

ÉDITORIAL



La fabrication additive est devenue un procédé de fabrication majeur dans l'escarcelle des moyens de production industriels. Déclinée sous diverses formes, plus ou moins inspirées du soudage ou du frittage, appliquée à des matériaux polymères puis métalliques, elle suscite parfois engouement, d'autres fois méfiance, avec quelques succès à son actif, mais encore beaucoup de défis à relever pour atteindre son plein potentiel. Avec une question sous-jacente qui anime notre communauté : la fabrication additive métallique pourrait-elle faire concurrence aux matériaux composites ? Inversement, le placement de fibres robotisé ou d'autres formes de fabrication additives composites peuvent-elles émerger ? Vous trouverez quelques éléments de réponse dans ce numéro spécial.

SPÉCIAL FABRICATION ADDITIVE



La fabrication additive dans les composites

par Isciane Caprais (Compositadour, ESTIA Recherche)

i.caprais@estia.fr

Introduction

Les composites renforcés de fibres continues font l'objet d'importants développements depuis quelques années et s'imposent dans l'industrie, notamment dans le domaine des transports (industries aéronautique, automobile, nautique) ou dans le domaine du bâtiment.

Différentes techniques de fabrication sont traditionnellement utilisées pour concevoir des matériaux composites renforcés en fibres continues telles que le procédé de moulage par injection de résine (Resin Transfer Molding, RTM), le moulage sous vide, la pultrusion, le drapage de pré-imprégnés, la thermo-compression, ainsi que des procédés

robotisés : l'enroulement filamentaire (Filament Winding, FW), le placement de bande automatisé (Automated Tape Layup, ATL) et le placement de fibre automatisé (Automated Fibre Placement, AFP).

Cependant, ces procédés sont contraints par l'utilisation de moules qui augmentent les coûts et limitent la complexité des pièces. De plus, ces procédés ne permettent pas de modifier le volume et l'orientation des fibres localement au niveau d'une pièce.

Afin de faire face à ces limitations, la fabrication additive s'est révélée être une solution faisant preuve de souplesse pour fabriquer des pièces complexes à moindre coût. La Fabrication Additive (FA)

ou impression 3D fait référence à un groupe de technologies permettant de fabriquer une pièce à partir d'un fichier numérique 3D obtenu à l'aide de logiciels de CAO (conception assistée par ordinateur). Une fois la pièce modélisée, le logiciel découpe celle-ci suivant des tranches 2D qui vont ensuite servir de modèles pour le dépôt de matière couche après couche, formant ainsi l'objet final en trois dimensions. Cette technologie a fait l'objet de nombreuses innovations récemment et il est maintenant possible d'imprimer un polymère renforcé en fibres continues [1]. La FA est une technique de fabrication qui ne requiert pas de moule, où l'orientation et le volume de fibres dans la pièce est flexible. Ces nombreux avantages en font une

technologie attractive pour les industriels.

Les différentes technologies d'impression 3D de composites à fibres continues sont décrites par la suite.

Les techniques de fabrication additive de polymères renforcés en fibres continues

Différentes techniques sont possibles pour imprimer une pièce composite renforcée en fibres continues. Ces méthodes peuvent être classées en différentes catégories : le dépôt de fil fondu (Fused Deposition Modeling, FDM), le laminage de feuilles et les procédés se basant sur

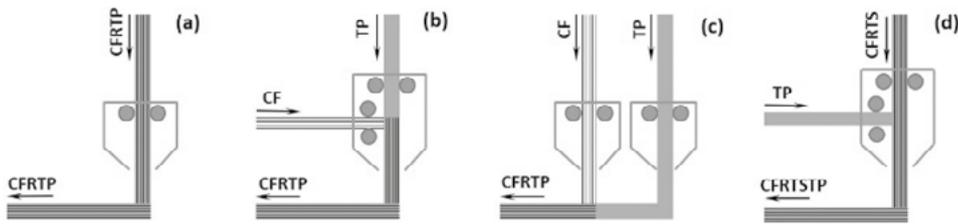


Figure 1 : différentes méthodes d'impression FDM d'un polymère renforcé en fibres continues.
 a) Impression d'une fibre pré-impregnée, b) imprégnation de la fibre in situ, c) impression de la fibre et de la matrice séparément, d) imprégnation in situ par la matrice TP d'une fibre légèrement pré-impregnée d'une matrice TD (approche Anisoprint). CF : fibre continue ; CFRTP : filament à matrice TP renforcé de fibres continues ; CFRTS : filament à matrice TD renforcé de fibres continues ; CFRSTIP : filament bi-matrice TP et TD renforcé de fibres continues [5].

la photopolymérisation. L'intérêt de coupler les méthodes de fabrication robotisée et la FA pour concevoir une pièce composite sera abordé en fin de section.

LE DÉPÔT DE FIL FONDU (FDM)

Cette technique de FA est la plus développée aujourd'hui du fait de son utilisation très répandue dans les imprimantes de bureau. Elle reste relativement simple et peu coûteuse.



Figure 2 : photo de l'imprimante de bureau Mark Two de MarkForged [6].

Son principe repose sur l'extrusion d'un filament thermoplastique (TP) solide à travers une buse qui vient déposer ce fil fondu sur un substrat couche après couche. Les matériaux les plus utilisés en FDM sont ceux qui ont une température de fusion relativement basse (180-265°C) comme l'acide polylactique (PLA), l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS), le polyamide (PA) ou le polypropylène (PP) [1]. Il est possible d'imprimer des polymères thermoplastiques de haute performance comme le poly-

éthercétone (PEEK), le polyéthercétonecétone (PEKK) et le polyéthérimide (PEI) quand la température de buse peut dépasser 400°C. De plus, le plateau et la chambre d'impression doivent pouvoir atteindre au minimum 100°C pour éviter les problèmes de mauvaise adhésion au plateau et de délaminage entre couches imprimées. Des solutions à ces limites fréquemment rencontrées lors de l'impression de polymères haute performance font aujourd'hui l'objet de nombreuses recherches [2, 3].

De simples modifications d'une tête d'impression classique permettent l'utilisation de filaments chargés en fibres discontinues et continues. C'est pourquoi le procédé FDM est le plus développé pour fabriquer une pièce composite chargée en fibres continues. Les fibres de renforcement les plus utilisées sont le carbone, le verre et l'aramide. Pour pou-

voir couper la fibre à la fin de chaque couche, un mécanisme est ajouté comme une lame, un laser ou une résistance chauffante. Différentes approches sont possibles pour imprimer un composite en FDM qui dépendent du lieu où la fibre est imprégnée par la matrice (Figure 1) [4].

Imprégnation de la fibre avant le procédé d'impression (Figure 1.a)

Dans ce cas de figure, la fibre est pré-impregnée par la matrice. C'est l'approche choisie par l'entreprise MarkForged pour son imprimante de bureau Mark Two [6] (Figure 2). Cette méthode implique le minimum de changements par rapport à une tête d'impression classique puisqu'il y a une entrée et une sortie pour la fibre pré-impregnée de la matrice. La pré-impregnation de la fibre permet de réduire le risque d'une mauvaise adhésion fibre/

matrice. Cependant, il n'est pas possible de faire varier le taux de fibres. L'imprimante Mark Two comporte une deuxième buse pour imprimer seulement la matrice et permet ainsi l'alternance entre zones chargées et zones non chargées.

Imprégnation de la fibre à l'intérieur de la tête d'impression (Figure 1.b)

Dans ce cas, la tête d'impression comporte une sortie et deux entrées : une pour le filament de matrice thermoplastique et une pour la fibre sèche. Cette dernière est imprégnée in situ ce qui permet de faire varier le taux de fibres et de choisir la matrice associée à la fibre. La société Anisoprint s'est fondée sur cette méthode dans le développement de leurs imprimantes 3D [7] (Figure 3). La particularité de leur technologie est que la fibre est légèrement pré-impregnée d'une matrice thermodurcissable (TD) pour faciliter sa mise en œuvre puis imprégnée d'une matrice thermoplastique



Figure 3 : imprimante de bureau de la gamme Composer de la société Anisoprint [7].

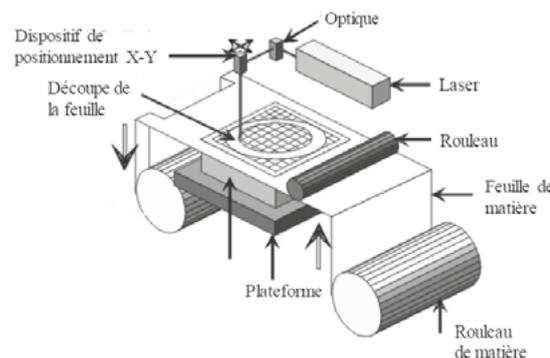


Figure 4 : schéma descriptif du procédé LOM et photo de l'imprimante SLCOM 1 de la société EnvisionTEC [8].



SLCOM 1 (EnvisionTEC)

(TP) dans la tête d'impression (Figure 1.d). C'est le concept de «bi-matrix composite» [5]. Tout comme MarkForged, l'imprimante Composer comporte une deuxième buse dédiée seulement à l'impression de thermoplastique.

Imprégnation de la fibre sur la pièce pendant son impression (Figure 1.c)

La fibre et la matrice sont déposées par deux buses différentes. Cette approche complexifie le mécanisme d'impression et il est plus difficile d'assurer une bonne adhésion fibre/matrice.

LE LAMINAGE DE FEUILLES

Le laminage de feuilles consiste à lier des feuilles de pré-imprégné pour fabriquer une pièce. Cette technique comprend deux approches différentes : la fabrication d'objets laminés (laminated object manufacturing, LOM) et la fabrication additive à base de composites (composite-based additive manufacturing, CBAM).

