



## Revue de publication Pollen AM

Support : TÉCNICA #9  
Date de publication : MAI / JUIN 2021

***« Lors de l'essai réalisé, les pièces présentant une bonne reproductibilité de forme, sans défauts structurels et avec un degré de densification conforme aux attentes. Elle est donc considérée comme une technologie ayant le potentiel d'être appliquée dans le segment des céramiques techniques. »***

# Fabrication additive FDM de pièces en céramique : essai de la technologie PAM

EDITION MAI / JUIN 2021

VERSION NUMERIQUE ORIGINALE : [HTTPS://ISSUU.COM/CTCV/DOCS/REVISTA-TECNICA\\_9\\_MAIO-JUNHO](https://issuu.com/ctcv/docs/revista-tecnica_9_maio-junho)

Ana Moura<sup>1</sup>, Didier Fonta<sup>2</sup> e Hélio Jorge<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro (CTCV) - Centre Technologique de la Céramique et du Verre

<sup>2</sup> Pollen AM - France

## Introduction

La Fabrication Additive (AM) est une méthodologie de production de pièces qui consiste à ajouter de la matière couche par couche, à travers un équipement spécifique, pour créer une forme géométrique précise [1]. Ce processus est communément appelé impression 3D [2].

Les principaux avantages de la fabrication additive par rapport aux techniques conventionnelles sont la possibilité de produire des pièces à géométrie complexe avec une grande précision, sans avoir à utiliser d'outils, la flexibilité en termes de conception et la réduction de la consommation de matières premières. Elle présente également l'avantage de produire de petits lots de pièces, à des coûts relativement faibles [1, 3].

Il existe plusieurs technologies d'AM sur le marché et les principales différences résident dans la façon dont chaque couche est construite et dans la façon dont les couches sont connectées les unes aux autres. Ces deux paramètres sont importants, car ils vont déterminer la précision de finition du produit final ainsi que ses propriétés mécaniques [2].

Contrairement aux matériaux polymères et aux métaux, la fabrication additive de matériaux céramiques en est encore à ses débuts. Le traitement des matériaux céramiques à l'aide de la fabrication additive présente encore des limites importantes au niveau technologique en raison des points de fusion élevés de ces matériaux, de la nécessité d'effectuer un traitement thermique ultérieur pour obtenir les propriétés structurales souhaitées (frittage), de la nature fragile des matériaux céramiques et du fait qu'ils ont une faible ductilité (par rapport aux métaux ou aux plastiques).

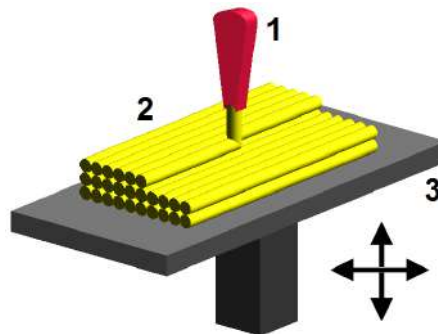
Cependant, ce type de technologie suscite un intérêt croissant pour la production de matériaux céramiques, non seulement les céramiques traditionnelles, mais aussi les céramiques techniques, car ce sont des matériaux qui présentent une dureté, une résistance à l'abrasion et une résistance mécanique élevées, ainsi qu'une grande résistance à l'oxydation et à la corrosion, par rapport aux métaux, et qui peuvent être de bons isolants, tant sur le plan thermique qu'électrique.

Cet article présente une évaluation du processus d'impression 3D de céramiques par extrusion thermoplastique, également connu sous le nom de FDM (Fused Deposition Modelling), à l'aide d'un équipement innovant, récemment mis sur le marché par la société Pollen AM. Cette étude résulte

du partenariat de cette entreprise avec la Cellule Innovation et Développement du CTCV, remplissant ainsi son rôle de recherche et de démonstration technologique.

### Fabrication additive de céramiques par FDM

Les technologies de fabrication additives de types FDM, construisent les objets par successifs de jonc de matériau fondu produit par un système d'extrusion, par la formation de couches (figure 1). C'est l'une des technologies les plus répandues pour l'impression 3D de plastique, qui peut également être utilisée pour les matériaux céramiques.



(Zureks/Wikimedia Commons)

Figure 1 - Schéma explicatif du procédé de fabrication additive FDM.

