

Enroulement filamentaire et fabrication additive robotisée *Filament winding and additive manufacturing with robotic process*

Teddy Fournier¹, Damien Busca², Maxence Fache³

1 : CANOE
Université de Pau et des Pays
de l'Adour
Avenue de l'Université BP576
64012 PAU

2 : CANOE
CHEMSTART'UP
Allée Le Corbusier
64170 LACQ - France

3 : CANOE
ENSCBP – Bât Cheminnov
16 avenue Pey Berland
33600 PESSAC - France

e-mail : fournier@plateforme-canoe.com, busca@plateforme-canoe.com, fache@plateforme-canoe.com,

Il existe actuellement un vif intérêt quant à l'utilisation de robots industriels combinée au monde de la fabrication additive. En effet, l'association de ce procédé automatisé et de cette voie de fabrication, permet d'imaginer une industrie totalement autonome et économe. C'est en effet l'objectif d'un projet Européen, Kraken (Figure 1), qui souhaite développer une cellule industrielle robotisée intégrant de la fabrication additive (Organique et métallique), soustractive (Usinage) ainsi que du pick & place, le tout robotisé.



Figure 1: Principe de fonctionnement de la cellule robotisée de fabrication additive et soustractive du projet H2020 Kraken[1]

Cependant, ce type de projet assez ambitieux est orienté sur l'utilisation de plusieurs matériaux (résine thermodurcissable, métal) qui pourraient être difficilement recyclables si l'objet n'est pas Eco-conçu. Nous allons voir ci-après, les différentes technologies de fabrication additive robotisée actuellement développées.

La fabrication additive robotisée de composite fibres courtes

La résine thermoplastique est, quant à elle, un matériau suffisamment versatile pour pouvoir être mis en forme via différentes technologies et pouvant être recyclée très facilement. Il est donc logique de constater que la majorité des acteurs utilisant les procédés RFDM (Robotic Fused Deposition Molding) s'orientent vers de la dépose de résine thermoplastique, soit à l'aide d'effecteurs inspirés d'imprimante FFF (Fused Filament Fabrication) [2] ou directement à l'aide d'un effecteur de type extrudeuse [3], [4] tel qu'illustré sur la Figure 2.

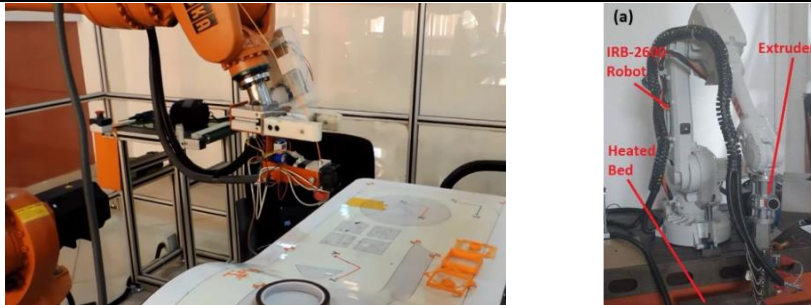


Figure 2 : A gauche un robot Kuka KR16[2] équipé d'une tête FFF et à droite un robot ABB IRB-2600 équipé d'une extrudeuse à Pellet[4].

Les têtes d'impression FFF ont cet avantage d'être peu chères et peuvent-être fabriquées à l'aide d'une simple imprimante 3D. La plateforme CANOE a donc débuté son propre procédé RFDm à l'aide d'une tête FFF issue d'un projet Open source (Figure 3 à gauche). Il s'en est suivi le développement d'une tête de type extrudeuse à pellets (Figure 3 à droite). L'avantage de ce dernier est l'utilisation de granulés de polymère (ou de composite thermoplastique), qui restent la forme de base des matériaux de l'industrie du plastique. De plus, l'utilisation de pellets permet de diminuer le coût matière puisque ces derniers ont un coût près de 10 fois inférieur à celui d'un filament calibré pour les têtes FFF.