Fabrication d'objets laminés (LOM)

La fabrication d'objets laminés combine fabrication additive et enlèvement de matière. Le procédé est basé sur la découpe laser de feuilles de pré-imprégné, superposées et liées entre elles par thermocompression (Figure 4). Cette technique permet l'utilisation de fibres continues imprégnées d'une matrice thermoplastique ou thermodurcissable. C'est une des techniques de fabrication additive les plus rapides et qui permet d'obtenir une pièce avec de bonnes propriétés mécaniques. Néanmoins, la découpe

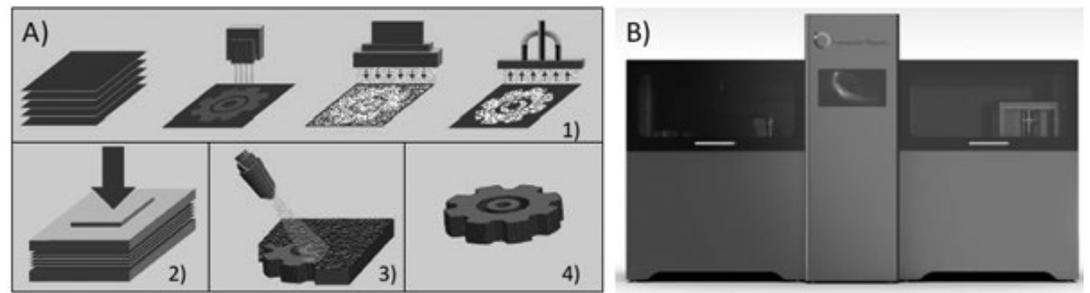


Figure 5 : schéma explicatif des différentes étapes du procédé CBAM. 1) Dépose d'encre et de la poudre thermoplastique, 2) chauffage et compactage, 3) sablage, 4) pièce terminée ; photo de l'imprimante CBAM-2 d'Impossible Objects [10].

laser limite le niveau de complexité de la pièce et cette technique génère des pertes de matière première. Cette technologie est peu répandue, la société EnvisionTEC propose cependant une imprimante industrielle nommée SLCOM 1 utilisant cette technologie pour les thermoplastiques renforcés unidirectionnels ou bidirectionnels [8] (Figure 4).

Fabrication additive à base de composites (CBAM)

La technologie CBAM consiste à déposer un liant base aqueuse entre chaque feuille de fibres sèches via la technique de dépose jet d'encre [9]. La matrice thermoplastique est ensuite déposée sous forme de poudre sur la feuille et adhère seulement au liant. Après avoir éliminé l'excédent de poudre, les feuilles sont empilées et traitées par thermocompression pour imprégner les fibres de la matrice et lier les couches entre elles. Le surplus de fibres est finalement éliminé par sablage ou traitement chimique pour obtenir la pièce finale (Figure 5).

Cette technologie a été mise au point et brevetée par Impossible Objects [10]. Elle propose actuellement deux choix de matrice thermoplastique haute performance qui sont le PEEK et le polyamide 12 ainsi que deux types de fibres longues :

le verre et le carbone. Pour certaines applications, cette technologie permet de diminuer fortement les temps de production. Cependant, comme le procédé LOM, l'utilisation de feuilles de fibres entraîne la perte d'une quantité importante de matériaux lors du post traitement. De plus, il n'est pas possible d'obtenir des cavités internes complexes à cause de la difficulté de retrait du matériau.

LA FABRICATION ADDITIVE PAR PHOTOPOLYMÉRISATION

Contrairement aux technologies précédentes utilisant des résines thermoplastiques, la fabrication additive par photopolymérisation met en œuvre des résines thermodurcissables. Cette technologie consiste à imprégner la fibre continue dans la tête d'impression par une résine thermodurcissable qui est polymérisée immédiatement en sortie de buse par une source UV. Cette tête d'impression est souvent installée sur un bras robotisé permettant d'imprimer des

pièces complexes, en dehors du plan XY, sans support (Figure 6).

La technologie de fabrication additive fibre continue (Continuous Fibre 3D printing, CF3DTM) qui permet de fabriquer des pièces composites à matrice thermodurcissable a été brevetée [11] par la société Continuous Composites [12]. Cette entreprise est la première à avoir déposé un brevet pour la fabrication additive composite fibre continue.

D'autres travaux de recherche sont menés avec un système de polymérisation de la résine en sortie de buse différent, comme un faisceau d'électrons [13].

HYBRIDATION DES PROCÉDÉS

Les procédés de dépose de fibres automatisés sont devenus la clé d'une production des structures composites plus rapide et plus efficace. Ils permettent la fabrication de pièces de grandes dimensions de façon précise et fiable, tout



Figure 6 : image du robot de Continuous Composites et photo de la tête en train d'imprimer [12].

en réduisant les coûts liés à la main d'œuvre et à l'utilisation de matière comparés aux méthodes de fabrication classiques. Parmi ces procédés, on retrouve l'enroulement filamentaire, le procédé ATL et le procédé AFP. Cependant, ces procédés peuvent être optimisés pour obtenir des pièces comportant moins de défauts tout en étant plus complexes. La combinaison des procédés d'impression 3D et de dépose de fibre automatisés permettrait de concevoir des structures composites plus complexes de façon flexible. Des études ont notamment montré l'intérêt de l'hybridation du procédé d'AFP

et ainsi améliorer les propriétés mécaniques de la pièce (Figure 7.b).

Récemment, la société Desktop Metal a présenté sa nouvelle machine d'impression 3D Fiber™ qui combine la dépose de fibre AFP et la technologie FDM (Figure 8) [17]. Cette machine comporte une unité d'AFP «miniaturisée» appelée micro automated fiber placement (μ AFP) et une tête d'impression FDM classique. Ceci permet de combiner les excellentes propriétés mécaniques de pièces conçues par AFP ainsi que la flexibilité de la fabrication additive.



Figure 8 : photo de l'imprimante Fiber™ de la société Desktop Metal [17].

grâce au moyen C1 de Coriolis (Figure 9) et d'un équipement AFP de petites dimensions via la C-SOLO de Coriolis (Figure 10). La C1 permet de déposer jusqu'à 16 rubans (largeur 6.35 mm) de pré-imprégnés à matrice thermodurcissable ou thermoplastique ainsi que de la fibre sèche, simultanément. Elle permet de draper

des structures de grande taille sur des surfaces concaves ou convexes à double courbures. Lors de la fabrication de composites à matrice thermoplastique, les rubans sont drapés et consolidés in situ grâce à un laser, une lampe infrarouge ou une lampe à quartz. Les rubans sont coupés grâce aux lames présentes dans la tête AFP.

masse, des temps de cycle réduit, et surtout une possibilité de recyclage. Compositadour s'engage dans cette voie en se dotant d'équipements significatifs à finalité industrielle. La plate-forme recevra donc une cellule d'estampage en fin de premier semestre 2020, composée d'une presse de 300 tonnes et de plateaux chauffants jusqu'à 400°C (dimensions 1200 x 1000 mm). Pour aller plus loin dans le développement d'une nouvelle filière de fabrication de pièces TP, la plate-forme s'équipe de machines de fabrication additive FDM.

La première est une Lynxter S600D doté d'une buse pouvant monter jusqu'à 450°C avec enceinte et plateau thermostaté permettant l'impression de polymères à haute performance. La deuxième est un robot KUKA KR10 R1110 doté d'une tête d'impression pour filaments TP.

En cohérence avec ces développements, deux thèses sont en cours à Compositadour sur l'hybridation des procédés d'AFP, estampage sous presse et fabrication additive. Le premier projet concerne l'étude mécanique du couplage entre le procédé d'AFP et le procédé d'estampage sous presse et le deuxième sujet concerne l'ajout de fonctions sur pièces composites par fabrication additive.

Cette thèse a pour but de réaliser un saut significatif dans les procédés de mise en œuvre des composites à matrice thermoplastique en développant un processus de fabrication intégrant les procédés d'obtention de pièces composites et l'ajout de fonctions ou de renforts par fabrication additive.

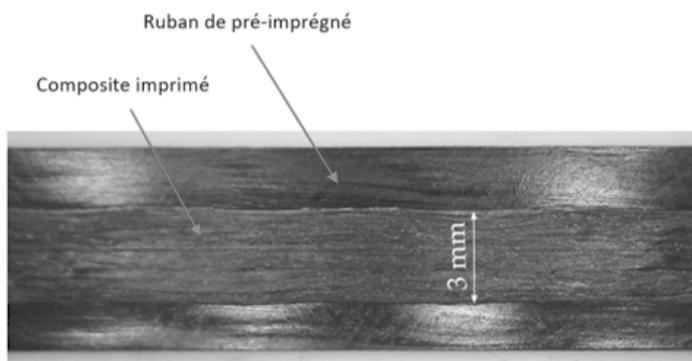


Figure 7 : a) exemple de triangles ou gaps lors de la dépose de rubans de pré-imprégnés sur surface courbe ; b) composite TP renforcé en fibres continues de carbone, imprimé au niveau d'un trou entre deux bandes de pré-imprégnés grâce à une tête d'impression de la société Mark Forged [14].

avec celui de dépose de fil fondu FDM [14, 15, 16].

La fabrication additive permettrait de réaliser facilement des poinçons et moules à forme complexe pour la réalisation de pièces en AFP [15, 16]. Il est possible d'imprimer des moules en PEEK ou PEI, polymères thermostables, qui sont résistants aux hautes températures impliquées lors du drapage.

Le procédé FDM a également été utilisé pour combler les gaps ou triangles (Figure 7.a) pouvant apparaître entre les rubans déposés via le procédé

Il y a donc un intérêt certain dans l'hybridation des procédés de drapage robotisés avec la fabrication additive. Des centres de recherche et développement se sont déjà positionnés dans cette voie comme la plate-forme de R&D Compositadour, située à Bayonne (64) et rattachée à l'ESTIA.

Compositadour

Cette plate-forme dispose de différents moyens de dépose de fibres pour réaliser des pièces composites à différentes échelles. La plate-forme dispose donc d'un équipement AFP de grandes dimensions

des structures de grande taille sur des surfaces concaves ou convexes à double courbures. Lors de la fabrication de composites à matrice thermoplastique, les rubans sont drapés et consolidés in situ grâce à un laser, une lampe infrarouge ou une lampe à quartz. Les rubans sont coupés grâce aux lames présentes dans la tête AFP.

L'utilisation des matériaux à matrice thermoplastique gagne fortement en intérêt dans l'industrie aéronautique. Les composites TP présentent des propriétés stables à température ambiante, un excellent ratio résistance mécanique /

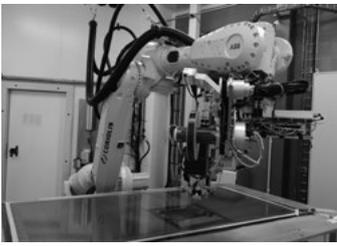


Figure 9 : photo de la C-SOLO à Compositadour.

