

Renforcement de préformes par piquage pour applications composites épaisses de forme complexe.

Preform reinforcements by tufting for thick composite with complex shape

Imen Gnaba¹, Jin Huang², Masoud Bodaghi³, Peng Wang¹, Philippe Boisse², Chung Hae Park³, Vincent Loriaud⁴, Olivier Thouron⁵, Patrick De Luca⁶, Xavier Legrand¹, Nahïène Hamila², Mylène Lagardère³, Yohann Ledru⁴, Jean-Philippe Missonier⁵, Damien Soulat^{1*}

1 : Université Lille Nord de France, GEMTEX (EA n°2461, ENSAIT)

2 Allée Louise et Victor Champier, BP 30329-59056 Roubaix Cedex 1 France

email : imen.gnaba@ensait.fr, peng.wang@ensait.fr, xavier.legrand@ensait.fr, damien.soulat@ensait.fr

2 : INSA-Lyon, LAMCOS (UMR 5259 CNRS)

27, Avenue Jean Capelle, 69621 Villeurbanne

email : jin.huang@insa-lyon.fr, philippe.boisse@insa-lyon.fr, nahiene.hamila@insa-lyon.fr.

3 : IMT Lille Douai/Département TPCIM/ARMINES

941 rue Charles Bourseul 59508 Douai

email masoud.bodaghi@imt-lille-douai.fr, chung-hae.park@imt-lille-douai.fr, mylene.lagardere@imt-lille-douai.fr.

4 : MECANO-ID

9 rue Paul Charrier, 31100 Toulouse

email : v.loriaud@mecano-id.fr, y.ledru@mecano-id.fr

5 : SCHAPPE TECHNIQUES

8, rue d'Alsace 88520 La Croix aux Mines

email : OThouron@schappe.com, jpmissonnier@schappe.com.

6 : ESI Group

25 rue Marcel Issartier, 33700 Mérignac

email : Patrick.de.Luca@esi-group.com

Résumé

De nombreux composites à base de renforts dits 3D, au sens qu'ils incluent des renforts dans l'épaisseur, ont été développés pour surmonter des problèmes inhérents aux stratifiés conventionnels, tels que leur faible résistance à la délamination et leur faible tolérance aux dommages lors de l'impact. Le renforcement dans l'épaisseur peut-être obtenu à l'aide de diverses technologies textiles, dont le tissage 3D, le tricotage 3D et le tressage 3D, qui permettent de fabriquer ces renforts en une étape, mais également par des techniques de renforcement de couches stratifiées, par couture (ou stitching, utilisée pour les NCF), par piquage (tufting) ou par Z-pinning. Afin d'analyser l'influence du renforcement par piquage lors des étapes de fabrication des composites un consortium de partenaires industriels et académiques s'est constitué et propose d'exposer les différents travaux réalisés. Ces travaux portent tout autant sur les paramètres associés au banc de renforcement par piquage, mais également sur la chaîne de caractérisation des structures renforcées. Adossée à cette chaîne de caractérisation, les développements concernent la modélisation du comportement des structures renforcées par piquage en vue de la simulation de l'étape de préformage. Les démonstrateurs, à l'échelle industrielle, qui serviront d'applications supports seront également abordés.

Abstract

A large variety of composites based on 3D reinforcements, in the sense that they include reinforcements in thickness, have been developed to improve laminate properties such as their low delamination resistance and low tolerance to impact damage. Thickness reinforcement can be achieved using various textile technologies, including 3D weaving, 3D knitting and 3D braiding, which make it possible to manufacture these reinforcements in one step, but also by reinforcement of multilayer as by stitching, tufting or Z-pinning. In order to analyse the influence of stitching reinforcement during the composite manufacturing steps, a consortium of industrial and academic partners has been formed and proposes to present the various works carried out. This work concerns both the parameters associated to the tufting process, but also the characterization chain of reinforced structures. Associated to this characterization chain, the work also includes the development of behavior model of tufted structures in order to simulate the preforming step. Demonstrators, on an industrial scale, will be also presented.

Mots Clés : Renfort 3D, Composites, Procédés de fabrication, Caractérisation mécanique, Simulation.