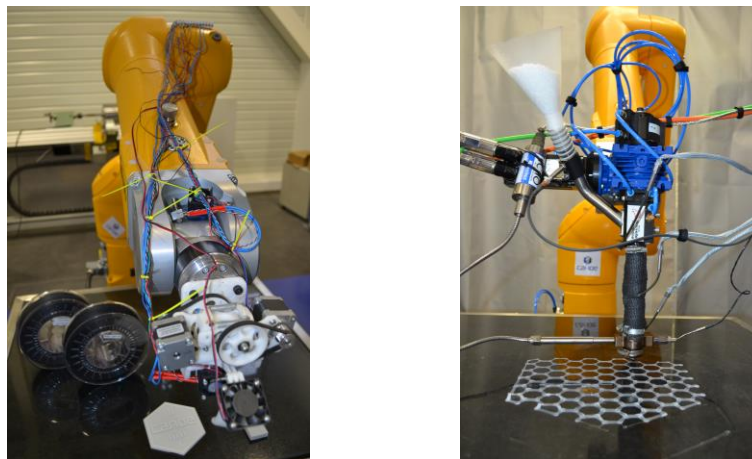


Figure 3 : A gauche une tête d'impression FFF réalisée en interne à CANOE à l'aide d'un projet open source Clough42[5] et à droite une tête d'impression de type extrudeuse à pellet..

Il est ainsi possible de réaliser, à partir de fichiers 3D quelconques, des objets en utilisant des polymères issus du monde de la plasturgie (Classés par popularité/coût croissant) :

- Polymères de commodité : les Polyoléfinés (PP, PE...), les styrénique (ABS, PS, ASA...), les acryliques
- Polymères Hotmelt : EVA
- Polymères renouvelables et/ou biodégradables : PLA, PBS, PCL, PA
- Elastomères thermoplastiques: TPU et TPE-(A,E, O ou S)
- Les polymères techniques : PA, PET, PC, PK
- Les polymères thermostables : PAEK, PEI, PPS...

Cette versatilité sur le choix du matériau est un avantage non seulement financier mais aussi technologique. En effet, bien que l'offre matériaux pour les filaments calibrés soit aujourd'hui tout à fait correcte, il n'en reste pas moins que certains types de polymères ne sont tout simplement pas exploitables sur tête FFF (soit trop rigides, soit trop mous). L'extrudeuse peut, quant à elle, utiliser toutes les duretés et rigidités de matériaux tant que ceux-ci restent admissibles via son orifice d'alimentation.

La cellule robotisée CANOE possède un plateau chauffant (max de 220°C) en granite permettant l'impression à partir d'une surface de 90 x 75 cm² jusqu'à une hauteur d'environ 1 mètre. Le robot a une répétabilité de 40µm et est capable d'embarquer des effecteurs d'un poids pouvant atteindre les 7 kg. L'outil extrudeuse à pellets, pouvant chauffer jusqu'à 420°C possède un débit maximum de 1 kg/h. La résolution des pièces pouvant être élaborées est conditionnée par la taille des buses utilisées (de 0.5 à 6mm de diamètre) et est assez dépendante du type de matière utilisée (rhéologie).

La fabrication additive robotisée de composites fibres longues

L'utilisation de fibres longues, en lieu et place des fibres courtes, est avant tout une question de gain sur les propriétés mécaniques. Un composite constitué de différentes couches (pouvant être d'orientations différentes) de fibres continues aura des propriétés mécaniques près de 5 à 10 fois supérieures à un composite identique mais à fibres courtes. Il est aussi généralement constaté que les composites fibres longues contiennent moins de liant (matrice), généralement de l'ordre de 30 à 40%_m, ce qui laisse plus de place pour la fibre. Cela augmente donc les propriétés mécaniques au risque d'augmenter la densité (i.e. : la densité d'une fibre de carbone (FC) de 1.80 est généralement supérieure à celle d'une matrice polymère qui est aux environs de 1 – 1.5).

Ces dernières années, plusieurs startups ont mis en avant ce type de technologie, soit intégrée dans des bloc de déplacements cartésiens, comme le propose la société MarkForged[6] (Figure 4 à gauche), ou d'autres intégrées sur un effecteur robotisé, tel que la société CC3D l'a implémenté (Figure 4 à droite). Cette dernière utilise notamment comme liant non pas une résine thermoplastique mais une résine thermodurcissable photo-polymérisable[7] de type époxy avec fibre de verre (FV). La FV permet des rayons de courbures bien plus serrés que de la FC, ce qui permet d'imprimer des objets avec des angles plus aigus.

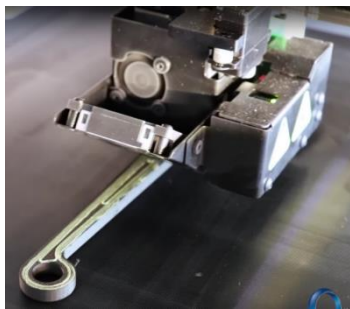


Figure 4 : A gauche d'imprimante Markforged Mark X7 et à droite la tête de dépose de filament CC3D avec liant photo-réticulable.