Ainsi la fabrication additive permet de relever le défi de la mise en œuvre de produits plus complexes au niveau fonctionnel. Cette technologie est aujourd'hui novatrice et les perspectives industrielles se situent à moyen terme. L'intégration de tâches de fabrication additive pose deux problèmes fondamentaux.

Le premier problème concerne l'adhésion des éléments fonctionnels ajoutés par fabrication additive sur la pièce composite initiale. Les propriétés d'adhésion et de cohésion des éléments constitutifs de la pièce déterminent en grande partie ses propriétés macroscopiques. La tenue mécanique de la pièce dépend à la fois de l'état de contraintes lié à la mise en œuvre des deux procédés initiaux et de l'adhésion de la fonction ou du renfort ajoutés par fabrication additive. Le problème de l'adhésion devient particulièrement ardu du fait des géométries des pièces et du comportement des

différents matériaux. Le travail de recherche sera amorcé par les questions suivantes.

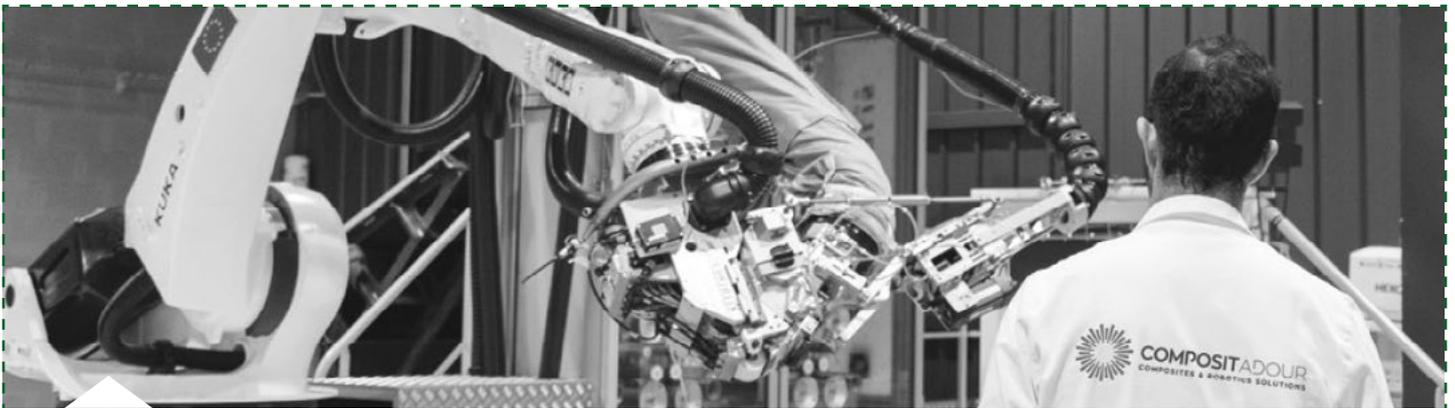
- Comment obtenir une liaison solide entre la pièce et la fonction ajoutée ?

- Comment modéliser les phénomènes mécaniques, thermiques et chimiques présents à l'interface pour caractériser la tenue sous charge de la liaison ?

Ainsi le problème de l'évaluation du comportement mécanique de ce type de pièce est particulièrement complexe et concerne des aspects

chimiques, matériaux et mécaniques. Mais, dans un contexte industriel concurrentiel, cette problématique doit être prolongée par une problématique d'adaptation du procédé primaire avec le procédé de fabrication additive.

Le second problème concerne l'ingénierie de la pièce et la démarche de conception permettant l'ajout de fonctions, selon une approche de design for manufacturing. L'ajout d'une fonction passe par la définition de règles de conception spécifiques permettant de mettre en œuvre au mieux le procédé primaire et le procédé de fabri-



Compositadour

Compositadour, installé dans la technocité de Bayonne (64), est un centre de Recherche et Développement public spécialisé dans les procédés avancés : Composites, Robotique et Fabrication Additive. Inaugurée en 2010, cette plate-forme technologique est gérée et animée par l'Ecole Supérieure des Technologies Industrielles Avancées (ESTIA) de Bidart. Elle fait partie du pôle Aerospace Valley et travaille en collaboration avec de grands groupes industriels, PME et laboratoires de recherche. Sa mission principale est d'initier et conduire des programmes de recherche et développement portant sur de nouvelles pièces et procédés de fabrication, grâce à des équipements de pointe. Ses autres missions sont la formation de techniciens et ingénieurs sur les nouvelles technologies de l'Usine du Futur ainsi que le transfert de technologies aux industriels.

Concernant la partie Composites, la plate-forme concentre ses recherches sur les thématiques suivantes : le drapage automatisé de structures composites, les procédés d'injection et d'infusion, les procédés d'estampage et consolidation sous presse ainsi que sur le contrôle non-destructif. Le développement du drapage automatisé pour concevoir des pièces est un des principaux axes de recherche où les différents points clés abordés sont : la programmation des trajectoires de drapage, le développement de procédés de dépose spécifiques, la consolidation in situ des composites thermoplastiques, le couplage entre les procédés de drapage et la consolidation sous presse ainsi que le développement de systèmes de chauffe alternatifs.

Compositadour en chiffres

- 3600 m² de bâtiments industriels
- 39 collaborateurs
- 68 projets de recherche en cours avec des entreprises et laboratoires de recherche
- 7 docteurs sur les plate-formes Compositadour et Addimadour
- 7 thèses en cours

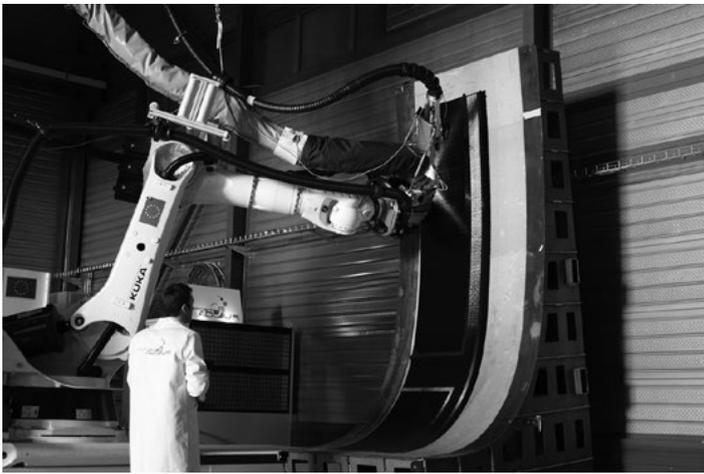


Figure 10 : photo du robot de drapage C1 à Compositadour.

cation additive. L'objectif est de définir les règles de conception pour adapter la pièce support à l'ajout de fonctions par fabrication additive.

Ce projet participe au développement d'une nouvelle filière industrielle de fabrication de pièces composites à matrice thermoplastique, intégrant de nouvelles fonctions apportées par les procédés de fabrication additive. L'originalité se situe au niveau du couplage entre les procédés et de l'adhésion entre différents matériaux sous charge de service et donc au niveau de la modélisation des interactions mécaniques lors de leur mise en œuvre.

Conclusion

L'état de l'art sur la fabrication additive des composites renforcés en fibres continues montre qu'il existe de multiples technologies pour les concevoir, bien que tous ces développements soient récents (premier brevet déposé par la société Continuous Composites en 2014 [11]). La recherche et développement autour de la fabrication additive composites fibres continues va s'intensifier dans les années à venir vu l'intérêt grandissant pour cette technologie dans l'industrie. Un de ces intérêts repose dans le

couplage de cette technologie avec les procédés de dépôt de fibres robotisés pour concevoir des pièces composites plus complexes et « customisables ».

Ainsi, l'hybridation de ces procédés et le couplage entre les procédés usuels de fabrication des composites et les nouveaux procédés de fabrication additive répond aux nouveaux besoins des industriels : proposer des produits recyclables à haute valeur fonctionnelle.

Références

[1] Guo Dong Goh, Yee Ling Yap, Shweta Agarwala, and Wai Yee Yeong. Recent Progress in Additive Manufacturing of Fiber Reinforced Polymer Composite. *Advanced Materials Technologies*, 4 :1–22, 2019.

[2] Luo Meng, Tian Xiaoyong, Shang Junfan, Zhu Weijun, Li Dichen, and Qin Yingjie. Impregnation and interlayer bonding behaviours of 3D-printed continuous carbon-fiber-reinforced poly-ether-ether-ketone composites. *Composites Part A*, 2019.

[3] Mohammad Vaezi, Shoufeng Yang, and K U Leuven. Extrusion-based additive manufac-

turing of PEEK for biomedical applications. *Virtual and Physical Prototyping*, 2015.

[4] Hauke Prüss and Thomas Vietor. Design for Fiber-Reinforced Additive Manufacturing. *Journal of Mechanical Design*, 137, 2015.

[5] Adi Adumitroaie, Fedor Antonov, Aleksey Khaziev, Andrey Azarov, Mikhail Golubev, and Valery V Vasiliev. Novel Continuous Fiber Bi-Matrix Composite 3-D Printing Technology. *Materials*, 12, 2019.

[6] Mark Two Desktop Carbon Fiber 3D Printer for Manufacturing | Markforged. <https://markforged.com/mark-two/>.

[7] Anisoprint. <https://anisoprint.com/>.

[8] SLCOM, EnvisionTEC. <https://envisiontec.com/3d-printers/slcom-1/>.

[9] Swartz. METHODS AND APPARATUS FOR 3D FABRICATION, 2011.

[10] Impossible Objects, Composite 3D Printing. <https://www.impossible-objects.com/>.

[11] Kenneth Tyler. Method and apparatus for continuous composite three-dimensional printing, 2014.

[12] Continuous Composites, Continuous Fiber 3D Printing. <https://www.continuouscomposites.com/>.