Avant le processus de production, un modèle CAO 3D est obtenu par un logiciel, qui doit être exporté dans un format approprié - le plus courant étant le format STL. Dans la phase de préparation, à partir du modèle 3D, la construction de l'objet est configurée à l'aide d'un logiciel de tranchage qui inclut tous les paramètres d'impression. Le logiciel divise le modèle en couches bidimensionnelles (tranches) et configure, par exemple, la sélection du matériau à traiter, le diamètre de la tête d'extrusion, la qualité d'impression et les commandes de mouvement.

Le processus de production intègre ensuite trois phases : l'impression, le déliantage et le frittage (figure 2). La matière première consiste en un mélange de matériau céramique micronisé et d'un thermoplastique. Le matériau céramique est le matériau à partir duquel l'objet doit être fabriqué. Le thermoplastique est un matériau temporaire, qui donne au mélange sa fluidité en le chauffant pendant le processus d'impression et qui est retiré de l'objet lors du processus de déliantage. Dans la dernière étape, l'objet est fritté lorsqu'il est soumis à une température élevée, un procédé courant dans l'industrie de la céramique.

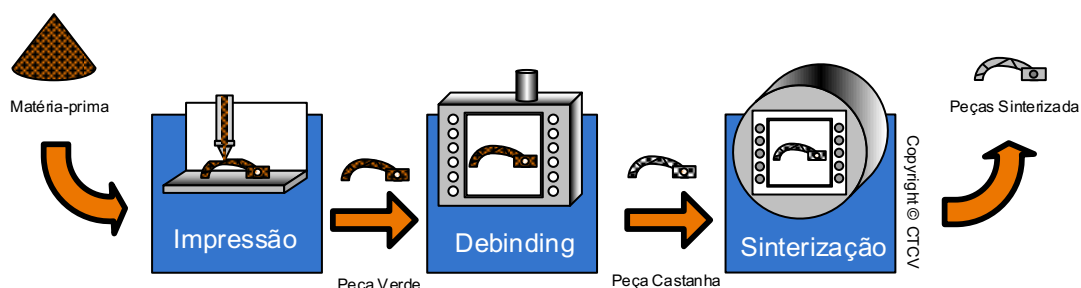


Figure 2 - Processus de production de pièces en céramique par FDM.

## Technologie PAM

La technologie PAM (abréviation de Pellet Additive Manufacturing) a été mise au point par Pollen AM, une société française qui développe, fabrique et commercialise des imprimantes 3D industrielles multimatériaux (exemple à la figure 3). La principale caractéristique de ces imprimantes 3D réside dans le fait qu'elles utilisent des matériaux universels sous forme de granulés, ceux actuellement utilisés par l'industrie. Ce format de matériau appliqué à l'impression 3D donne accès à la plus grande bibliothèque de matières premières disponibles sur le marché - thermoplastiques standard, de performance, élastomères, mais aussi métaux et céramiques techniques. Cette spécificité rend les imprimantes Pam 3D PAM particulièrement adaptées aux applications exigeantes qui doivent répondre aux normes industrielles.

La technologie PAM permet de transformer à un coût imbattable (les granulés sont 10 à 100 fois moins chers que les matériaux spécifiques pour l'impression 3D) des matériaux certifiés, tels que le contact peau ou alimentaire, le feu/fumée pour les secteurs du transport et de la construction ou encore répondant à des normes de blindage électromagnétique, etc.

Le logiciel de l'imprimante 3D Pam est également ouvert et permet à ses utilisateurs de préparer l'impression 3D à l'aide d'un ensemble de paramètres spécifiques liés à la nature du matériau à traiter, aux pièces à produire et à la configuration des systèmes PAM - tels que le diamètre des buses, la hauteur des couches, les vitesses d'impression, les températures de traitement.

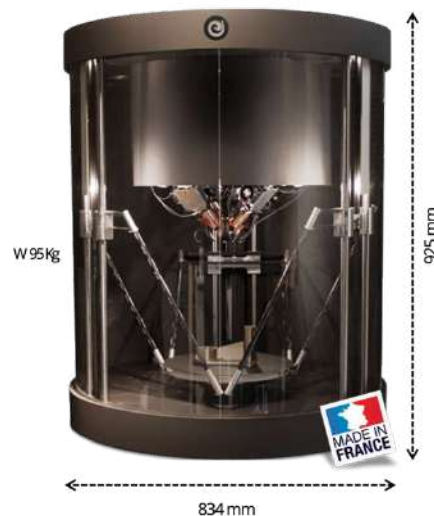


Figure 3 - Imprimante 3D Pam Series MC, Pollen AM.