Une autre entité Américaine, Orbital Composites, développe également un type d'outils permettant l'utilisation de fibres continues avec cette fois-ci une matrice thermoplastique. Ce système breveté est présenté sur la Figure 5. Il consiste en une buse FFF modifiée qui permet le passage d'une fibre continue et d'un ou plusieurs filaments de polymère via les périphéries

du bloc chauffant. La buse est chauffée, le polymère a ainsi le temps de fondre afin de remplir une chambre d'imprégnation dont le but est d'enrober au mieux la fibre continue à sa sortie.



Figure 5 : Aperçus du système d'imprégnation d'Orbital Composites au travers une buse alimentée par un filament polymère et un filament de fibre continu [8]

Bien que ce système ne semble pas implémenté sur un robot poly-articulé, il reste compatible avec la majorité des imprimantes FFF et donc utilisable sur un robot. Cependant l'équipe de développement a également implémenté cette tête d'imprégnation sur un système d'enroulement filamentaire afin de réaliser des formes de révolution à partir de fibre continue tel qu'il est présenté sur la Figure 6. A l'heure actuelle, l'aspect de la fibre déposée reste encore très spartiate et les propriétés mécaniques ne sont pas annoncées mais le principe reste intéressant pour une implémentation sur des systèmes à plus grande échelle.

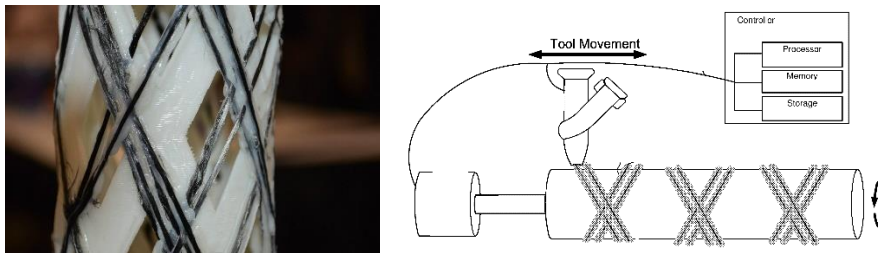


Figure 6 : Exemple d'application de l'outil d'Orbital Composites pour la réalisation d'un tube via le procédé d'enroulement filamentaire[9]

Une autre entité, Européenne cette fois ci, CEAD (Pays Bas) propose une cellule commerciale automatisée capable d'imprimer de la fibre continue de carbone ou de verre avec liant thermoplastique (Voir Figure 7 à gauche). Selon le fabricant, le volume d'impression est de l'ordre de 2 x 4 x 1.5m avec un débit maximum de matière de 15 kg/h[10]. Le procédé appelé CFAM (Continuous Fiber Additive Manufacturing) est géré par un système cartésien (Voir Figure 7 à droite) et est capable de transformer tous les types de thermoplastiques, y compris les thermostables tels que les PEEK (PolyEtherEtherKetone).



Figure 7: A gauche une bobine de fibre de carbone continue imprégnée de résine thermoplastique et à droite la cellule CFAM de CEAD.

D'autres acteurs utilisant le CFAM existent et sont décrits dans la littérature, tel que l'université de Braunschweig [11] (Allemagne) le présente dans son papier. Cependant, les plus aboutis restent les procédés issus des entités privées, comme celui de la société AREVO (Etats-Unis). Cette start-up détient plusieurs brevets[12]–[15] et a su exploiter l'intégration d'un système de dépose de fibres continues pré-imprégnées thermoplastiques en combinaison avec un bras robotique. Les ingénieurs de cette entreprise ont effectivement mis au point une tête de dépose qui permet la consolidation des couches in-situ grâce à un chauffage laser (Figure 8 à gauche) qui permet le soudage des couches entre elles mais aussi grâce à une étape de compaction (Figure 8 à droite) gérée par un vérin venant appliquer une force normale localisée. Ce procédé permet en outre l'élaboration d'un composite avec moins de 1% de porosité[16] ce qui reste très bas pour de la fabrication additive. L'exemple ainsi présenté, un cadre de vélo, est développé pour le compte de la société Emery et conduit à un produit final totalement fonctionnel.



Figure 8 : Exemple d'application du procédé AREVO dans la confection d'un cadre de vélo en composite fibre de carbone, avec à gauche l'étape de soudage laser des différentes couches et à droite l'étape de compaction[17].