[13] Ben Wang, Yueke Ming, Yansong Zhu, Xueling Yao, Gerhard Ziegmann, Hong Xiao, Xiaohui Zhang, Jingjing Zhang, Yugang Duan, and Jinru Sun. Fabrication of continuous carbon fiber mesh for lightning

protection of large-scale wind-turbine blade by electron beam cured printing. *Additive Manufacturing*, 31, 2020.

[14] Mohammad Rakhshbahr and Michael Sinapius. A Novel Approach : Combination of Automated Fiber Placement (AFP) and Additive Layer Manufacturing (ALM). *Journal of Composites Science*, 2(42), 2018.

[15] Felix Raspall, Rajkumar Velu, & Nahaad, and Mohammed Vaheed. Fabrication of complex 3D composites by fusing automated fiber placement (AFP) and additive manufacturing (AM) technologies. *Advanced Manufacturing : Polymer & Composites Science*, 5(1) :6–16, 2019.

[16] Henning Janssen, Tido Peters, and Christian Brecher. Efficient production of tailored structural thermoplastic composite parts by combining tape placement and 3d printing. *Procedia CIRP*, 66 :91–95, 2017.

[17] Fiber™, Desktop Metal. <https://www.desktopmetal.com/products/fiber.> ■

Fabrication additive des composites: intégration des spécificités du procédé dans la modélisation et le design

par Anita Catapano et Marco Montemurro

(I2M Bordeaux, Arts et Métiers Sciences et Technologies, Bordeaux INP, Université de Bordeaux)

anita.catapano@bordeaux-inp.fr, marco.montermurro@ensam.eu

Durant les trente dernières années, les matériaux composites ont été largement employés dans différents secteurs industriels en raison de leurs excellentes propriétés en termes de légèreté, rigidité, résistance statique et à la fatigue, possibilité de concevoir le matériau selon le besoin, etc. Le secteur aéronautique en particulier (grâce aux programmes Boeing 787, Airbus A350 XWB, F-35 Lightning et les futurs Airbus A320 et Boeing 737) reste un des principaux acteurs de ce domaine. Cependant, quel que soit le secteur concerné, deux facteurs apparaissent comme décisifs pour le futur marché des matériaux composites : le développement de méthodes de fabrication modernes rapides et efficaces, à coût maîtrisé, et la recherche de solutions performantes et fiables avec une tenue et

une tolérance aux dommages accrues, minimisant les pertes et les coûts de production.

Aujourd'hui, les nouveaux procédés de fabrication additive des composites (FAC), comme la technologie Automated Fibre Placement (AFP) ou les technologies plus récentes comme la Fused Filament Fabrication (FFF) et la Continuous Filament Fabrication (CFF), permettent de dépasser les règles métier classiques à la base de la conception des structures composites et ainsi de concevoir de nouvelles solutions très performantes. Le procédé CFF permet de réaliser des pièces de forme complexe avec un degré de répétabilité qui ouvre des perspectives industrielles importantes dans le domaine des petites et moyennes séries rencontrées dans l'aéronautique.

Cette technique permet aussi de créer des nouvelles typologies de structures composites, dites composites à rigidité variable (CRV), dont les propriétés mécaniques (rigidité, résistance, etc.) varient localement. Parmi les différentes typologies de CRV, une solution efficace est celle des composites à fibres curvilignes (CFC) dont la trajectoire fait l'objet d'un processus d'optimisation.

Les procédés de dépose de prepreg

Un des premiers procédés de type dépose de fibre remonte à 1974 [1] : le procédé Automated Tape Laying développé par Goldsworthy (voir Figure 11). Cette technologie repose sur une tête robotique capable de déposer des bandes d'une largeur de 76 mm sur une surface courbée. La tête robotisée est capable de tourner et de déposer les bandes de prepreg à une vitesse de 10-20 m/min. L'adhésion est obtenue par compression à l'aide d'un rouleau de compactage. L'aspect intéressant de ce procédé concerne la réduction des chutes de matériau qui varient de 30% pour des petites pièces à 2-4% sur des grandes pièces. Ces valeurs sont beaucoup plus faibles que celles du procédé classique de drapage manuel, dont les chutes varient entre 50% et 80%. Le résultat

est un stratifié à fibres droites placées suivant des orientations non-conventionnelles avec une très bonne précision. La contrainte principale de ce procédé est la longueur minimale de course (distance minimale entre les lames et le point de compactage du rouleau).

Les procédés FA de composites

Les limitations des procédés ATL et AFP ont poussé la technologie à développer des procédés de FA plus souples tels que le CFF combiné au FFF. Cette technologie est utilisée, par exemple, dans l'imprimante MarkForged® Mark Two (une des premières machines FA pour composites), capable d'imprimer des composites à matrice polyamide ou onyx (polyamide combiné avec des fibres courtes de carbone) et renfort à base de fibres de carbone, verre ou aramide. Plus précisément, la Mark Two est caractérisée par un système de deux têtes, une dédiée à l'extrusion de type FFF de la matrice et l'autre dédiée à l'extrusion de type CFF du renfort. Ce type de technologie est utilisé principalement pour le prototypage rapide (PR) de pièces à cause des faibles propriétés de tenue de la matrice polyamide. La principale différence entre cette imprimante 3D et d'autres disponibles sur le marché réside dans l'extrusion du ren-

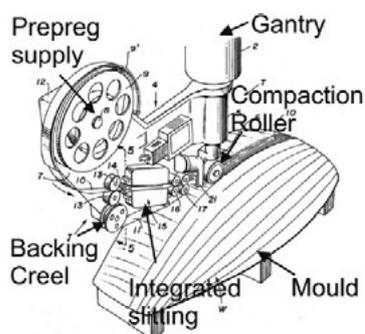


Figure 11 : système ATL [1] Afin de surmonter les limitations du procédé ATL en termes de trajectoire des bandes, le procédé AFP (illustré en Figure 12) a été développé et commercialisé dans les années 80. Le concept fondamental de l'AFP est la séparation de la bande de prepreg en plusieurs bandelettes contrôlées séparément (en termes de drapage, coupe, vitesse, etc.) afin de les déposer de façon « optimale » le long d'un chemin courbé. En pratique, le procédé AFP est capable de draper des géométries extrêmement plus complexes que le procédé ATL.

fort qui est une mèche de fibres continues plutôt qu'un mélange enrobé de fibres courtes. Cette solution est adoptée pour augmenter considérablement les propriétés mécaniques des produits imprimés. Cette technologie, en fait, représente le premier pas pour passer d'une machine de PR à une machine FA capable de fabriquer des composants fonctionnels. L'interface graphique utilisateur-machine est assurée par le logiciel Markforged Eiger®. Il permet d'exploiter les principales fonctionnalités de l'imprimante 3D et représente un outil simple pour contrôler la stratégie de dépose des fibres (unidirectionnelle ou concentrique). Le logiciel Eiger est capable de lire des fichiers STL qui peuvent être générés avec les logiciels de CAO. Aujourd'hui d'autres technologies sont en cours de développement pour généraliser le procédé et l'utiliser avec des résines thermodurcissables et thermoplastiques. Par exemple la société Continuous Composites a développé une tête robotisée de FAC caractérisée par un système de réticulation rapide de la résine thermoplastique qui permet de fabriquer des structures autosupportées.

La conception des pièces composites issues du procédé de fabrication additive

Les premiers travaux sur l'analyse et la conception des CFC remontent aux années 90 [4] et portent sur l'optimisation de la trajectoire des fibres afin de maximiser la rigidité de la structure en fonction des charges appliquées. Bien que fondées sur plusieurs hypothèses simplificatrices, les méthodes pro-

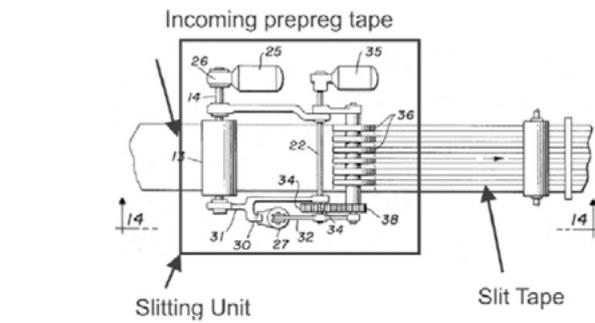


Figure 12 : système AFP [2] Les principaux fabricants de machines AFP sont localisés aux Etats-Unis (Automated Dynamics, Accudyne, MAGCincinnati, Electroimpact, Foster Miller/ATK, Ingersoll) ; en Europe on compte les entreprises Coriolis (France), Mikrosam (Macédoine) et MTorres (Espagne). Parmi les paramètres du procédé, il est possible de contrôler la vitesse de drapage, la pression du rouleau de compactage, la température et la tension des bandelettes. Parmi les différents défauts associés au procédé, le plus important est le steering dû au drapage suivant un chemin courbé et qui peut générer le flambage, le détachement ou le désalignement des bandelettes. Entre autres, la variation de la largeur locale des bandes en fonction du rayon de courbure est la cause des défauts de type gap (zones riches de résine) et overlap (zones de superposition de couches adjacentes) comme illustré en Figure 13.

posées ont prouvé l'efficacité ainsi que le potentiel latent des CFC. Par ailleurs, puisque le développement de méthodologies robustes et efficaces de conception / optimisation des matériaux et structures composites reste un problème ouvert, le développement et l'utilisation massive de solutions alternatives (comme celle des CRV) en résultent très ralentis.

Toutefois, le comportement des CFC pose des questions : plus spécifiquement la compréhension des mécanismes d'endommagement, aux niveaux de la microstructure et de la mésostructure du matériau, reste encore un problème ouvert. Des travaux ont été développés sur ce sujet [4] mais les modèles restent souvent limités. Plus précisément, les gradients de rigidité, de résistance et d'anisotropie sont la source de mécanismes d'endommagement dont la cinétique est atypique et, parfois, inattendue. Ces gradients sont dus à l'orientation du renfort (qui varie ponctuellement) mais aussi au procédé de FAC qui

introduit, inévitablement, des imperfections responsables de l'écart existant entre le modèle numérique du CFC et la structure réelle. Ces structures présentent alors deux types d'imperfections : les défauts (dont la présence n'est pas contrôlée) et les singularités (dont la présence est contrôlée par l'intermédiaire d'une maîtrise adéquate du procédé). Ces imperfections participent aussi bien à l'amorçage qu'à l'évolution de l'endommagement : elles peuvent être réparties de manière aléatoire ou organisées, ce qui influence fortement le scénario de transition de l'endommagement vers la rupture. La méconnaissance de la réponse des CFC en termes de tenue mécanique et d'évolution de l'endommagement constitue un verrou scientifique à lever pour assurer un élargissement de l'utilisation de ces matériaux.