Keywords: Through-the-thickness reinforcement, Composite Materials, Manufacturing processes, Mechanical identification,

1. Introduction

Les matériaux composites stratifiés sont de plus en plus utilisés pour leur capacité à supporter de fortes charges. Ils se composent de plusieurs couches de renforts empilées et noyées dans une résine. Cette résine assure seule la connexion entre les plis et les zones inter-laminaires sont par conséquent sujettes à des endommagements, en raison de la plus faible ténacité à rupture de la résine [1]. En augmentant la résistance à l'amorçage et à la propagation des fissures entre les couches de renfort, les techniques de renforcement dans l'épaisseur peuvent améliorer considérablement cette résistance à la rupture inter-laminaire. Différentes technologies de renforcement dans l'épaisseur, issues des procédés de fabrication textiles, ont été décrites dans la littérature [2,3] et parmi celles-ci, le renforcement par piquage (tufting) permet un renforcement localisé sans nécessiter un accès aux deux faces de l'empilement [4-6]. Par ailleurs cette technologie est industrialisée à l'aide de têtes de piquage robotisées qui permettent de se déplacer sur des surfaces drappées, courbes ou planes, afin d'y insérer le renfort au travers de l'épaisseur. L'influence sur les propriétés mécaniques des composites élaborés à partir de ces renforts, dits 3D, fait l'objet de différentes études décrivant soit l'augmentation de la résistance à rupture hors-plan mais également la réduction de propriétés dans le plan à cause de l'insertion de ces renforts fibreux dans l'épaisseur [7, 8]. Par contre peu de travaux porte sur l'influence de ce renforcement lors des étapes de fabrication des composites, et notamment lors des procédés LCM, au cours des phases de préformage et d'injection de résine. Or de nombreux défauts, spécifiquement liés au nombre de couches et à leurs orientations, ont été décrits lors du préformage de multiplis (plis, glissement inter-couches) [9, 10] qu'un lien dans l'épaisseur pourrait conduire à minimiser [11, 12]. Par ailleurs la présence de renforts fibreux perpendiculairement au flux de résine conduit-elle à réduire la perméabilité de l'empilement ? Enfin, la technologie de renforcement par piquage est-elle adéquate pour toutes les géométries et sollicitations de pièces composites ? Sur la base de ces verrous, cette étude, issue d'un consortium, au sein d'un projet soutenu par l'ANR, propose de répondre à un certain nombre de ces questions par des approches associées à la maîtrise des paramètres de piquage, à la caractérisation des structures renforcés par piquage, mais également par la modélisation du comportement de ces structures piquées en vue de la simulation des étapes du procédé. Dans une première partie ce papier présentera le dispositif de piquage, puis les premiers résultats de caractérisation expérimentale. Les stratégies de modélisation et les démonstrateurs supports de ce programme concluront cet article.

2. Renforcement dans l'épaisseur par piquage.

Dans le cadre de ce projet les plis à renforcer concernent respectivement des tissus de verre et de carbone. Les tissus taffetas de verre (160 g/m^2) ont une contexture respective de 11.8 et 10.7 fils/cm en direction chaîne et trame. Le tissu de carbone (mèches de 6K) est un satin de 5 (290 g/m^2) de contexture de 6.5 fils/cm en direction chaîne et trame. Plusieurs couches de ces renforts sont empilées afin d'être renforcées par piquage sur un banc de piquage développé au laboratoire GEMTEX [13] et représenté Fig.1.

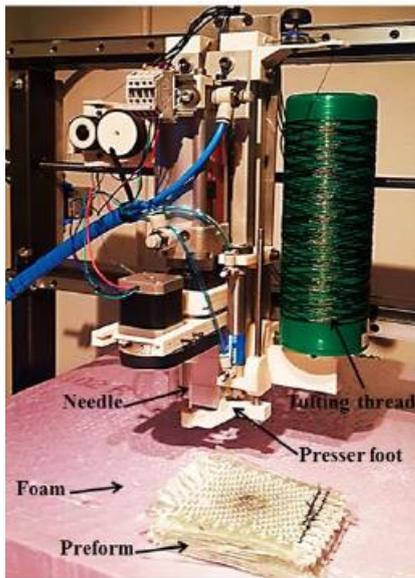


Fig. 1. Banc de piquage.

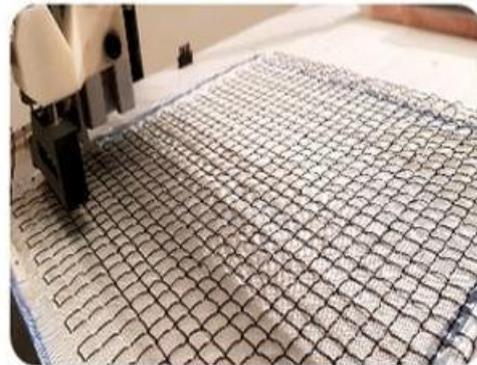


Fig. 2. Renforcement par piquage de tissus de verre.