Les imprimantes 3D Pam sont équipées de 2 à 4 extrudeuses autonomes et indépendantes. Une extrudeuse est composée d'une trémie (ou cartouche matière, contenant les granulés), d'un fourreau avec une vis sans fin, d'une buse d'extrusion, d'éléments chauffants et de capteurs de température (figure 4).

Grâce au mouvement rotatif de la vis sans fin, les granulés sont convoyés dans l'extrudeuse où ils sont fondus et comprimés. Avant d'être déposé sur le plateau de fabrication, le matériau passe par la buse d'extrusion et est extrudé par une nozzle de diamètre spécifique permettant de définir la taille des joncs qui constitueront les couches de la pièce imprimée. Les mouvements de la buse

d'extrusion par rapport au plateau de fabrication sont automatiquement déterminés par le système, ce qui permet de créer la pièce en 3D.

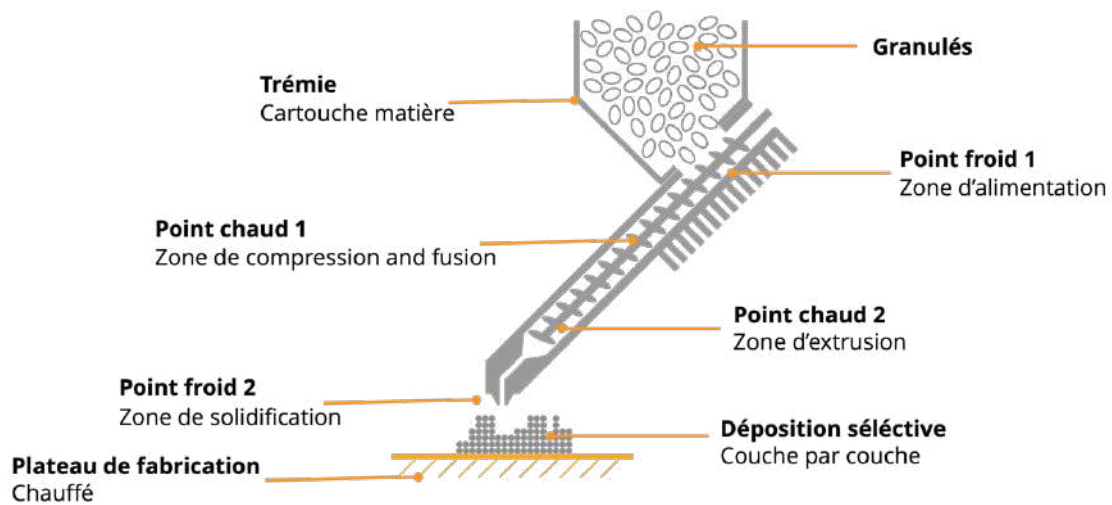


Figure 4 - Système de fusion et de dépôt par extrusion de l'imprimante 3D Pam.

### Tester le processus de production

Pour évaluer la technologie PAM, une procédure de production a été réalisée sur deux pièces qui sont présentées dans la figure 5. La valve présente des détails géométriques liés à son couplage mécanique et à sa fonctionnalité, et présente des dimensions extérieures de 38 x 8 mm. L'insert présente une géométrie d'engrenage et un filetage interne, et a des dimensions extérieures de 30 x 20 mm. Les détails géométriques présents dans les pièces représentent un défi pour tester la technologie.