Pour concrètement obtenir des CFC caractérisés par des performances nettement supérieures aux solutions classiques avec un gain en

masse important et un rebut de matière fortement minimisé, il est nécessaire de : (1) maîtriser le procédé FAC et identifier les paramètres pertinents (vis-à-vis de la trajectoire des fibres) ainsi que leur effet sur la présence de singularités ; (2) caractériser et identifier les mécanismes d'endommagement (à toute échelle) liés aux imperfections ; (3) élaborer des modèles/critères parcimonieux, efficaces et prédictifs (intégrant les spécificités du procédé) pour la tenue de ces matériaux afin de les intégrer dans la démarche de conception / optimisation multi-échelle. Ces verrous correspondent à autant d'enjeux scientifiques qu'il est nécessaire d'aborder. En effet, la méthodologie de conception / optimisation multi-échelle des CFC doit prendre en compte les spécificités du procédé de FAC [8] et les effets sur la distribution des propriétés du matériau qui en dérivent, afin de réduire l'écart entre la réponse mécanique du modèle numérique et celle de la structure réelle.

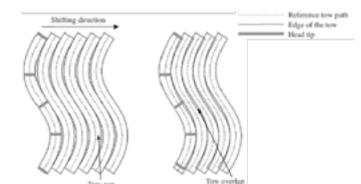


Figure 13 : défauts de gap (gauche) et overlap (droite) générés par le procédé AFP [3].

Dans ce contexte, au sein du laboratoire I2M, A. Catapano (MCF) et M. Montemurro (PU) animent plusieurs activités de recherche autour de ce thème (aussi bien sur le territoire français qu'à l'international) [5]-[13]. Le projet SMARTCOMPOSITE (Région Nouvelle-Aquitaine, 2016-2020) a permis de développer une méthodologie ori-

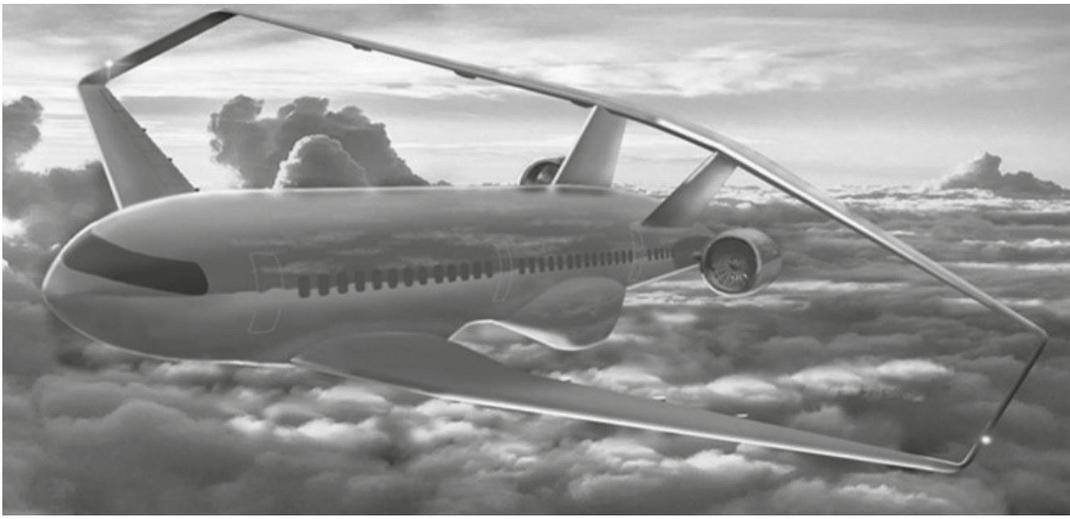


Figure 14 : l'aéronef PrandtlPlane dont la structure des ailes et du fuselage en composite a été conçue et optimisée à l'12M dans le cadre du projet PARSIFAL (<https://parsifalproject.eu/>).

ginale pour la conception et l'optimisation multi-échelle des CFC tout en intégrant une formulation originale des contraintes technologiques du procédé FAC (par exemple le rayon de courbure minimal des fibres) dès l'étape de conception préliminaire. Dans le cadre du projet européen PARSIFAL (RIA – H2020, 2017-2020) les CFC (obtenus à l'aide du procédé AFP) sont utilisés dans la modélisation de l'architecture des ailes et du fuselage d'une nouvelle configuration d'aéronef : le PrandtlPlane (dont une illustration est proposée en Figure 14).

Dans [7, 8, 9] Catapano et Montemurro ont présenté une généralisation de la stratégie

d'optimisation multi-échelle à deux niveaux (MS2L, de l'anglais multi-scale two-level), initialement développée pour la conception optimale des structures composites, au cas des CFC. Plus précisément, la stratégie d'optimisation MS2L est articulée sur deux niveaux (chacun correspondant à la résolution d'un problème d'optimisation).

- Niveau 1 (échelle macroscopique du CFC). Le but principal de cette phase est la détermination de la forme optimale ainsi que de la distribution optimale des grandeurs mécaniques décrivant le comportement de la structure afin de satisfaire le cahier des charges de l'application considérée. Dans

cette étape le CFC est modélisé comme une plaque homogène anisotrope équivalente dont la réponse mécanique est décrite en termes d'invariants tensoriels liés aux symétries élastiques du CFC, à savoir les paramètres polaires [10, 11], qui varient ponctuellement sur la structure. Ce niveau doit inclure aussi une formulation pertinente des contraintes technologiques du procédé FAC afin d'obtenir des solutions optimisées mais fabricables. Le défi majeur, caractérisant le niveau 1 de la stratégie d'optimisation MS2L, est de développer une formalisation pertinente des contraintes technologiques et des singularités du procédé FAC en termes des invariants tensoriels décrivant la réponse

du CFC à l'échelle macroscopique.

- Niveau 2 (échelle mésoscopique du CFC). L'objectif de cette deuxième phase est la détermination des empilements et des trajectoires optimaux des fibres dans chaque pli du CFC satisfaisant la distribution optimale des paramètres géométriques et des invariants polaires issus du niveau 1 de la stratégie d'optimisation MS2L. A ce niveau les variables d'optimisation sont les orientations des plis (qui varient localement) et le concepteur peut ajouter des conditions supplémentaires, par exemple en termes de contraintes technologiques et/ou de fabricabilité, de délaminage, rupture intra-laminaire, etc.

Le but principal des travaux de [7, 8, 9] était de prouver que les CFC peuvent être optimisés de manière appropriée en prenant en compte, depuis la première étape de la stratégie MS2L, certaines contraintes du procédé de fabrication. Dans un travail plus récent [13], une solution optimisée issue de la procédure MS2L a été utilisée pour la fabrication d'un prototype (voir Figure 15).

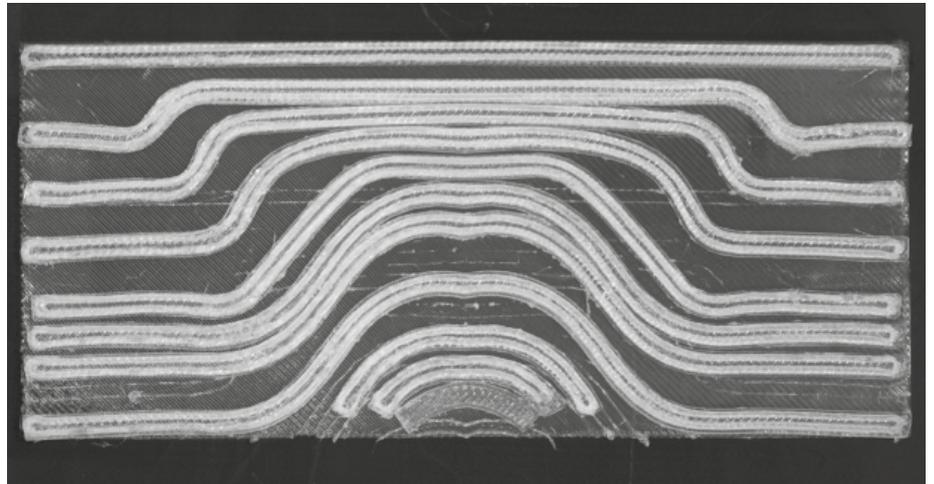
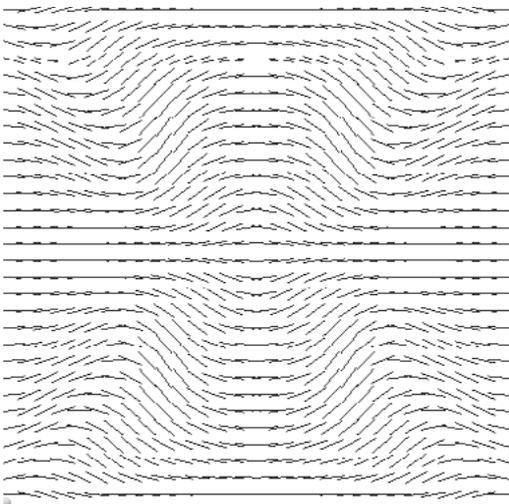


Figure 15 : solution optimisée issue de la stratégie MS2L (a) et prototype obtenu avec l'imprimante MarkForged® (b).

La technologie de fabrication utilisée dans [13] est la technologie FFF combiné à celle CFF de l'imprimante Markforged® Mark Two. Cette machine de PR est exploitée afin d'améliorer la stratégie d'optimisation MS2L pour les CFC : son utilisation permet de comprendre le procédé et le comportement (du point de vue qualitatif) des CFC, grâce à un coût extrêmement réduit face à celui nécessaire pour une technologie FAC industrielle comme l'AFP.