Le dispositif est constitué d'une tête de piquage positionnée sur un bâti mobile et sur laquelle une aiguille creuse est placée. Celle-ci est liée à des vérins pneumatiques permettant le contrôle de la profondeur de piquage. Un pied presseur, actionné par le biais d'un vérin pneumatique, permet de maintenir la préforme et d'exercer une certaine pression lors du procédé de piquage. La bobine alimente le fil de piquage avec une certaine tension et longueur. Le fil est ainsi introduit par l'intermédiaire de l'aiguille et reste maintenu dans l'empilement par frottement lors du retrait de l'aiguille, créant ainsi des boucles. Dans le cadre de cette étude le fil traverse perpendiculairement l'entièreté de l'empilement. Les structures piquées sont caractérisées par un certain nombre de paramètres dont le fil de piquage qui doit être choisi en adéquation avec la taille de l'aiguille. Des études préalables de piquabilité des renforts concernés, élaborées avec la société Schappe Techniques, ont permis de retenir un fil de piquage en carbone (2* 1K 67 Tex 15S). Le pas de piquage (ou densité), le motif de piquage, ainsi que la longueur des boucles sont les autres paramètres des préformes piquées. Une illustration du renforcement de 4 plis de verres, selon un motif de piquage à « $0/90^\circ$ » avec un pas de piquage de 10 mm est donnée Fig.2.

3. Caractérisation des préformes piquées pour la simulation des procédés

3.1 Caractérisations élémentaires pour l'étape de préformage.

Les renforts (secs) sont assujettis lors de l'étape de préformage à de multiples modes de déformation membranaires (déformation de tension, de cisaillement plan) et hors-plan (flexion, glissement de couches, compaction) [14]. L'identification de ces modes de déformation est réalisée de manière découplée par des essais de traction, de cisaillement plan, ou de flexion. Les essais de traction sont présentés ici sur les renforts de verre (4 couches) renforcés par piquage avec 3 motifs différents de piquage (selon la direction de traction ou « 90° », « 0° » et « $0/90^\circ$ »). Ces essais de traction uniaxiaux sont réalisés sur des éprouvettes ayant une longueur de 200 mm (entre les mors) et à une vitesse de 100 mm/min. On reporte Fig.3 une vue des éprouvettes piquées et non-piquées ainsi que les courbes effort-déformation issues de ces essais de traction. On constate que le procédé de piquage a tendance à affecter le comportement en traction, notamment avec une diminution de l'effort maximal, et un décalage de la zone d'alignement des renforts dans la direction de sollicitation. Notons que le piquage dans les deux directions ($0/90^\circ$) diminue de manière conséquente l'effort à rupture.

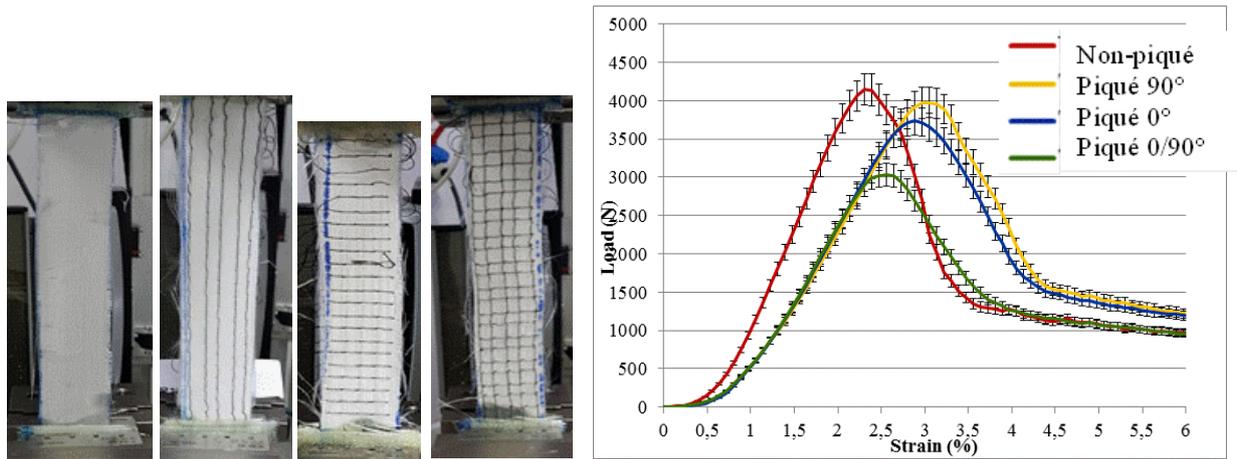


Fig. 3. Eprouvettes à l'état initial (non piquée et piquées). Courbes effort-déformation des essais de traction

