

Une chaîne de fabrication intégrée

La fabrication additive hybride combine extrusion de polymères chargés et usinage en état vert. Elle constitue une voie prometteuse pour la production de pièces métalliques et céramiques complexes. Cet article présente le développement d'une chaîne de fabrication intégrée, en mettant en lumière les verrous techniques rencontrés, les solutions apportées, ainsi que les gains obtenus.

Édouard
Rivière-
Lorphèvre
professeur
à l'université
de Mons,
Faculté
Polytechnique,
Service de Génie
Mécanique

1. INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, les technologies de fabrication additive ont été développées pour passer d'outils de prototypage rapide à des méthodes de production de pièces finales en bonne matière aussi bien en polymère qu'en métal ou en céramique. De manière intrinsèque, la fabrication additive permet de réduire l'impact du design sur le temps et le coût de fabrication. Une production économique de petites séries, voire de pièces uniques, est possible, notamment grâce à l'absence de fabrication d'outils de production dédiés : moules d'injection ou matrices de forgeage. La fabrication additive peut contribuer à rendre les procédés plus durables en réduisant les consommations de matière et d'énergie par la production de pièces proches de la forme finale (*near net shape*) ou par l'obtention de structures allégées et optimisées en termes de forme. Pour la production de pièces métalliques, la plupart des techniques directes consistent à faire fondre localement une poudre par apport d'énergie (laser ou faisceau d'électron). Ces techniques représentent une complexité importante liées à la gestion des poudres et des investissements importants dans les outils de production.

Dans un souci de limiter les dépenses d'investissement, les procédés par extrusion de matière peuvent apporter une solution intéressante. La production de pièces en métal ou en céramique passe alors par une voie indirecte : un composite polymère/métal ou polymère céramique est mis en forme par impression 3D via l'une des techniques classiques (impression à partir de fil FDM, à partir de granulés PAM (pellet additive manufacturing) ou par extrusion dans un piston PBAM). Cette pièce dite « verte » subit ensuite des traitements chimiques et/ou thermiques pour éliminer le polymère et conférer ses propriétés mécaniques à la pièce

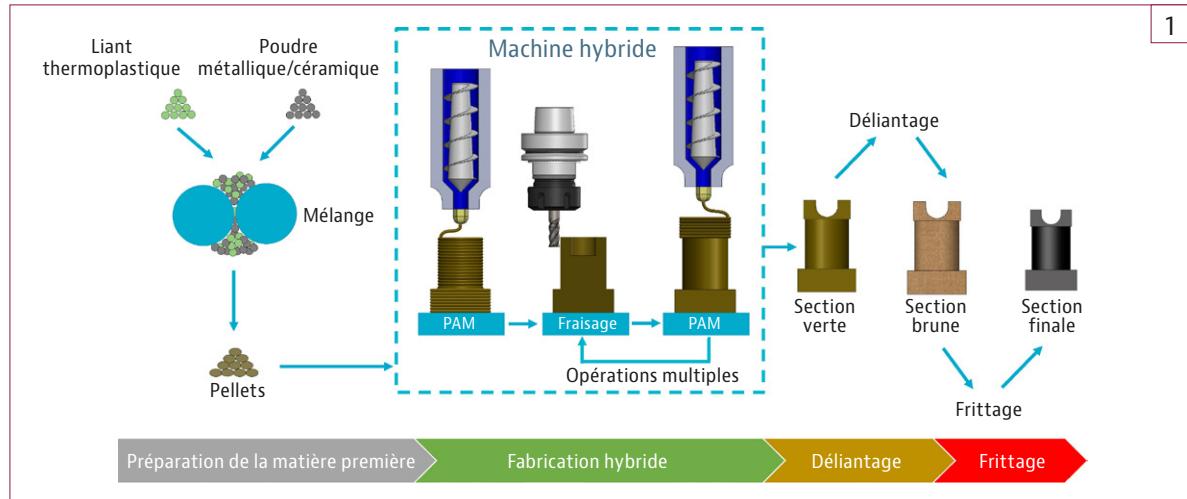
par frittage. La fabrication additive indirecte permet de produire des pièces complexes dans des matières difficiles à mettre en forme par d'autres procédés de fabrication. Une voie prometteuse est l'emploi de l'extrusion de polymères chargés (technique dite PAM) qui permet d'utiliser des références de matières développées pour le moulage par injection dans un procédé de fabrication additive. La pièce imprimée est ensuite délianée et frittée pour lui conférer ses propriétés finales.