Cependant, ces travaux ne représentent qu'un premier résultat dans la longue démarche de compréhension du comportement, modélisation, optimisation, normalisa-

d'optimiser simultanément la topologie et les propriétés d'anisotropie des CFC en 3D (ces dernières étant directement liées aux trajectoires des fibres dans le CFC). Des activités de recherche sur ce thème sont menées aujourd'hui à l'I2M dans le cadre du projet OCEAN-ALM (Optimisation et Conception pour une mEthodologie AvaNcEe pour l'Additive Layer Manufacturing) subventionné par la région Nouvelle-Aquitaine, le Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Renouvelables et l'entreprise SEIV ALCEN. Ce projet a pour objectifs : (1) le développement d'outils de conception au profit de performances fonctionnelles ciblées

région Nouvelle-Aquitaine ; (3) l'élaboration de méthodologies dédiées FA (composites et métaux), leur transposition à l'ensemble des machines de technologies identiques et l'élaboration d'un guide.

Dans le cadre de ce projet, une nouvelle méthode d'optimisation topologique (OT), basée sur la reformulation de la méthode SIMP (de l'anglais Solid Isotropic Material with Penalization) dans le cadre théorique des hyper-surfaces NURBS (de l'anglais Non-Uniform Rational Basis Spline), a été développée au laboratoire I2M [14]-[18]. Cette méthode d'OT et l'algorithme SANTO (de l'anglais SIMP And NURBS for

géométrique, à savoir l'hyper-surface NURBS, et ne dépend pas du maillage du modèle aux éléments finis (voir Figure 16) ; (ii) le descripteur de la topologie étant une entité NURBS, la topologie optimale issue du processus d'OT est CAO-compatible et ne nécessite pas de phase de post-traitement pour être importée dans un environnement CAO (comme illustré dans la Figure 16) ; (iii) grâce au formalisme des hyper-surfaces NURBS, le nombre de variables peut être fortement réduit par rapport aux méthodes d'OT classiques basées sur les modèles éléments finis [14, 15] ; (iv) grâce aux propriétés des hyper-surfaces NURBS, il n'est pas nécessaire d'introduire des filtres artificiels afin d'assurer la continuité de la topologie [14, 15].

Ces activités sont en cours de développement et plusieurs verrous scientifiques doivent être encore levés. (a) Existe-t-il un lien entre topologie et trajectoires des fibres dans les CFC ? (b) Est-ce que les cinétiques d'endommagement (aux différentes échelles) sont influencées par les changements topologiques et/ou des trajectoires des fibres dans les CFC ? (c) Est-il possible de formuler opportunément les spécificités du procédé FAC en termes d'invariants et de variables topologique du CFC ? La réponse à ces questions constitue le premier pas vers une meilleure compréhension des CFC qui peuvent être, sans doute, imaginés comme les composites 4.0.

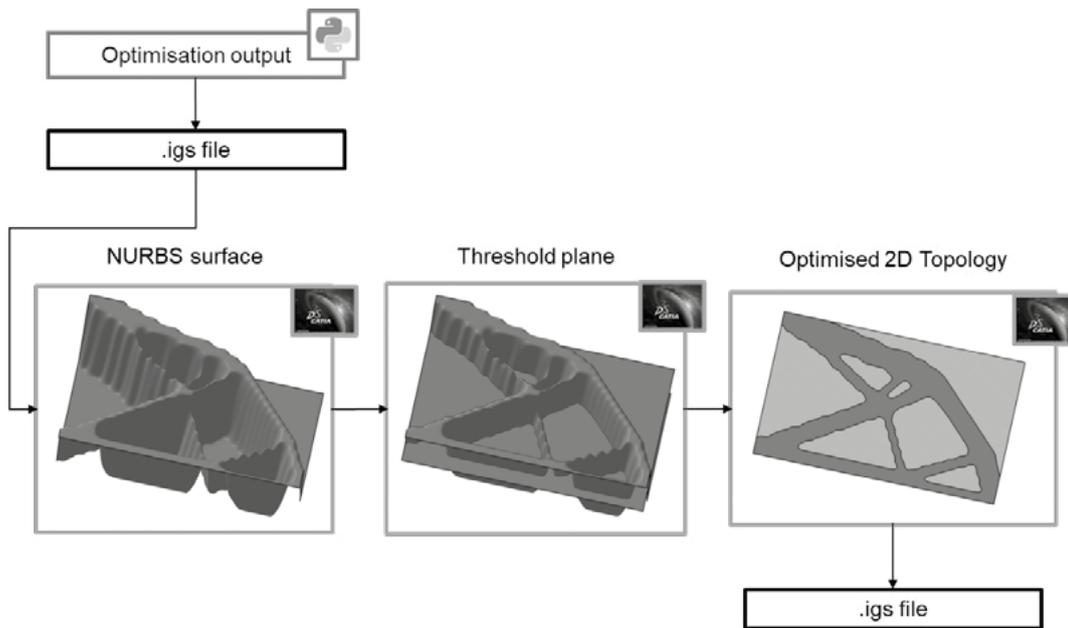


Figure 16 : étapes caractéristiques de l'OT avec le logiciel SANTO développé à l'I2M.

tion et certification des CFC. Plus précisément, le développement de la technologie FAC permet d'envisager des méthodologies de conception / optimisation multi-échelle des CFC avec un gradient de propriétés dans l'espace (et non pas uniquement dans le plan) et avec une topologie optimisée. L'objectif est donc de développer un cadre théorique / numérique très général permettant

(fréquence propre, amortissement, stockage d'énergie, etc.), de gain en masse et de simplification de fabrication ; (2) l'acquisition d'une connaissance suffisante des propriétés mécaniques nécessaires à la conception, la fabrication et le contrôle de pièces génériques dans les domaines de l'aéronautique, du spatial et du nucléaire civil, en utilisant des technologies présentes en

Topology Optimisation) qui a été développé dans ce contexte sont très généraux et visent à répondre à plusieurs défis et enjeux scientifiques dans le domaine de l'OT de structures légères en matériau composite. Plusieurs avantages caractérisent cette nouvelle méthode d'OT : (i) contrairement à la méthode SIMP classique, la topologie de la pièce est décrite par une entité purement

Bibliographie

- [1] W.B. Goldsworthy. Geodesic path length compensator for composite-tape placement method. Patent US 3810,805, 14th May 1974
- [2] Dirk H.-J.A. Lukaszewicz, Carwyn Ward, Kevin D. Potter. The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future. *Composites: Part B*, 43 (2012) 997–1009.
- [3] Byung Chul Kim, Kevin Potter, Paul M. Weaver. Continuous tow shearing for manufacturing variable angle tow composites. *Composites: Part A* 43 (2012) 1347–1356.
- [4] M. Hyer, H. Lee. The use of curvilinear fiber format to improve buckling resistance of composite plates with central circular holes. *Composite Structures*, 18: 239–261, 1991.
- [5] A. Catapano, B. Desmorat, P. Vannucci. Invariant formulation of phenomenological failure criteria for orthotropic sheets and optimisation of their strength. *Mathematical methods in the applied sciences* 31 (15) (2012) 1842-1858.
- [6] A. Catapano, B. Desmorat, P. Vannucci. Stiffness and strength optimization of the anisotropy distribution for laminated structures. *Journal of Optimization Theory and Applications* 167 (1) (2015) 118-146.
- [7] M. Montemurro, A. Catapano. A new paradigm for the optimum design of variable angle tow laminates. In: *Variational analysis and aerospace engineering: mathematical challenges for the aerospace of the future*, Springer, 2016. Editor: A. Frediani.
- [8] M. Montemurro, A. Catapano. On the effective integration of manufacturability constraints within the multi-scale methodology for designing variable angle-tow laminates. *Composite Structures* 161 (2017), 145-159.
- [9] M. Montemurro, A. Catapano. A general B-Spline surfaces theoretical framework for optimisation of variable angle-tow laminates. *Composite Structures* 209 (2019), 561-578.
- [10] M. Montemurro. An extension of the Polar Method to the First-order Shear Deformation Theory of laminates. *Composite Structures* 127 (2015), 328-339.
- [11] M. Montemurro. The polar analysis of the Third-order Shear Deformation Theory of laminates. *Composite Structures* 131 (2015), 775-789.
- [12] A. Catapano, M. Montemurro. On the correlation between stiffness and strength properties of anisotropic laminates. *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 26 n.8 (2019), 651-660.
- [13] A. Catapano, M. Montemurro, J.A. Balcou, E. Panettieri. Rapid prototyping of variable angle-tow composites. *Aerotecnica Missili & Spazio* 98(4) (2019), 257-271.
- [14] G. Costa, M. Montemurro, J. Pailhès. A 2D topology optimisation algorithm in NURBS framework with geometric constraints. *International Journal of Mechanics and Materials in Design* 14 (4) (2018), 669-696.
- [15] G. Costa, M. Montemurro, J. Pailhès. NURBS Hypersurfaces for 3D Topology Optimisation Problems. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, URL : <https://doi.org/10.1080/15376494.2019.1582826>, 2019 (in press).
- [16] G. Costa, M. Montemurro, J. Pailhès, N. Perry. Maximum length scale requirement in a topology optimisation method based on NURBS hyper-surfaces. *CIRP Annals* 68 (2019), 153-156.
- [17] G. Costa, M. Montemurro, J. Pailhès. Minimum Length Scale Control in a NURBS-based SIMP Method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 354 (2019), 963-989.
- [18] T. Rodriguez, M. Montemurro, P. Le Texier, J. Pailhès. Structural Displacement Requirement in a Topology Optimization Algorithm Based on Isogeometric Entities. *Journal of Optimization Theory and Applications* 184 (2020), 250-276. ■

Journées Scientifiques et Techniques récentes et à venir

par Frédéric DAU (I2M)
frederic.dau@u-bordeaux.fr

En favorisant les rencontres entre industriels et académiques, les Journées Scientifiques et Techniques (JST) organisées par l'AMAC sont, depuis des années, l'occasion d'échanges et de discussions passionnées sur des questions et enjeux d'actualité attrayant aux matériaux et structures composites. Elles sont aussi l'occasion de faire émerger et lever de nouveaux verrous scientifiques et techniques et de fédérer de nouvelles collaborations.

Ces rencontres, organisées sur 1 ou 2 journées en général, regroupent en moyenne une cinquantaine de personnes, autour de présentations au format académique ou d'ateliers démonstratifs.