Des essais de Bias-tests [15, 16] sont également effectués afin d'analyser l'influence du piquage sur le comportement en cisaillement plan. Les résultats sont présentés ici sur 4 couches de tissus de carbone renforcés avec les mêmes paramètres de piquage (fil de piquage, densité et motifs de piquage) que ceux utilisés pour le renfort de verre. Le comportement est comparé avec le même renfort non piqué. Les éprouvettes sont de dimension de 200x50 mm². On reporte Fig.4 respectivement les courbes associées aux quantités globales (effort-déplacement), mais également l'effort en fonction de l'angle de cisaillement mesuré par corrélation d'images dans la zone en cisaillement pur. On constate que le renforcement par piquage, quel que soit le motif, modifie la rigidification en cisaillement qui survient plus tôt par rapport à la structure non-piquée. Par ailleurs vue l'évolution de l'angle de cisaillement, le piquage semble bloquer la rotation des mèches.

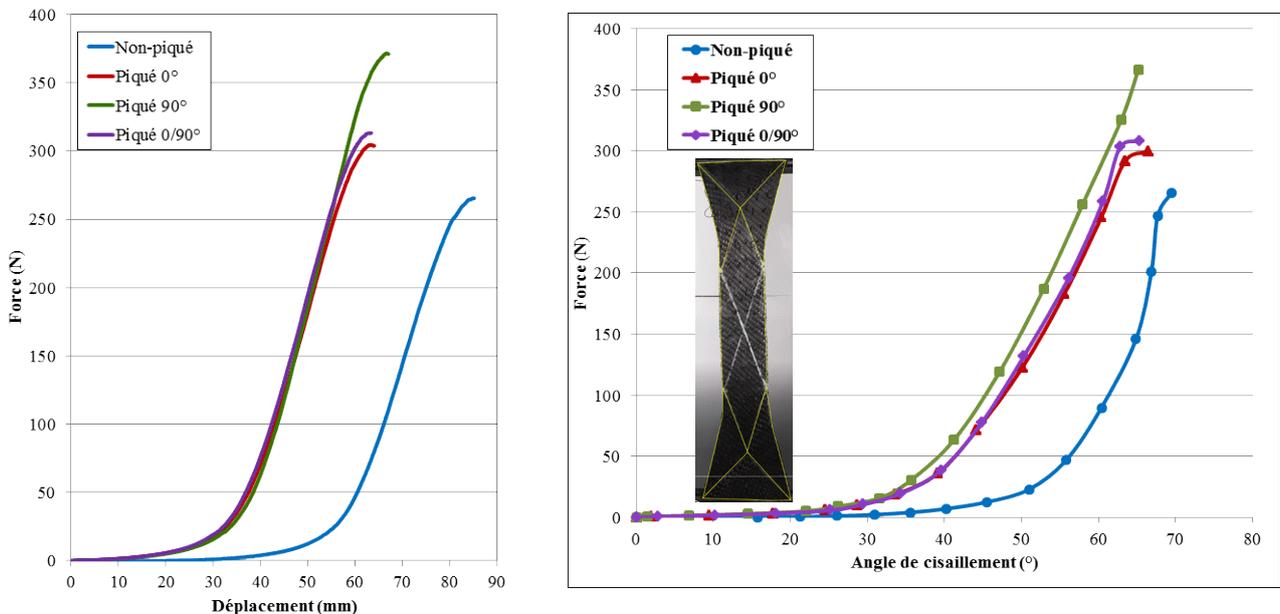


Fig. 4. Comportement en cisaillement plan des préformes carbonées piquées.

3.2 Identification de la perméabilité des structures piquées.

La perméabilité des renforts de verre piqués et non-piqués a été mesurée par des expériences d'injection rectiligne. Une préforme rectangulaire aux dimensions de 250×110×1.1 mm³ a été déposée dans un moule et une huile de silicone avec une viscosité de 0.140 Pa.s a été injectée sous une pression constante de 0.85 bar (Fig.5).