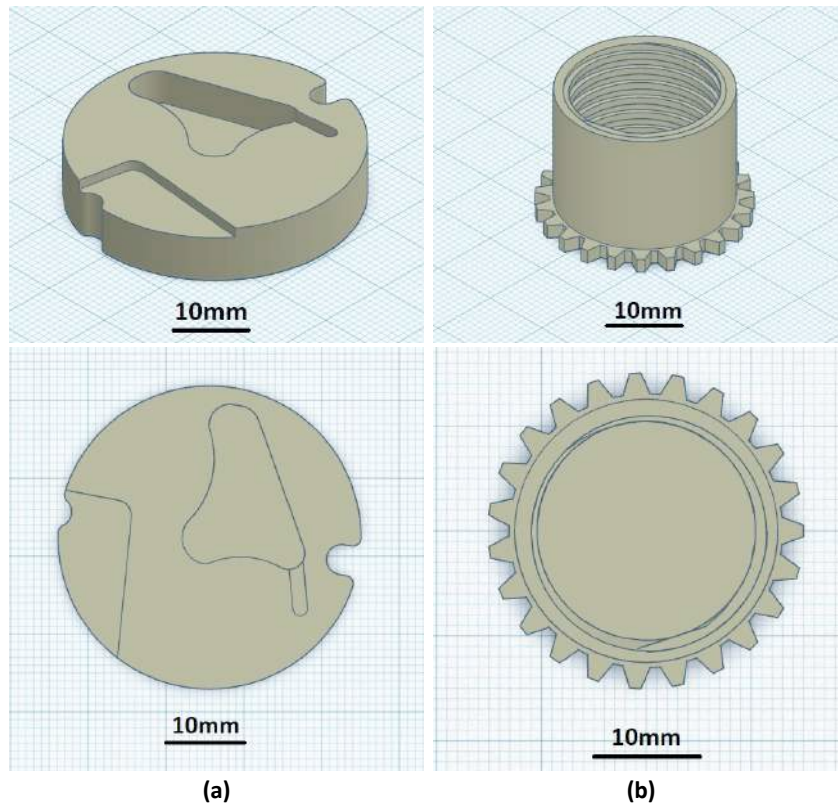


Figure 5 - Modèles 3D des pièces produites - (a) valve et (b) insert denté.

Des granulés issus du moulage par injection de céramique (CIM) ont été utilisés comme matière première, avec la référence Inmafeed K1008 d'Inmatec GmbH [4] ; il s'agit d'alumine avec une pureté de 96%. L'imprimante Pam Series MC de Pollen AM a été utilisée, avec les conditions d'impression présentées dans le tableau 1, concernant le module d'extrusion. Le diamètre du nozzle d'extrusion était de 0,4 mm. La plateforme de construction a été chauffée à 75 °C, sur laquelle un adhésif d'impression 3D a été placé pour assurer une bonne adhésion de la première couche de construction.

La figure 6 montre les pièces obtenues lors du processus d'impression, où l'on peut observer une bonne reproduction de la forme et des détails géométriques des deux pièces. La qualité de surface observée, qui se traduit par la mise en évidence des couches de construction (sur les faces latérales) et des joncs déposés (sur les faces supérieures) est une caractéristique du procédé. Cette rugosité du processus peut être ajustée en faisant varier les paramètres de production, par exemple le diamètre du nozzle d'extrusion et la hauteur de la couche. En revanche, les ajustements de ces paramètres ont un impact sur la vitesse d'impression. Une meilleure qualité d'impression (résolution) est obtenue au détriment du temps d'impression.

Tableau 1 - Paramètres d'impression.

<b>Températures</b>	
Zone d'alimentation	43 °C
Zone de compression et de fusion	130 °C
Zone d'extrusion	188 °C



Plateau de fabrication	75 °C
<b>Hauteur de couche</b>	0,15 mm
<b>Vitesse d'impression</b>	20 mm/s

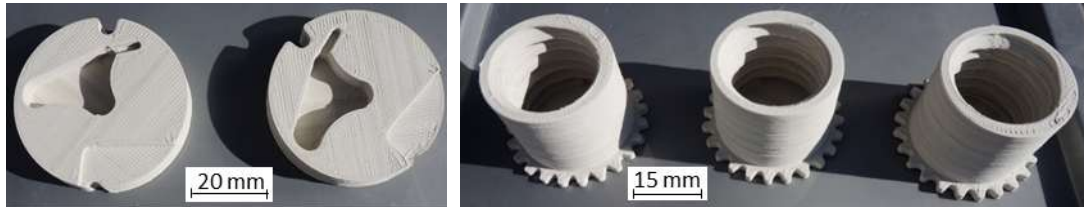


Figure 6 - Pièces imprimées (pièces vertes).

Ces pièces vertes ont été soumises au processus de déliantage pour l'élimination du thermoplastique. Dans le cas de la matière première utilisée, ce processus est subdivisé en deux étapes : la première étape consiste en un déliantage aqueux - les pièces sont immergées dans un bain d'eau avec une agitation et une température contrôlées ; dans la deuxième étape - déliantage thermique - les pièces sont placées dans un four, suivant un cycle de chauffage prédéfini (Figure 7). Dans la première étape, une partie du liant thermoplastique est éliminée, créant un réseau de canaux à porosité ouverte, qui facilite la dégradation thermique du thermoplastique restant dans la deuxième étape. L'objectif de ce processus en deux étapes est d'obtenir des pièces exemptes de défauts (par exemple, gauchissement, fissures, cloques, etc.), en particulier dans les pièces à paroi épaisse. Une fois le processus de déliaison terminé, on obtient les "morceaux bruns". On a estimé que la perte de plastique après le déliantage aqueux pendant 24 heures était de 48% du plastique présent dans la pièce, alors qu'elle était de 25% dans les valves. Cette différence s'explique par la plus grande épaisseur de paroi de la deuxième pièce, de 8 mm, par rapport à la première, de 2 mm. Les pièces obtenues ont conservé leurs détails géométriques sans aucun défaut, comme le montre la figure 8.