Les thèmes abordés, expérimentalement ou numériquement, sont très variés, allant de l'élaboration jusqu'à la réparation et le recyclage en passant par la caractérisation, (destructive ou non), la tenue en service, ... et adressent de nombreux secteurs d'activités : transport, énergie (stockage), éolien, spatial...

Voici un bilan des JST qui se sont tenues depuis fin 2016.

Mise en œuvre des composites à matrice thermoplastique

Organisateurs : P. Olivier et O. De Almeida
Lieu : Toulouse
Date : 26-27 Janv. 2017

Fatigue des matériaux et structures composites

Organisateurs : C. Hochard et L. Guillaumat
Lieu : Marseille
Date : 14-15 Déc. 2017

END & CND des composites et joints collés

Organisateurs : F. Dau et M. Castaings
Lieu : Bordeaux
Date : 12-13 Mars 2018

Tenue au feu des composites

Organisateurs : C. Huchette et G. Leplat
Lieu : Toulouse
Date : 27 Mars 2019

Homogénéisation et calcul multi-échelles

Organisateurs : N. Feld et J. Yvonnet
Lieu : Champs sur Marne
Date : 14 Oct. 2019

Et voici un aperçu des JST programmées pour 2020-2021, certaines ayant été annulées ou décalées du fait de l'épidémie, d'autres étant encore à l'étude.

Fabrication additive des composites

Organisateurs : A. Le Duigou
Lieu : Lorient
Date : 14-15 Oct. 2020

Durabilité des matériaux composites à matrice thermoplastique

Organisateur : X. Colin
Lieu : Paris
Date : 18 Février 2021

Propriétés et durabilité des composites en environnement agressif : intérêt de maîtriser les interphases

Organisateurs : Y. Joliff
Lieu : Toulon
Date : repoussée à Mars 2021

Préformes textiles renforcées dans l'épaisseur

Organisateurs : D. Soulat et P. Boisse
Lieu : Roubaix
Date : repoussée à Avril 2021

VIE DES LABORATOIRES



Laboratoire GEMTEX (EA n°2461 ENSAIT-Roubaix)

par Damien SOULAT
damien.soulat@ensait.fr

Présentation générale du laboratoire GEMTEX

Le laboratoire Génie et Matériaux Textiles (GEMTEX), créé en 1992, est une unité propre (EA n°2461) de l'École Nationale Supérieure des Arts

et Industries (ENSAIT). Les recherches menées dans l'unité portent sur les matériaux et procédés textiles et font appel aux disciplines scientifiques en lien avec la mécanique, le génie des procédés, la chimie des polymères et l'automatique,

avec quatre orientations transversales : textiles fonctionnels, production et usages, renforts et composites, textiles durables. L'unité est composée d'une seule équipe pluridisciplinaire structurée en trois groupes de compétence sur la

formulation et les procédés de mise en œuvre des textiles multifonctionnels innovants (groupe MTP), la mécanique des structures fibreuses et les textiles composites (groupe MTC) et sur la conception centrée sur l'humain (groupe HCD). Le labo-

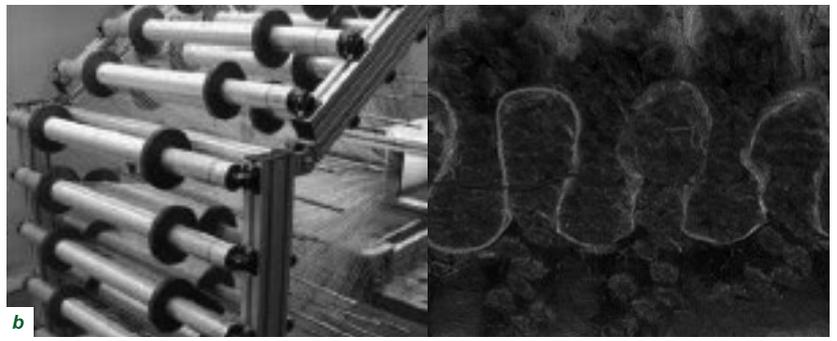
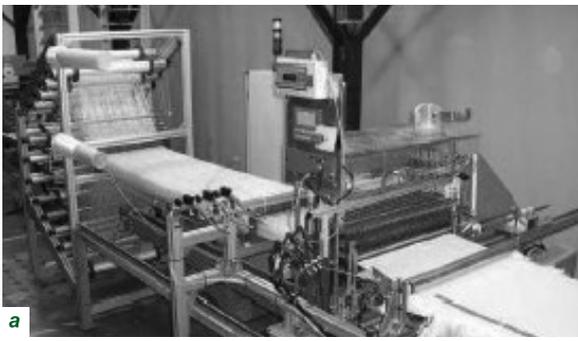


Figure 18 : a) métier pour la réalisation de structures 3D Interlock chaîne avec système de plusieurs ensouples ; b) coupe d'une structure Interlock (OT) à 23 couches avec représentation de l'embuvage des mèches de liage.

ratoire qui rassemble 28 enseignants-chercheurs, 8 BIATSS (personnels ingénieurs, administratifs, techniques, sociaux et de santé et des bibliothèques) et 49 doctorants (au 1er janvier 2019) est reconnu comme un des principaux acteurs de la recherche sur le textile, au niveau national et international. Sa production scientifique est d'excellent niveau, avec un bon équilibre entre les publications

posé d'enseignants-chercheurs en mécanique (CNU 60), participe grandement aux activités nationales dans le domaine des composites, par exemple aux Journées Nationales des Composites, avec notamment 20 contributions entre 2013 et 2019, mais également l'organisation le 3 juin 2020 d'une JST AMAC dédiée aux composites épais et au renforcement dans l'épaisseur.

Parmi les nombreux laboratoires français qui consacrent leurs activités de recherche sur les matériaux composites, le groupe « Mécanique textile Composite » du GEMTEX est un des rares, en France, à disposer de métiers (à tisser, à tresser) susceptibles d'élaborer des échantillons de renforts à base de différentes natures de fibres (verre, carbone, polyéthylène haute densité, fibres naturelles) et de structures plus ou moins complexes (2D, 3D, multiaxiales, etc). A partir d'entrées matières, les opérations d'ourdissage, de rentrage et de tissage sur métiers manuels ou automatiques sont ainsi réalisées (Figure 17), pour élaborer des échantillons tissés d'architectures différentes afin d'analyser l'influence de ces paramètres structuraux (armures, densités chaîne-trame, nombre de couches pour les renforts Interlocks, etc..) sur le comportement mécanique de ces renforts tissés.

est abordée par le développement de métiers à tisser spécifiques (Figure 18.a), mais également la réalisation de ces structures multicouches renforcées dans l'épaisseur dont les caractéristiques sont analysées (Figure 18.b).

Cette expertise d'élaboration se décline également avec la fabrication de tresses à l'aide d'une tresseuse disponible au GEMTEX, disposant de 96 fuseaux pour les renforts de biais (tresses biaxiales) et 48 fuseaux pour ajouter des renforts axiaux (tresses triaxiales) et permettant de concevoir des tresses planes ou circulaires (Figure 19).

L'incorporation de renforts dans l'épaisseur, afin de limiter le délaminage entre les couches s'effectue également par piquage (tufting) (Figure 20). Cette technologie permet un renforcement dans l'épaisseur localisé et ne nécessite pas un accès aux deux faces de l'empilement de couches.

Ces compétences d'élaboration se déclinent également à

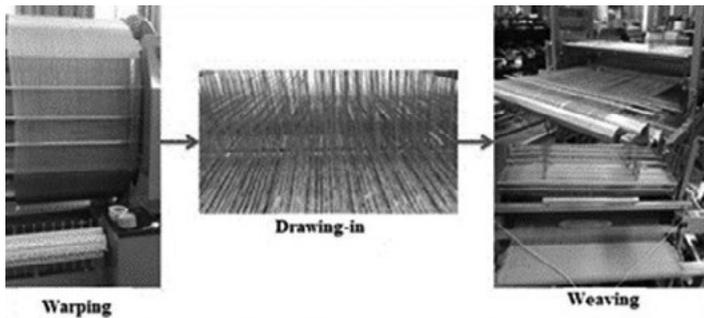


Figure 17 : de l'ourdissage au rentrage puis au tissage.

dans des revues disciplinaires et des revues dans le domaine du textile. Le rayonnement de l'unité est « excellent comme le montre sa forte implication dans les programmes de recherche nationaux et européens », selon le rapport d'évaluation HCERES de mai 2019. Le groupe Mécanique-Textile-Composite, com-

De l'élaboration au comportement des renforts : la spécificité du GEMTEX

ELABORATION DES RENFORTS

Le renfort est un constituant clé pour la résistance et la rigidité du matériau composite.



Figure 20 : renforcement dans l'épaisseur par piquage.

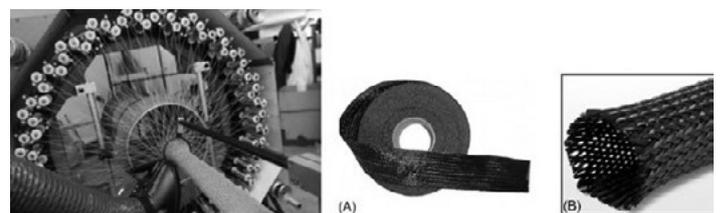


Figure 19 : tresseuse du GEMTEX (gauche) et tresses plates et circulaires en carbone (droite).

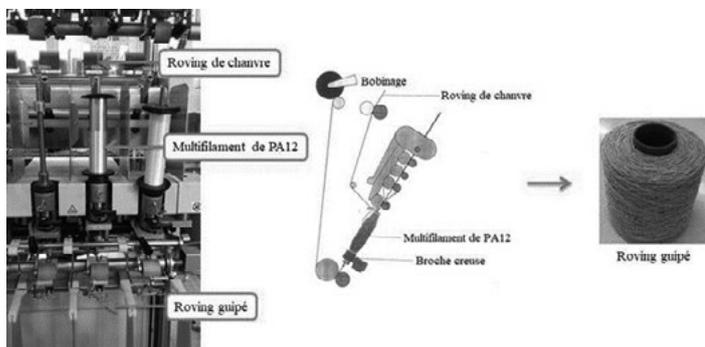


Figure 21 : guipage de roving de chanvre par du polyamide-12.

l'échelle mésoscopique des fils/mèches/rovings, essentielle pour la réalisation de ces renforts et notamment par le développement de produits dit comelés où, les fibres et la résine, principalement thermoplastique, sont mélangés à cette échelle afin, après élaboration des renforts par tissage ou tressage, de pouvoir thermo-compresser les couches et obtenir les composites. Des technologies par guipage sont, entre autres, utilisées pour réaliser ces mèches comelées (Figure 21).