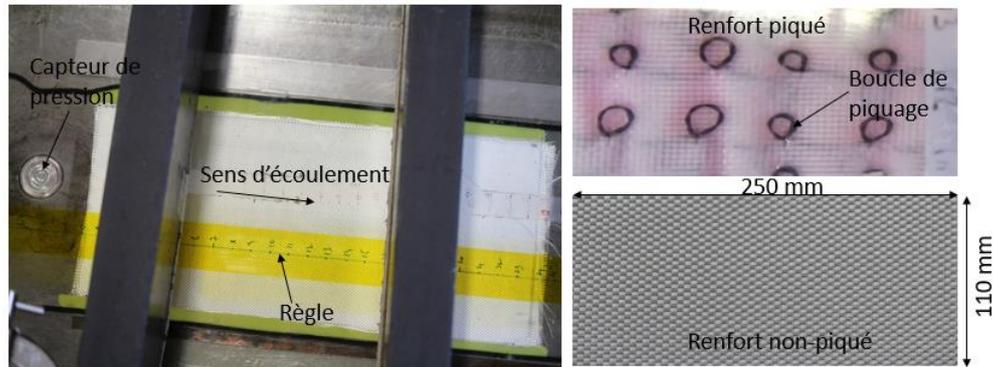


Fig. 5. Dispositif de mesure de la perméabilité et renforts de verre piqués et non-piqués.

Au cours du remplissage du moule, l'avancement de la position du front a été observé par une caméra et les données de la position du front en fonction du temps ont été utilisées pour calculer la valeur de la perméabilité insaturée, K_{unsat} , par la loi de Darcy transitoire et la méthode des moindres carrés [17]. Dès que la préforme a été complètement imprégnée, le régime de l'écoulement stabilisé, la valeur de la perméabilité saturée, K_{sat} , a été déterminée selon la loi de Darcy en utilisant le gradient de pression et le débit de l'écoulement [17]. Trois mesures ont été réalisées sous la même condition et la valeur moyenne de la perméabilité a été obtenue. Les résultats expérimentaux sont présentés dans le Tableau 1. On peut constater que la perméabilité insaturée du renfort piqué est inférieure à celle du renfort non-piqué alors que la différence de la perméabilité saturée entre les renforts non-piqués et piqués est négligeable. On a pu observer que les bulles d'air ont été piégées par les boucles de piquage pendant l'imprégnation ce qui peut réduire la perméabilité non-saturée [18]. Cependant, ces bulles d'air ont été évacuées dès que la préforme a été complètement saturée.

Renfort	K_{unsat} [m ²]	K_{sat} [m ²]	K_{sat}/K_{unsat}
Non-piqué	$6,80 \times 10^{-11}$	$1,35 \times 10^{-10}$	1,90
Piqué	$4,86 \times 10^{-11}$	$1,24 \times 10^{-10}$	2,55

Tab.1. Résultats expérimentaux de la perméabilité.

4. Modèles de comportement pour la simulation de l'étape de préformage.

4.1 Simulation de la mise en forme des renforts multicouches

Les modèles géométriques des outils (moules, poinçons et serre flans) pour la simulation de l'étape de préformage des renforts secs concernent dans la littérature et principalement les formes hémisphérique, tétraédrique et en double dôme. Ces trois géométries sont les plus utilisées pour tester et valider les modèles numériques. Le modèle hémisphérique est présenté sur la Fig. 6.

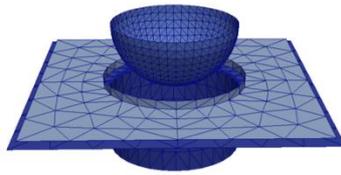


Fig.6. Géométrie de référence pour le préformage hémisphérique

Afin de valider ces modèles numériques, il est nécessaire de comparer la simulation avec l'expérience. Concernant le préformage, dit en double-dôme, et pour des monocouches, la Fig. 7 montre bien la capacité du modèle numérique à prédire l'état final du matériau. Le comportement en cisaillement et le plissement du tissu sont bien caractérisés [19].



Fig.7. Simulation de l'emboutissage de monocouche sur géométrie double-dôme

Concernant le préformage de multicouches, la Fig. 8 montre qu'il existe un glissement entre les différentes couches ayant des orientations différentes. Le comportement au glissement dépend de l'état de chargement imposé pour chaque type d'emboutissage. Ces développements sont réalisés sur le logiciel PlasFib2 développé par l'INSA de Lyon [20].

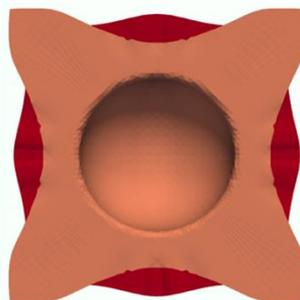


Fig.8. Simulation de l'emboutissage de multicouches

4.2 Modèles existants pour simuler la liaison entre les couches

Il existe de nombreuses méthodes qui permettent de modéliser la liaison entre les couches de renforts, comme illustré sur la Fig.9, dans le cas d'un fil de liage tricoté pour les NCF (Non-Crimp Fabric) [21]. Ces modèles utilisent un élément barre pour simuler la liaison. Cet élément a un

comportement spécifique de contact avec les couches de renforts. Cependant, ils prennent uniquement en compte la liaison entre deux couches successives. Pour le renforcement par piquage, le fil inséré peut relier jusqu'à n couches. Si le nombre de couche est supérieur à deux, alors, les modèles existants ne peuvent pas être appliqués pour modéliser le piquage, et nécessitent des développements spécifiques.