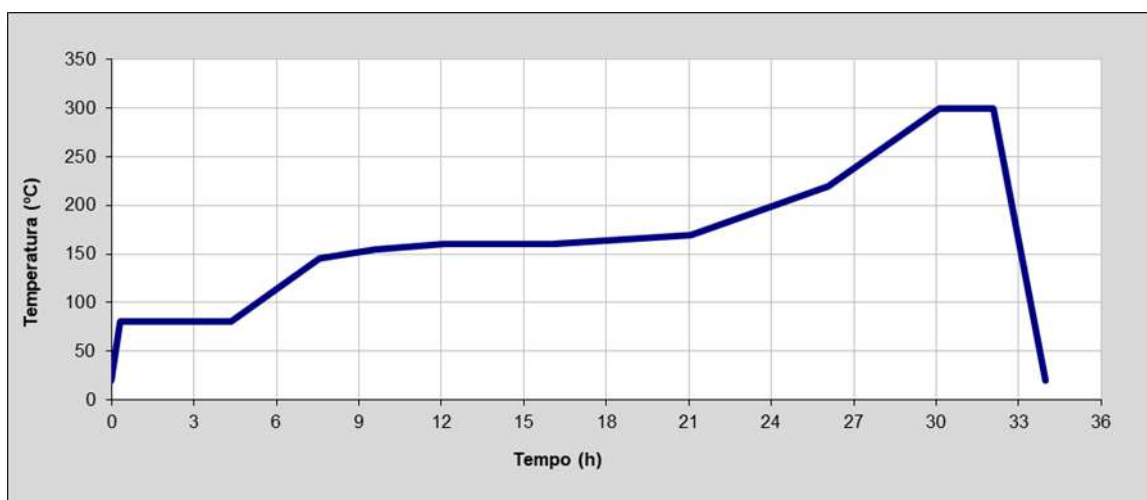


Figure 7 - Cycle de déliantage thermique.



(a)

(b)

Figure 8 - Pièces après les deux étapes de déliantage : (a) 1ère étape par déliantage aqueux ; (b) 2ème étape par déliantage thermique.

Ensuite, les pièces ont été frittées à 1620 °C pendant 1 heure, en utilisant le cycle thermique présenté dans la Figure 9. Les pièces obtenues présentaient une bonne conservation de la forme, aucune déformation, et aucun défaut structural (Figure 10). Une évaluation des caractéristiques des pièces a été réalisée sur la base du retrait des pièces et de la densité, et comparée aux spécifications du fournisseur de la matière première (Tableau 2). Pour calculer le retrait des pièces, les dimensions à vert et frittées ont été mesurées.

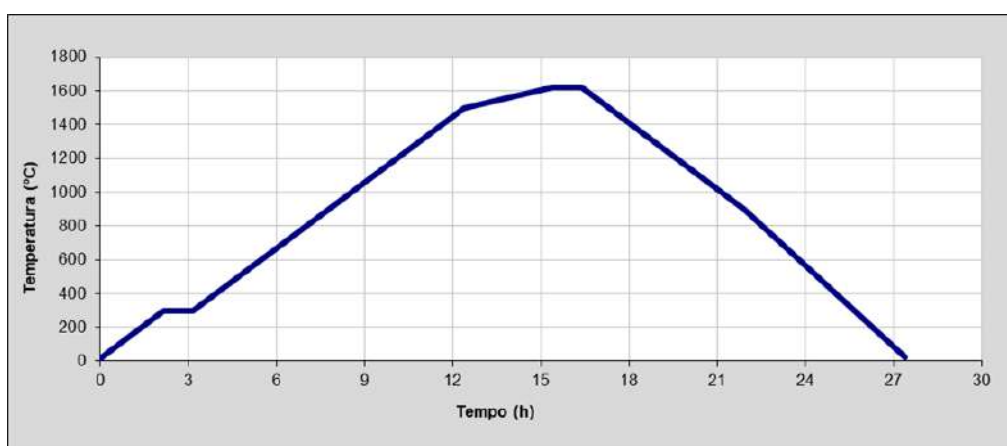


Figure 9 – Cycle de frittage.

