes (stratifié et sandwich) ont été étudiés. Un montage spécifique a été conçu pour pouvoir introduire une précharge en traction tout en effectuant un essai d'impact à basse vitesse sous une tour de chute. Trois niveaux de chargement ont été appliqués. Les courbes effort/déplacement ainsi que les faciès de rupture ont été analysées. Une diminution du pic d'effort et une augmentation de la taille du dommage dans la direction perpendiculaire au chargement sont observés quand le niveau de précharge augmente. La raideur hors-plan quant à elle n'augmente que quand le stratifié est appuyé sur une mousse polymère. Les essais sur les stratifiés ont ensuite été modélisés en utilisant la stratégie semi-continue. Les résultats numériques permettent de bien représenter les mécanismes d'endommagement et l'influence de la précharge.

Références

- [1] P. Navarro, J. Aubry, S. Marguet, J.-F. Ferrero, S. Lemaire and P. Rauch. Experimental and numerical study of oblique impact on woven composite sandwich structure : Influence of the firing axis orientation. *Composite Structures*. 94(6)1967-1972. 2012
- [2] P. Navarro, J. Aubry, S. Marguet, J.-F. Ferrero, S. Lemaire and P. Rauch . Semi-continuous approach for the modelling of thin woven composite panels applied to oblique impacts on helicopter blades. *Composites Part - A: Applied Science and Manufacturing*. 43(6)871-879. 2012
- [3] F. Pascal, P. Navarro, S. Marguet and J.-F. Ferrero. "On the modelling of low to medium velocity impact onto woven composite materials with a 2D semi-continuous approach." *Composite Structures*. 134, 302-310. 2015

- [4] P. Navarro, F. Pascal, J. Aubry, S. Marguet, J.-F. Ferrero, S. Lemaire and P. Rauch, “Semi-continuous approach for the study of impacts on woven composite laminates: modeling interlaminar behaviour with a specific interface element”. *International Journal of Impact Engineering*, Vol 75, pp 184-193. 2014.
- [5] F. Pascal, O. Dorival, P. Navarro, S. Marguet, J. -F. Ferrero. “Impact damage prediction in thin woven composite laminates – Part I: Modeling strategy and validation”. *Composite Structures*, Volume 190, pp 32-42. 2018.
- [6] S. Abrate, *Impact on composite structures*, Cambridge University Press, 1998.
- [7] C. Atas, O. Sayman, An overall view on impact response of woven fabric composite plates, *Composite Structures* 82 (3) (2008) 336–345.
- [8] M. O. W. Richardson, M. J. Wisheart, Review of low-velocity impact properties of composite materials, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 27 (12) (1996) 1123–1131.
- [9] B. Whittingham, I.H. Marshall, T. Mitrevski, R. Jones, The response of composite structures with pre-stress subject to low velocity impact damage, *Compos. Struct.* 66 (2004) 685–698.
- [10] T. Mitrevski, I.H. Marshall, R.S. Thomson, R. Jones, Low-velocity impacts on preloaded GFRP specimens with various impactor shapes, *Compos. Struct.* 76 (2006) 209–217.
- [11] G.A. Schoeppner, S. Abrate, Delamination threshold loads for low velocity impact on composite laminates, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 31 (2000) 903–915.
- [12] A.K. Pickett, M.R.C. Fouinneteau, P. Middendorf, Test and modelling of impact on pre-loaded composite panels, *Appl. Compos. Mater.* 16 (2009) 225–244.
- [13] S.-T. Chiu, Y.-Y. Liou, Y.-C. Chang, C. Ong, Low velocity impact behavior of prestressed composite laminates, *Mater. Chem. Phys.* 47 (1997) 268–272.