ANALYSE DU COMPORTEMENT DES RENFORTS

La relation entre les paramètres d'élaboration et les propriétés mécaniques des renforts est analysée dans le groupe « Mécanique – textile – composite » sur plusieurs fonctionnalités. Concernant les caractérisations élémentaires, on peut citer à titre d'exemples l'influence de la torsion des rovings sur la résistance en traction des composites (Figure 22), mais également l'identification du comportement membranaire (traction, cisaillement plan) de différentes architectures de renforts (Figure 23).

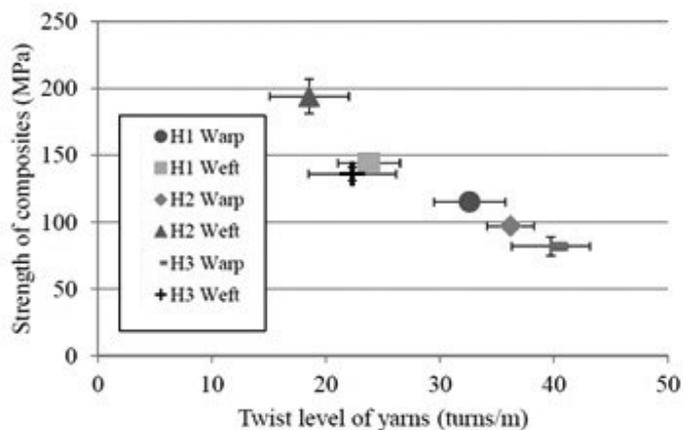


Figure 22 : influence de la torsion sur la résistance en traction de composites.

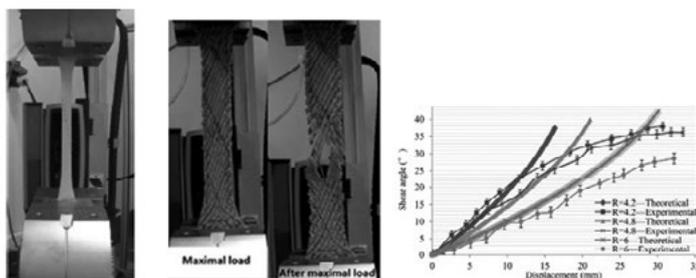


Figure 23 : comportement en traction de tresses (gauche) ; bias-test d'Interlock en lin (centre) ; courbe de cisaillement plan de renforts tressés (droite).

Cette démarche de caractérisation expérimentale permet la compréhension du comportement mécanique d'architectures de renforts moins conventionnellement utilisées, telles que les tresses, ou plus généralement des renforts dits « non-orthogonaux » par la position des fibres. Des modèles sont ensuite élaborés afin, en collaboration avec des partenaires spécialistes de la simulation, d'intégrer ces comportements dans des suites logicielles, notamment par éléments finis.

Les compétences du groupe sont également focalisées sur le comportement à l'impact pour des applications de structures composites épaisses élaborées à partir de renforts multicouches. Les analyses sont déclinées sur les tenues de ces structures suite à des essais balistiques ou d'effet de souffle (Figure 24).

Enfin la chaîne de caractérisations couvre les étapes de mise en œuvre des pièces composites et plus particulièrement l'étape de mise en forme des renforts avant imprégnation. A l'aide d'un banc d'essai dédié à cette étape de préformage et présent au GEMTEX, la déformabilité des différentes structures de renforts (non-tissés, tresses, Interlocks, tissus 2D, structures renforcées par piquage) est analysée (Figure 25). L'objectif est de comprendre les défauts (plis, déchirures, glissements des couches, etc..) issus de cette étape de mise en œuvre composite et d'y remédier en proposant des architectures optimisées de renforts. Ces bases de données expérimentales associées à l'identification du comportement des renforts

conduisent à la constitution de fiches techniques, essentielles à l'utilisation de ces structures fibreuses, mais également à optimiser la maîtrise des technologies textiles (tissage, tressage, piquage, couture, etc...) pour l'élaboration de ces architectures. Enfin ces bases de données permettent de corréler les modèles de simulation, développés en collaboration avec des partenaires.

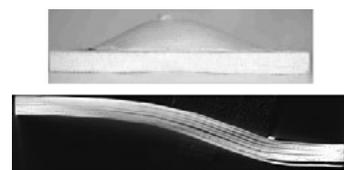


Figure 24 : déformée de structures Interlock à l'impact balistique (haut) ; scan de panneaux composites-métal après un blast-test (bas).

Des collaborations essentielles pour lever les verrous scientifiques et technologiques

De par sa petite taille, le groupe « Mécanique textile Composite » du GEMTEX s'appuie sur une politique scientifique collaborative. Ces collaborations se concrétisent, à l'échelle nationale, par une implication active au sein des GDR « MecaFib » (GDR CNRS 2024) et « Mise en œuvre des composites et propriétés induites » (GDR CNRS 3671), mais également à l'échelle régionale au sein de la Fédération Lilloise de Mécanique (Fed 4282). Ces collaborations se matérialisent par une participation à un grand nombre de programmes, financés soit par l'ANR, incluant la coordination, tels que Numtiss 2010-2014 ; Comp3dRe 2017-2021, ou par l'ADEME (Flax3D 2017-2020), des programmes FUI (Balloo 2012-2017) et/

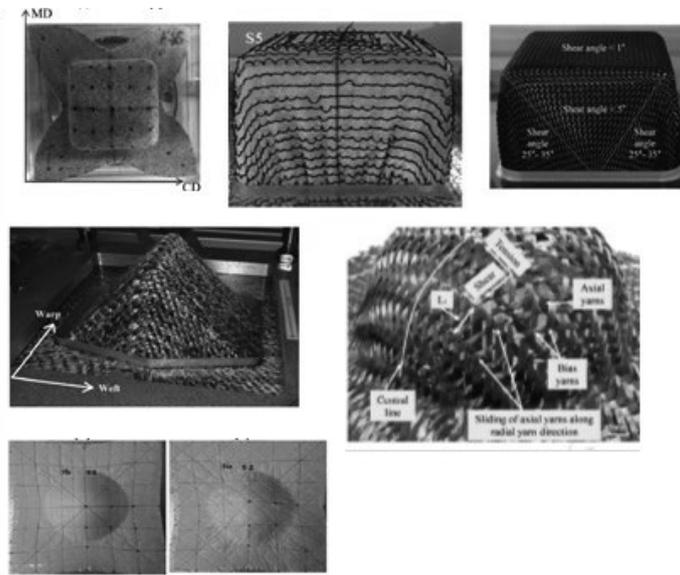
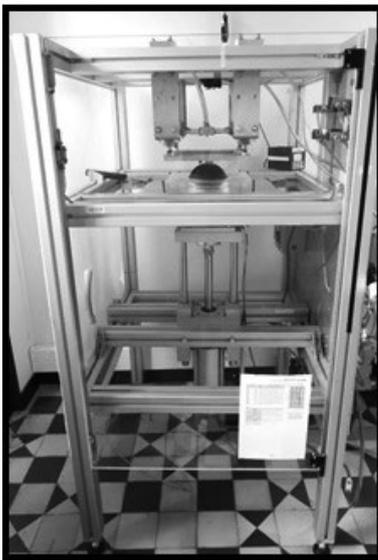


Figure 25 : étape de préformage des renforts : banc d'essai (gauche) et déformabilité de différentes architectures de renforts (droite).

et notamment la réutilisation de fibres de carbone recyclées pour concevoir des renforts alignés à propriétés maîtrisées, le développement de renforts à architectures innovantes, le comportement dynamique des matériaux fibreux, le remplacement des fibres synthétiques par des fibres naturelles ou le développement de renforts comelés/hybrides où le milieu fibreux est associé à la résine dès la conception des renforts.

Contacts

Damien SOULAT, responsable du Groupe « Mécanique Textile Composite » :

damien.soulat@ensait.fr ■

ou PSCP/PIA (Sinfoni 2012-2017). A l'échelle européenne, le GEMTEX a piloté le programme FP7 MAPPIC3D 2011-2015 dédié à l'élaboration de composites thermoplastiques renforcés dans l'épaisseur, a participé au programme FP7

Madmax 2013-2016 et est actuellement leader d'un WP dans le programme H2020-BBI Ssuchy 2017-2021. La proximité de la Région lilloise avec les pays voisins conduit à la définition de programmes Interreg, dont notamment

CobraComp 2019-2022 dédié au renforcement par tressage. On peut par ailleurs noter le programme PHC Toukbal avec les collègues marocains. Ces collaborations sont essentielles pour lever les verrous associés aux développements actuels

AGENDAMAC



Conférences organisées ou parrainées par l'AMAC

En raison de l'épidémie en cours et devant l'impossibilité de prévoir la tenue ou le report des conférences dans les mois à venir, cette section est exceptionnellement laissée vide.

CONTACTS



Adhésions

- Formulaire téléchargeable sur le site de l'AMAC : www.amac-composites.org
- Président de l'AMAC : Philippe BOISSE – philippe.boisse@insa-lyon.fr
- Secrétaire de l'AMAC : Federica DAGHIA – federica.daghia@ens-paris-saclay.fr
- Trésorier de l'AMAC : Christian HOCHARD – hochard@lma.cnrs-mrs.fr

Liste de diffusion aux adhérents de l'AMAC

Pour les annonces de soutenances de thèses, propositions de sujets, conférences... envoyez un courrier électronique (sans pièce jointe) à : amac@enpc.fr

Rédaction AMAC Infos

Envoyez vos annonces à publier dans AMAC Infos à l'éditeur :

Nicolas FELD, Safran – nicolas.feld@safrangroup.com
Etablissement Paris Saclay, rue des Jeunes Bois - Châteaufort, 78114 Magny-les-Hameaux