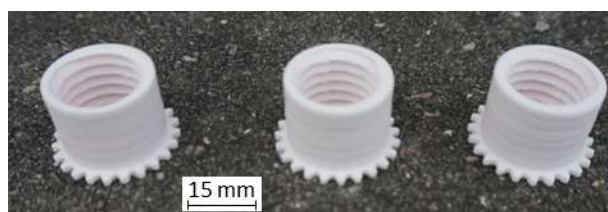
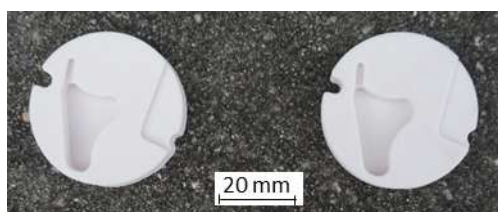






Figure 10 – Pièces frittées.

Tableau 2 – Caractérisation des pièces après frittage.

	Retrait linéaire général (%)	Densité apparente (g/cm <sup>3</sup> )*	Densité brute (g/cm <sup>3</sup> )*
Valve	14,8	3,80	3,68
Insert denté	15,7	3,80	3,63
Fournisseur de matière première [4]	15,5	~3,8	-

\* Norme ISO 18754

On constate qu'en général, les pièces obtenues ont atteint les spécifications du fournisseur de matière première, tant en retrait qu'en densité apparente. Une valeur légèrement inférieure de la densité apparente est observée, ce qui indique normalement la présence d'une porosité ouverte d'environ 4%. Cependant, on pense qu'il peut y avoir un effet de la rugosité résultant des couches d'impression et des filaments, hypothèse qui devrait être étudiée.

## Conclusion

La technologie PAM, pour la fabrication additive de pièces en céramique, a été testée sur deux pièces techniques en alumine. Le procédé utilise une matière première et certaines étapes du processus communes à une technologie de production existante. Ainsi, il existe déjà une chaîne de production qui facilite l'adoption de cette nouvelle technologie de formage.

Lors de l'essai réalisé, des pièces présentant une bonne reproductibilité de forme ont été obtenues, sans défauts structurels et avec un degré de densification conforme aux attentes. Elle est donc considérée comme une technologie ayant le potentiel d'être appliquée dans le segment des céramiques techniques. En tant que technologie de fabrication additive, elle est indiquée pour la production de pièces en petites séries, avec des géométries fonctionnelles et complexes et de petites dimensions. Il est également possible de reproduire des formes qui ne peuvent être obtenues avec d'autres technologies, comme dans l'exemple de la figure 11.

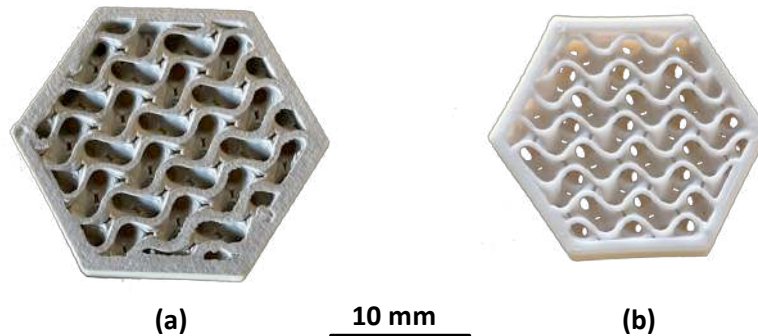


Figure 11 – Pièces en céramique avec géométrie gyroïde - (a) pièce verte, (b) pièce frittée.

### Bibliographie

- [1] Ngo, T.; Kashania, A.; Imbalzano, G.; Nguyen, K.; Hui, D., *Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges*. Composites Part B, 143, 172–196, 2018.
- [2] Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B.; Khorasani, M., *Additive Manufacturing Technologies*, Third Edition, Springer, 2021.
- [3] Lakhdar, Y.; Tuck, C.; Binner, J.; Terry, A.; Goodridge, R., *Additive manufacturing of advanced ceramic materials*. Progress in Materials Science 116, 1–50, 2021.
- [4] <http://www.inmatec-gmbh.com/cms/images/download/2020/INMAFEED%20K1008%20Techn.%20Datasheet.pdf>