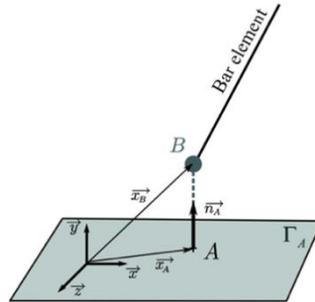


Fig.9. Modèle numérique pour simuler la liaison entre les couches [21].

5. Démonstrateurs.

Des démonstrateurs avec une géométrie complexe seront fabriqués en utilisant les renforts non-piqués et piqués. Concernant les renforts de verres la forme et les dimensions (en mm) du moule sont présentées dans la Fig.10 Le raidisseur courbe a une profondeur de 60 mm et un angle de dépouillement de 45 à 55°. L'épaisseur d'une pièce à fabriquer est entre 1 à 8 mm.

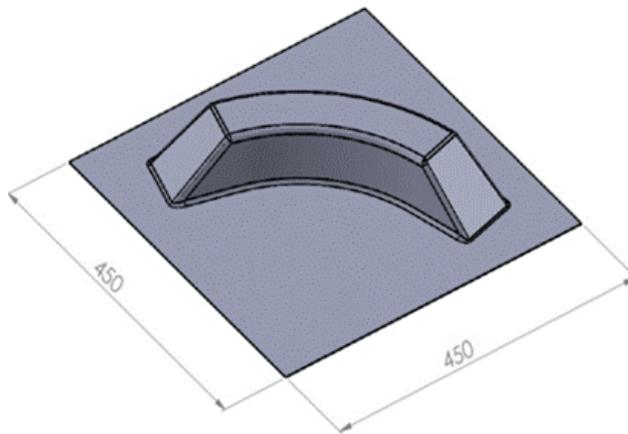


Fig. 10. Géométrie du moule pour le démonstrateur en renforts de verre piqués.

Pour le démonstrateur carbone, l'application visée est une cornière de jonction pour panneaux satellites. Ces cornières collées ont un design spécifique, breveté par la société Mecano-ID (Fig.11).

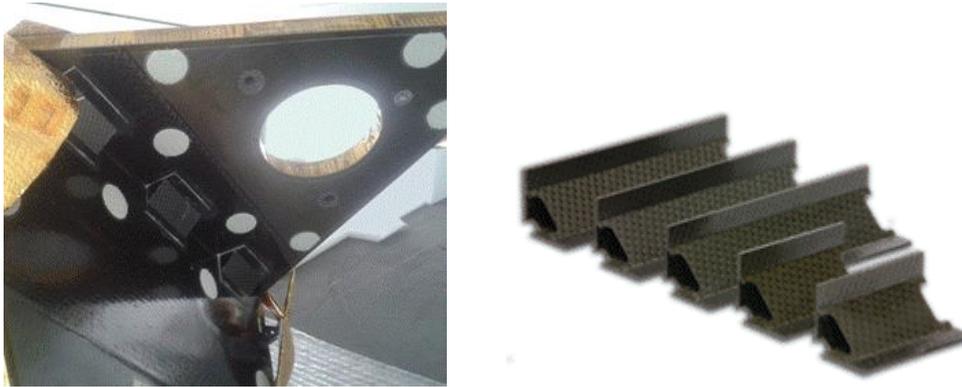


Fig. 11. Cornière de jonction de panneaux satellites, pour le démonstrateur carbone.

Pour ces démonstrateurs le comportement au préformage des préformes renforcées par piquage est préalablement analysé lors d'essais d'emboutissage conduits sur des géométries standards. On reporte ainsi Fig.12 les premiers essais sur un empilement de 4 couches avec des orientations différentes $[0^\circ/90^\circ, -45^\circ, 45^\circ]$ renforcé par piquage à 90° qui est préformé sur un poinçon hémisphérique avec une pression serre-flan de 0.2 Mpa. Ces essais sont menés sur un banc de préformage disponible au laboratoire GEMTEX décrits dans [22, 23]. L'analyse des défauts de type glissements des couches, plis mais également désorientation des fils de piquage est alors conduite. Ces essais permettent de corréliser avec les résultats de simulation numérique de cette étape.