Les limitations de l'impression 3D (faible productivité, état de surface médiocre lié à l'effet d'escalier) peuvent être réduites en usinant la pièce imprimée avant les étapes de délianage et de frittage. On parle alors d'hybridation de technologies (combinaison de plusieurs procédés de fabrication dans une seule machine).

La chaîne de production globale reprend donc les étapes suivantes :

- Réalisation de la matière première (« feedstock ») sous forme de granulés contenant la matière de la pièce finale et un mélange de polymères assurant la mise en forme par impression 3D;
- Impression d'une partie de la pièce par la technologie PAM
- Usinage de finition de la portion de la pièce imprimée pour améliorer la qualité de surface, la précision géométrique ou dimensionnelle
- Reprise des cycles impression / usinage jusqu'à la réalisation de l'ensemble de la pièce
- Éventuel usinage de finition des surfaces externes encore accessibles de la pièce
- Délianage chimique puis thermique de la pièce pour évacuer une partie du polymère de la pièce crue
- Frittage de la pièce pour lui conférer ses propriétés finales (Cf. figure 1)

Figure 1.
Chaîne de
production
hybride



Dans ce contexte, un système d'impression 3D cartésien E3D a été équipé d'une tête d'impression de type PAM (Mahor) et d'un moteur à courant continu accueillant un outil de fraisage afin de mettre au point les éléments de la chaîne complète de fabrication.

(Cf. figures 2,3 & 4)

2. VERROUS TECHNIQUES IDENTIFIÉS

Le développement d'une chaîne de fabrication hybride a mis en évidence plusieurs verrous techniques en termes d'imprimabilité de la matière et d'aptitude à la finition par usinage.

Concernant l'aptitude à la mise en forme par impression 3D, utiliser une matière première qui a une composition standard conçue pour un procédé d'injection (MIM ou CIM) pour l'impression PAM n'est pas nécessairement idéal. Les compositions ne sont pas nécessairement parfaitement adaptées à l'impression 3D et les paramètres opératoires optimaux doivent être déterminés de manière spécifique pour chaque référence matière. Une approche par plans d'expérience a permis d'identifier les paramètres les plus influents sur la qualité de l'impression. La gestion des températures aux différents points de l'extrudeur (en entrée, dans le fourreau et à la buse) a un impact important sur la présence ou non de défaut de production (sur ou sous-extrusion, mauvaise adhésion avec le plateau ou entre les couches). Afin d'éviter un délai important de mise au point empirique lors de l'utilisation d'une nouvelle référence matière, une méthodologie systématique a été mise au point. Une analyse par thermographie infrarouge du cordon extrudé couplé à la mesure de la qualité des pièces produites pour quelques de jeu de paramètres permet de converger rapidement vers une extrusion de qualité. Par ailleurs, des essais de composition alternatives ont été réalisés pour optimiser la formulation de la matière première permettant de produire des pièces en alliage de titane Ti6Al4V^[1]. L'emploi de polymères biosourcés et ou hydrosolubles (méthylcellulose, polyéthylène glycol, acide stéarique) a permis la production de granulés ayant un comportement optimisé pour l'extrusion tout en réduisant l'impact de la production de matière première. (Cf. figure 5)