La fabrication additive robotisée de composite fibre longue couplé à l'enroulement filamentaire

L'enroulement filamentaire est une technique de mise en forme conventionnelle permettant la réalisation de pièces de révolution, tels que des réservoirs. Son principe, relativement simple à mettre en œuvre, permet de réaliser des pièces généralement de très grand volume (plusieurs m³). Le procédé d'enroulement filamentaire utilise classiquement de 2 à 5 axes de type cartésien permettant la réalisation d'un tissage complexe sur forme bombée.

JNC 21 – Bordeaux INP – 1-3 juillet 2019

La substitution des axes cartésiens par des axes robotisés augmente les degrés de liberté (jusqu'à 7 axes et bien plus). Les autres intérêts de l'utilisation d'un robot sont ses fonctions d'automatisation et de flexibilité, ce qui permettra le changement d'outils en tête. En effet, durant le processus de fabrication, plusieurs outils, tels que des systèmes de dépose, de consolidation ou encore de mesure peuvent être automatiquement gérés par le robot poly articulé. Cet aspect permet alors d'envisager la fabrication additive comme une évolution de ce procédé, notamment la réalisation de formes complexes de révolution.

Les matériaux utilisés en enroulement filamentaire sont des fibres continues (Ex. : FC, FV ou encore Kevlar) imprégnées de liants. Les plus fréquemment utilisés sont des résines thermodurcissables (Ex. : Epoxy ou Polyester) mais CANOE s'oriente vers l'utilisation de résines thermoplastiques.

En complément, CANOE investit pour son site de Lacq dans l'installation d'un robot KUKA, intégré par la société MFTech/Coriolis, spécialiste du secteur. Ce robot (Figure 9) permet la conception de pièces de révolution telles que présentées sur la figure. Ce nouvel équipement a la capacité de mettre en œuvre des bandes imprégnées ('tapes'). Ces matériaux développés et produits par CANOE sont des fibres continues imprégnées par une résine thermoplastique à des taux variant de 30 à 60%_m.



Figure 9: Robot KUKA équipé du matériel MFTech permettant l'enroulement filamentaire de tapes

L'hybridation, des technologies RFDM, CFAM précédemment décrites avec le procédé d'enroulement filamentaire permettrait la réalisation de formes de révolution complexes, résistantes, et la possibilité de réaliser in situ des formes telles que la réalisation d'emplacement de capteurs, d'embout...

Tout comme avec la technologie RFDM développée par CANOE, cette hybridation d'outils de dépose peut convenir pour tous types de polymères et de renforts continus. Pour ces derniers, plusieurs options sont envisagées :

1. L'utilisation d'une fibre continue sèche (simplement ensimée) qui sera imprégnée de thermoplastique in situ par l'effecteur
2. L'utilisation d'une tape où l'apport du liant sera simplement apporté par l'enrobage de la fibre.

La première voie envisagée est l'utilisation d'une résine thermoplastique liquide qui sera polymérisée en sortie d'effecteur, ou bien encore l'imprégnation de polymère à l'état fondu (à chaud) grâce à une micro extrudeuse.

La seconde voie, plus mature sur l'aspect matériaux mais plus complexe sur la mise en œuvre, nécessitera une tête de dépose de type AFP (Automated Fiber Placement – Voir Figure 10 à gauche) [18]–[21] adaptée au procédé d'enroulement filamentaire et de fabrication additive couche par couche. L'étude de la dépose des différentes couches est un paramètre clef dans la

bonne réalisation d'une pièce sans porosité (Figure 10 à droite), et en particulier le choix d'un système de chauffage optimisé avec les matériaux étudiés[22], [23] .

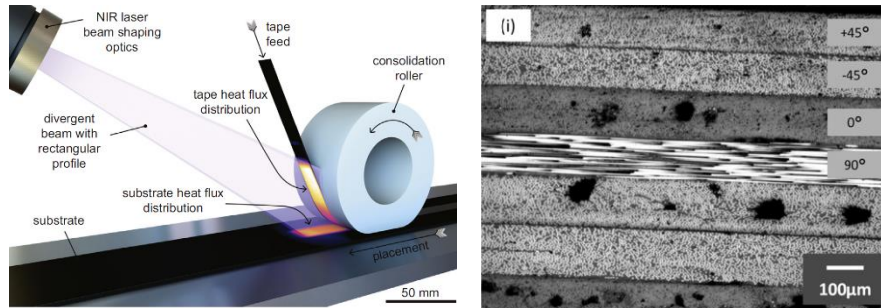


Figure 10 : A gauche , description du procédé d'AFP[21], à droite une vue en coupe d'une superposition de fibre réalisé par AFP avec la présence de porosité[19]

CANOE est à l'heure actuelle à l'étude sur ce type d'hybridation de technologies suivant les deux voies énoncées ci-dessus.