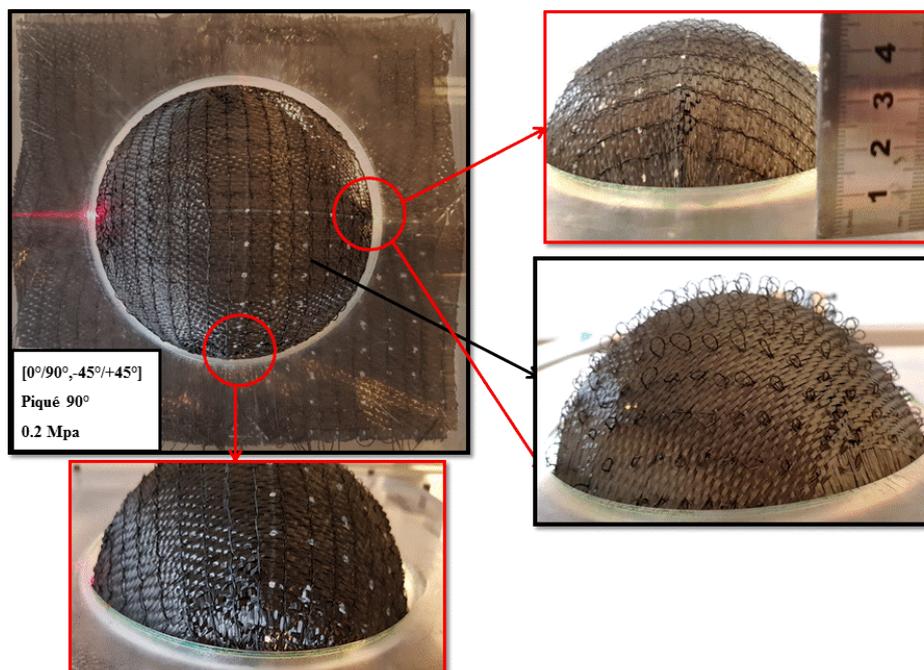


Fig. 12. Emboutissage sur poinçon hémisphérique de tissus carbone renforcés par piquage

6. Conclusions

Le renforcement dans l'épaisseur de multicouches est largement décrit dans la littérature, que ce soit par la maîtrise des paramètres des différentes technologies textiles utilisées (tissage ou tressage 3D, renforcement par couture, piquage ou Z-pinning) ou pour l'influence de cette insertion sur le comportement mécanique (dans et hors-plan) des pièces composites élaborées à partir de ces préformes renforcées. Peu d'études porte sur les conséquences de ce renforcement lors des étapes des procédés d'élaboration des composites, alors que ces phases de fabrication conditionnent de manière importante la qualité de la pièce composite. Parmi ces technologies, ce papier se focalise sur les potentialités du renforcement par piquage, de différentes natures de renfort (verre, carbone) plus spécifiquement lors des étapes de fabrication des matériaux composites. A l'aide d'approches expérimentales l'objectif est de comprendre le comportement des multicouches renforcées par piquage, notamment sur les modes de déformation (traction, cisaillement, perméabilité) concernés par ces étapes et d'établir des bases de données nécessaires à la modélisation du comportement pour les outils de simulations développés en parallèle de ces tâches expérimentales. Ces travaux s'appuient, en amont, sur la maîtrise de la « piquabilité » lors du procédé de piquage des différents renforts [24]. Ce papier s'est par ailleurs attaché à présenter les applications finales, supports de cette étude, qui seront élaborées au titre de démonstrateur. A l'échelle de ces pièces, l'apport de la simulation numérique des procédés sera un atout pour limiter le nombre d'essais.

Remerciements

La présente étude s'intègre dans le cadre du projet «Comp3Dre », financé par l'ANR.