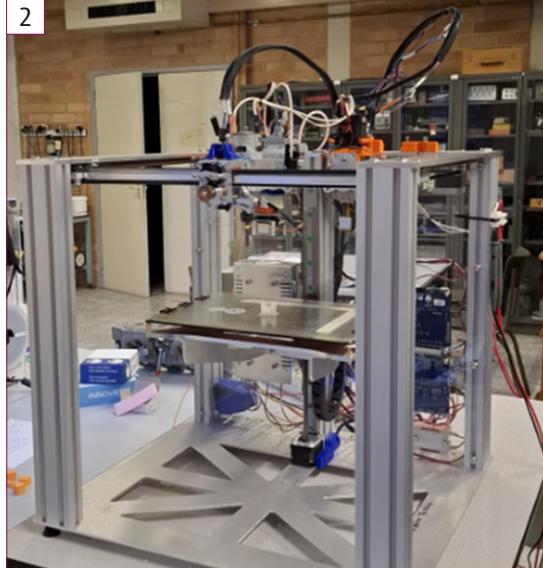


Figure 2.
Portique
d'impression
3D

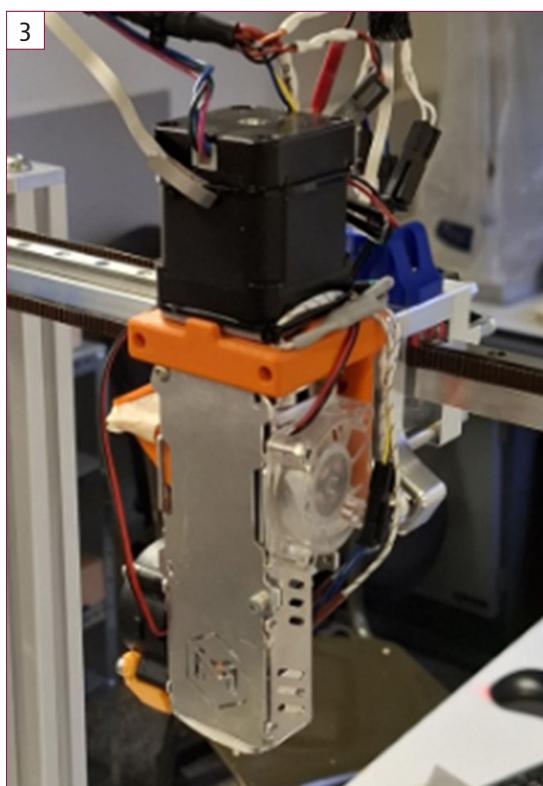


Figure 3.
Extrudeur
PAM installé
sur la
machine



Concernant l'usinabilité de la matière, il n'existe pas de point de comparaison démarrer la recherche de paramètres pour l'usinage du composite polymère/métal ou polymère céramique imprimé.

Une première étape a été la recherche du type d'outil le plus adapté à l'opération. Trois pistes ont été explorées : un outil dédié à l'usinage de polymère thermoplastique,



Figure 4.
Moteur DC
pour l'usinage

Figure 5.
Éprouvette
de traction
en Ti6Al4V
avant usinage,
délaitage
et frittage^[1]

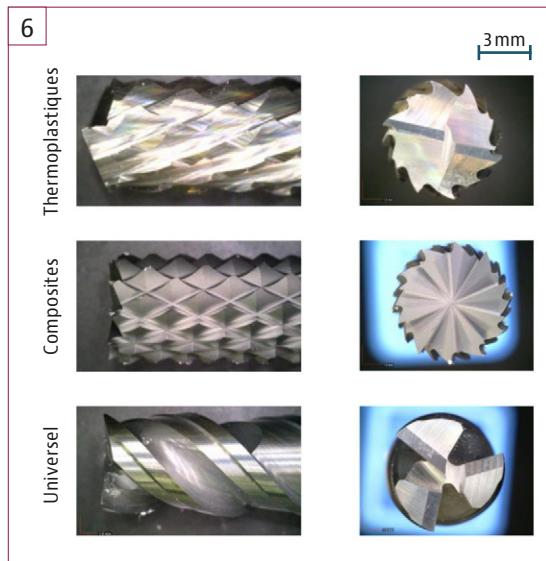


Figure 6.

Outils testés pour la finition de pièces PAM^[2]

un outil adapté aux composites et un outil dit universel.
(Cf. figure 6)

L'outil thermoplastique a montré des résultats excellents et le plan expérimental a montré qu'une démarche systématique (inspirée de la norme AFNOR du couple outil/matière) pouvait être mise en place pour déterminer les plages admissibles de paramètres de coupe.