Références

- [1] Jose Antonio Dieste, « Projet Kraken - The future of industrial additive and subtractive manufacturing ». 10-oct-2018.
- [2] Arshdeep Singh, *Additive Manufacturing By KR-16 (KUKA ROBOT)*. .
- [3] X. Liu, B. Chi, Z. Jiao, J. Tan, F. Liu, et W. Yang, « A large-scale double-stage-screw 3D printer for fused deposition of plastic pellets », *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 134, n° 31, p. n/a-n/a, août 2017.
- [4] P. Magnoni, L. Rebaioli, I. Fassi, N. Pedrocchi, et L. M. Tosatti, « Robotic AM System for Plastic Materials: Tuning and On-line Adjustment of Process Parameters », *Procedia Manufacturing*, vol. 11, p. 346-354, 2017.
- [5] « Itty Bitty Double FLEX V2 Extruder », *Clough42, LLC*. .
- [6] G. T. Mark et A. S. Gozdz, « Three dimensional printer with composite filament fabrication », US9156205 (B2), 13-oct-2015.
- [7] K. Tyler, « Method and apparatus for continuous composite three-dimensional printing », US9511543 (B2), 06-déc-2016.
- [8] C. Nielsen-Cole et J. Frei, « Additive Manufacturing Techniques and Systems to Form Composite Materials », WO2016077473 (A1), 19-mai-2016.
- [9] E. Krassenstein, « Orbital Composites to Make 3D Printing 100 Times Faster Using Carbon Fiber, Fiber Optics, Injection & More », *3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing*, 28-avr-2015. .
- [10] « CEAD | Composite Additive Manufacturing ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ceadgroup.com/>. [Consulté le: 15-mai-2019].
- [11] M. Rakhshbahar et M. Sinapius, « A Novel Approach: Combination of Automated Fiber Placement (AFP) and Additive Layer Manufacturing (ALM) », *Journal of Composites Science*, vol. 2, n° 3, p. 42, juill. 2018.
- [12] P. Shah, H. Bheda, P. Shah, et H. Bheda, « Methods and systems for three-dimensional printing of composite objects », WO2018217650A1, 29-nov-2018.
- [13] H. Bheda, R. Reese, H. Bheda, et R. Reese, « Amorphous polyaryletherketone and blends thereof for use in additive manufacturing », EP3359604A1, 15-août-2018.
- [14] R. Reese, H. Bheda, et P. Shah, « Localized Heating to Improve Interlayer Bonding in 3d Printing », EP3463821 (A1), 10-avr-2019.
- [15] R. Reese *et al.*, « Method and apparatus for additive manufacturing using filament shaping », WO2018182773A1, 04-oct-2018.
- [16] Michael Molitch-Hou, « Arevo Looks to Take on Carbon Fiber 3D Printing with New Funding and CEO », *engineering.com*, 17-mai-2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/16958/Arevo-Looks-to-Take-on-Carbon-Fiber-3D-Printing-with-New-Funding-and-CEO.aspx>. [Consulté le: 15-mai-2019].
- [17] Mélanie Renard, « AREVO commercialise son premier cadre de vélo électrique imprimé en 3D », *3Dnatives*, 11-avr-2019. .
- [18] A. Comer *et al.*, « Wedge peel interlaminar toughness of carbon- fibre/peek thermoplastic laminates manufactured by laser-assisted automated-tape-placement (latp) », 2014.
- [19] A. J. Comer *et al.*, « Mechanical characterisation of carbon fibre-PEEK manufactured by laser-assisted automated-tape-placement and autoclave », *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 69, p. 10-20, févr. 2015.
- [20] P. M. Schaefer, D. Gierszewski, A. Kollmannsberger, S. Zaremba, et K. Drechsler, « Analysis and improved process response prediction of laser- assisted automated tape placement with PA-6/carbon tapes using Design of Experiments and numerical simulations », *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 96, p. 137-146, mai 2017.

- [21] C. M. Stokes-Griffin et P. Compston, « An inverse model for optimisation of laser heat flux distributions in an automated laser tape placement process for carbon-fibre/PEEK », *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 88, p. 190-197, sept. 2016.
- [22] Z. August, G. Ostrander, J. Michasiow, et D. Hauber, « Recent developments in automated fiber placement of thermoplastic composites », p. 13.
- [23] F. Henne *et al.*, « Thermoplastic in situ fiber placement for future solid rocket motor casings manufacturing », p. 9.