7. Références

- [1] M. R. Wisnom, « The role of delamination in failure of fibre-reinforced composites », *Philosophical transactions of the Royal Society*. vol. 370, pp. 1850–1870, 2012.
- [2] I. Gnaba, P. Wang, X. Legrand et D. Soulat « Through-the-thickness reinforcement for composite structures: A review », *Journal of Industrial Textiles*, 2018, <https://doi.org/10.1177/1528083718772299>.
- [3] Mouritz AP, Bannister MK, Falzon PJ, et al. « Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile », *Composites Part A* 1999; 30: 1445–1461.
- [4] Henao A, Carrera M, Miravete A, et al. « Mechanical performance of through-thickness tufted sandwich structures », *Composite Structures*, 2010; 92: 2052–2059.
- [5] Dell'Anno G, Treiber JW, Partridge IK. « Manufacturing of composite parts reinforced through-thickness by tufting », *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 2016; 37: 262–272.
- [6] Hartley JW, Kratz J, Ward C, et al. « Effect of tufting density and loop length on the crushing behaviour of tufted sandwich specimens ». *Composites Part A* 2016; 112: 49–56.
- [7] Alan Martins. « Analysis of damage mechanisms in composite structures reinforced by tufting ». Thèse de l'Université de Technologie de Compiègne, 2018.
- [8] Mouritz A.P. « Three-dimensional (3D) fibre reinforcement for composites ». Chapter 6. In: Boisse P (ed.) *Composite reinforcements for optimum performance*, Woodhead Publishing, 2011.
- [9] Wang P, Hamila N, Boisse P. Thermoforming simulation of multilayer composites with continuous fibres and thermoplastic matrix ». *Composites Part B* 2013;52:127–36.
- [10] S. Allaoui, C. Cellard, G. Hivet. « Effect of inter-ply sliding on the quality of multilayer interlock dry fabric Preforms », *Composites Part A* 2015; 68: 336-345.
- [11] Liu L, Zhang T, Wang P, Legrand X., Soulat D. « Influence of the tufting yarns on formability of tufted 3-dimensional composite reinforcement ». *Composites Part A* 2015; 78: 403–411.
- [12] Dufour C., Boussu F., Wang P, Soulat D. « Local strain measurements of yarns inside of 3D warp interlock fabric during forming process ». *International Journal of Material Forming* 2018; 11 (6): 775-788.
- [13] I. Gnaba, P. Wang, X. Legrand, D. Soulat. « Manufacturing and characterization of tufted preform with complex shape ». *Advances in Aircraft and Spacecraft Science*, 2019, Vol. 6, No. 2: 105-116.
- [14] Boisse P., Colmars J., Hamila N., Naouar N., Steer Q. « Bending and wrinkling of composite fiber preforms and prepregs. A review and new developments in the draping simulations ». *Composites Part B* 2018;141:234-249.
- [15] P. Boisse, N. Hamila, E. Guzman-Maldonado, A. Madeo, G. Hivet, F. Dell'Isola « The bias-extension test for the analysis of in-plane shear properties of textile composite reinforcements and prepregs: a review » *International Journal of Material Forming* , 10 (4): 473-492, 2017.

- [16] J.Pourtier, B.Duchamp, M. Kowalski, P.Wang, X. Legrand, D. Soulat. « Two-way approach for deformation analysis of non-crimp fabrics in uniaxial bias extension tests based on pure and simple shear assumption ». *International Journal of Material Forming* , published on line March 29, 2019, <https://doi.org/10.1007/s12289-019-01481-8>.
- [17] C.H. Park, P. Krawczak, « Unsaturated and saturated permeabilities of fiber reinforcement: critics and suggestion », *Frontiers in Materials* 2, pp. 38, 2015.
- [18] S. Gueroult, A. Lebel-Lavacry, C.H. Park, L. Bizet, A. Saouab, J. Bréard, « Analytical modeling and in situ measurement of void formation in liquid composite molding processes », *Advanced Composite Materials* 23(1), pp. 31-42, 2014.
- [19] M.A. Khan, T. Mabrouki,, P. Boisse. «Numerical and Experimental Forming Analysis of Woven Composites with Double Dome Benchmark. » *International Journal of Material Forming* 2009, 2 (1): 201. <https://doi.org/10.1007/s12289-009-0549-y>.
- [20] N. Hamila. « Simulation de La Mise En Forme Des Renforts Composites Mono et Multi Plis. » PhD Thesis, INSA de Lyon, 2007.
- [21] S. Bel, N. Hamila, P. Boisse, F. Dumont. « Finite Element Model for NCF Composite Reinforcement Preforming: Importance of Inter-Ply Sliding. » *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2012, 43 (12): 2269–77. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.08.005>
- [22] Jacquot PB, Wang P, Soulat D, Legrand X. « Analysis of the preforming behaviour of the braided and woven flax/polyamide fabrics », *Journal of Industrial Textiles*, 46(3) :698-718, 2016;46:698–718.
- [23] Xiao S, Wang P, Soulat D, Legrand X, Gao H, « Towards the deformability of triaxial braided composite reinforcement during manufacturing », *Composites Part B*, published on line, 16/04/2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.04.017>.
- [24] C. Hui, P. Wang, X. Legrand. « Improvement of tufting mechanism during the advanced 3-dimensional tufted composites manufacturing: To the optimisation of tufting threads degradation. » *Composite Structures*, 2019, vol.220:423-430.