La présence de grains durs et potentiellement abrasifs (particules métalliques ou de céramique) dans la pièce pouvaient faire craindre une usure excessive de l'outil. Après analyse, il a été vérifié que même après trente minutes d'usinage, il n'y avait pas de marques significatives d'usure sur les outils, leur garantissant une durée de vie confortable.

Pour garantir la viabilité du procédé, il fallait également s'assurer que les efforts engendrés par l'usinage ne risquaient pas de déformer ou de décoller la pièce du plateau d'impression. Les efforts de coupe mesurés ont été comparés à l'effort de décollement de la pièce et il a été conclu qu'il y avait une marge de sécurité suffisante à cet égard pour la chaîne de fabrication. D'un point de vue opérationnel, le lien entre les deux procédés impose

Figure 7.

Artefact de test pour l'évaluation de la capacité du procédé

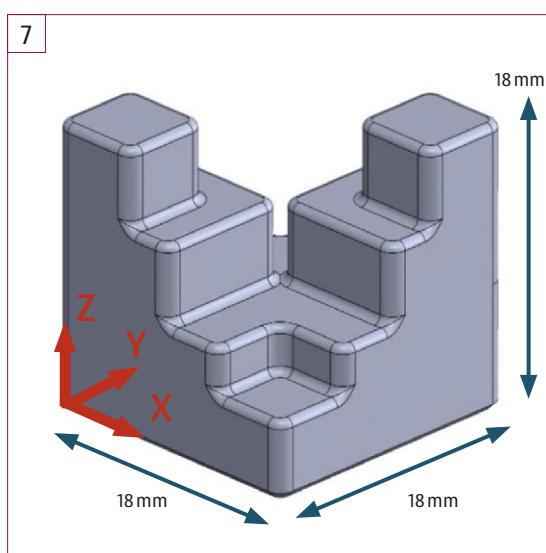


Figure 8.

Pièce hybride additive-soustractive en polymère

d'avoir une estimation fiable de leurs capacités respectives, notamment en termes de tolérances. Un artefact de test a été développé pour permettre d'obtenir une estimation de la capacité de la machine d'impression 3D en un temps réduit.

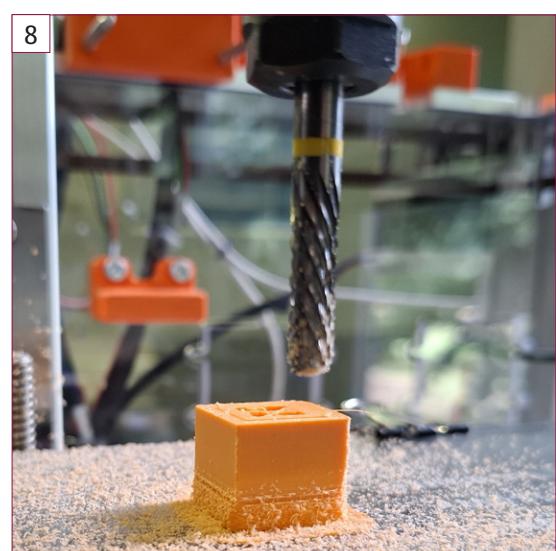
Ces informations permettent ensuite de déterminer les valeurs de surépaisseurs d'usinage à appliquer pour s'assurer qu'une quantité de matière suffisante pourra être enlevée dans l'étape de finition par usinage. La recherche a mis en avant des valeurs de l'ordre de 200 µm, permettant de limiter la perte de matière par usinage dans la phase de finition à quelques pourcents de la masse mise en œuvre dans le procédé.
(Cf. figures 7 & 8)

3. EXEMPLES DE RÉSULTATS

Le bénéfice de l'usinage est immédiat sur la qualité de surface obtenue. Dans la céramique (zircone noire), la rugosité arithmétique (Ra selon ISO 4288) des faces parallèles à la direction d'impression passe d'une valeur moyenne de l'ordre de 40 µm à des valeurs inférieures à 0,8 µm, tandis que la rugosité totale (Rt selon ISO 4288) passe de plus de 250 µm à moins de 10 µm. Ces caractéristiques se conservent après déliançage et frittage^[2].
(Cf. figure 9)

Dans le cas de titane (Ti6Al4V), pour des valeurs similaires de départ, on obtient après usinage une rugosité arithmétique inférieure à 3,2 µm et une rugosité totale de l'ordre de 20 µm^[3]. Ces valeurs semblent influencées par la granulométrie des poudres composant la matière première mais restent à des niveaux permettant un usage direct des pièces sans finitions additionnelles pour un grand nombre de cas d'application.
(Cf. figure 10)

Du point de vue des tolérances, l'usinage à l'état vert permet de réduire les déviations de parallélisme, planéité et perpendicularité. Cela a été vérifié sur des pièces réalisées en céramique (zircone noire) par impression et ensuite usinées, déliançées et frittées. Malgré une influence significative des opérations de déliançage et



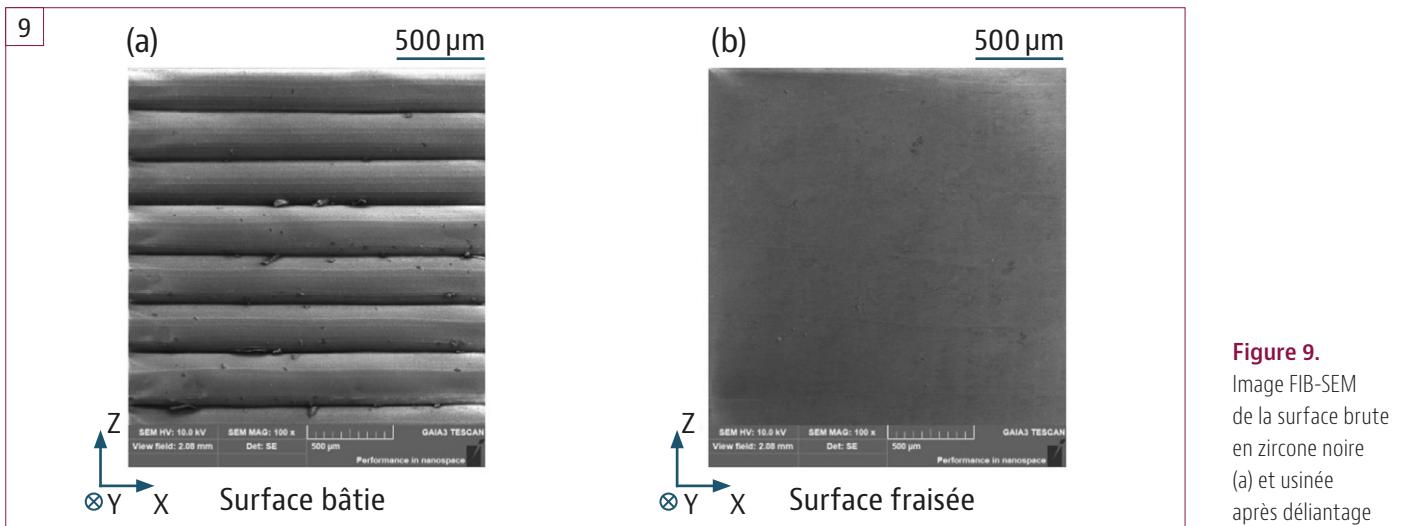
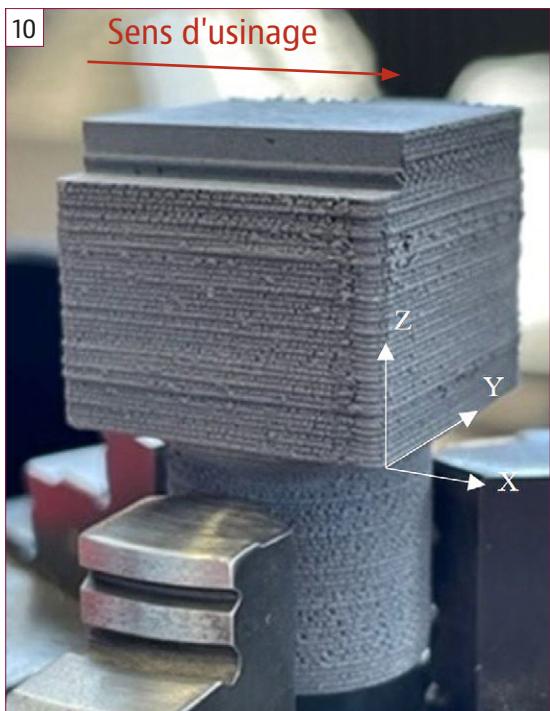


Figure 9.
Image FIB-SEM de la surface brute en zircone noir (a) et usinée après délimitage et frittage (b)^[3]

frittage, les tolérances obtenues en fin de chaîne atteignent les niveaux de spécifications les plus exigeants de la norme ISO 2768-2.

En effet, les pièces imprimées présentent globalement une classe de tolérance large (L) tandis que celles ayant subi l'usinage de finition, délimitées et frittées atteignent une classe fine (F), permettant ainsi de réduire de facteurs 8 et 18 les déviations géométriques.

De manière globale, l'hybridation permet de réduire le délai de fabrication en imprimant avec un débit de matière plus élevé (via l'augmentation du diamètre de la buse d'impression) une pièce proche de la forme finale à produire. L'usinage permet d'obtenir une qualité de surface adéquate en un temps relativement court. Cette approche est largement plus efficace que l'utilisation d'une buse de très faible diamètre qui amène à des temps de production prohibitifs. Une hybridation séquentielle permet également de finir en cours de procédé des zones qui ne seront plus accessibles en fin de process.



4. PERSPECTIVES

Les projets de recherche en cours et à venir ont pour objectif d'augmenter la maturité technologique du procédé pour favoriser son adoption industrielle, on peut citer notamment :

- l'automatisation de la détermination des paramètres d'impression d'une nouvelle référence matière assistée par intelligence artificielle (projet FEDER Win³ing)^[5]
- la mise au point de compositions de matière première plus adaptée à l'extrusion et présentant un impact environnemental réduit^[1]
- le développement d'une chaîne CFAO intégrée pour la fabrication hybride
- l'analyse de la recyclabilité des copeaux produits lors de l'usinage pour de nouvelles impressions

Les développements proviennent de collaborations entre l'université de Mons (UMONS), le belgian ceramic research center (BCRC) et le Centre collectif de l'industrie technologique belge (SIRRIS). ■

9. BIBLIOGRAPHIE

- 1.Bossu J. 'Eco-Design of Pellets-Based Additive Manufacturing Feedstock: Development of a Sustainable Binder and Environmental Impact Assessment' Thèse UMONS, 2025
- 2.Spitael, L., Dantinne, H., Bossu, J., Rivière, E., & Ducobu, F. (10 March 2023). A Systematic Approach to Determine the Cutting Parameters of AM Green Zirconia in Finish Milling. *Journal of Composites Science*, 7 (3), 112.
- 3.Spitael, L., Damby, V., Otaegi, A., Bossu, J., Delmotte, C., Martic, G., Juste, E., Carrus, R., Arrazola, P.-J., Petit, F., Rivière, E., & Ducobu, F. (2024). Hybrid Fabrication of Zirconia Parts with Smooth Surface Texture and Tight Tolerances. *Journal of Composites Science*.
- 4.Bossu, J., Rivière, E., Spitael, L., Ducobu, F., Delaunois, F., Martic, G., Delmotte, C., Juste, E., & Petit, F. (2024). Green machining of Ti6Al4V/Polymers composite made by pellets additive manufacturing. *Materials Research Proceedings*, Vol. 41
- 5.Spitael, L., Damby, V., Beobide Otaegi, A., Rivière, E., Arrazola, P.-J., & Ducobu, F. (2025). Monitoring of tracks shaped by material extrusion: determination of the most influential printing parameters on their dimensional accuracy. *Progress in Additive Manufacturing*.

Figure 10.
Éprouvette de Ti6Al4V en cours d'usinage^[4]