

Estimation expérimentale et numérique de la porosité dans les pièces obtenues par le procédé FDM

OTHMANI Mourad¹,

ZARBANE Khalid²,

CHOUAF Abdelkarim¹,

¹ ENSEM de Casablanca, LCCMMS, Maroc,

² EST de Casablanca, LMPGI, Maroc,

othmani.mourad@gmail.com

a.chouaf.ensem@gmail.com

khalidzarbane@yahoo.fr

2

Résumé :

La FDM (Fused Deposition Modeling) est une technique de fabrication additive qui permet de réaliser des pièces par la juxtaposition de plusieurs couches formées par le dépôt d'un filament fondu. La structure interne et le comportement des pièces obtenues sont fortement influencés par le choix des paramètres de fabrication. De nombreuses études expérimentales ont été menées pour déterminer la bonne combinaison des paramètres permettant d'avoir un meilleur remplissage. Compte tenu de la multitude des paramètres impliqués dans ce type de procédé et du coût, le nombre de paramètres considérés dans ces études reste limité. Pour ce faire, nous avons mis en place une démarche numérique capable de simuler le procédé de fabrication FDM des pièces. Grâce à notre démarche, nous sommes capables de prédire le taux de remplissage des pièces virtuelles obtenues en considérant le maximum possible de paramètres.

Pour la validation expérimentale des résultats de notre simulation numérique, des éprouvettes en ABS (Acrylonitrile Butadiène Styrène) sont réalisées par le procédé FDM en appliquant les mêmes paramètres utilisés lors de la simulation. Les éprouvettes réelles obtenues et leurs sections sont ensuite visualisées via un microscope électronique. Les résultats expérimentaux sont confrontés à ceux issus de notre simulation numérique. Cette démarche numérique a finalement permis de déterminer la bonne combinaison des paramètres de fabrication FDM pouvant produire des pièces avec un bon taux de remplissage.

1. Introduction

Pour les spécialistes, la fabrication additive compte déjà plusieurs décennies d'existence, notamment en prototypage. Elle n'est apparue aux yeux des dirigeants et du grand public que récemment avec l'arrivée sur le marché d'imprimantes de bureau qui ont pu contribuer à faire croire en l'avènement d'une ère de science-fiction où chacun pourrait quasiment imprimer sa voiture dans son garage.

Parmi les techniques de la fabrication additive, nous citons la FDM ou le dépôt de filament fondu. C'est une technique de fabrication additive qui consiste à fabriquer des pièces couche après couche [1]. Cette technique a été développée par S.Scott Crump dans les années 80, et commercialisée par la société Stratasys en 1990. La technique FDM est appliquée aussi bien au prototypage rapide qu'à la production directe de pièces ; elle nous a permis de créer des pièces complexes irréalisables par les procédés de fabrication conventionnels [2]. Le gros intérêt du FDM est de permettre de créer des pièces en bonne matière, disposant de caractéristiques mécaniques, thermiques et d'une stabilité voisines de celles des pièces thermoplastiques injectées. Elle permet également de régler la densité des pièces en ne remplissant que partiellement les volumes créant ainsi un réseau de type « nid d'abeille » [3]. Cette technologie FDM a finalement montré un grand potentiel dans la fabrication de moule, dans la conception du dispositif biomédical, dans l'ingénierie tissulaire et d'autres domaines industriels. Cependant, la FDM a des limites comme la non-maitrise de la rugosité ou la résistance mécanique des pièces à produire. Ces limites sont en grande partie dues à l'ensemble des paramètres de la fabrication FDM qui sont les paramètres principaux de réglage de l'imprimante 3D. Parmi ces paramètres nous pouvons citer : l'épaisseur de la couche, l'étendue de l'écart, la largeur de trame, l'angle de trame, la vitesse de déposition et la température de l'extrusion.

En vue d'améliorer le taux de remplissage des pièces obtenues par un tel procédé, il semble nécessaire de maîtriser le processus et particulièrement les paramètres mis en jeu. Comme ces paramètres sont relativement nombreux, il est difficile de tester toutes les combinaisons possibles pour aboutir à celle qui offre le meilleur comportement de la pièce obtenue. En plus, il est quasi impossible de modéliser manuellement sur un logiciel CAO (Conception Assistée par Ordinateur) une pièce réalisée par la fabrication additive. Pour ce faire, nous avons élaboré sur SolidWorks une simulation [4,5] de ce mode de fabrication connu sous le nom de FDM pour avoir la trajectoire parcourue par la buse sous forme de courbe, puis nous avons attribué à cette trajectoire une section [6,7] afin d'avoir une pièce géométrique.

Dans le paragraphe qui suit, nous allons décrire la démarche expérimentale et la méthode de création de la pièce virtuelle en CAO.

2. Démarches expérimentale et numérique du procédé FDM

1. Étude et choix des paramètres de réalisation

Dans notre étude, nous nous sommes basés sur deux paramètres de fabrication qui représentent les dimensions nominales de la section du filament déposé : l'épaisseur de la couche (hauteur de la section) et la largeur de la trame (largeur de la section). Ces deux dimensions sont influencées principalement par des paramètres de fabrication qui sont la température de l'extrusion et la vitesse de déplacement de la buse.

Avant de fabriquer ou de modéliser la pièce FDM, nous avons besoin de créer un fichier G-code, cette opération (figure 1) consiste en la création de la maquette tridimensionnelle de la pièce avec une géométrie continue grâce à un logiciel de CAO. Le fichier obtenu est ensuite enregistré sous format STL. Ce dernier est importé dans le logiciel « Slicer » qui va découper la géométrie continue de la pièce en plusieurs couches suivant les paramètres de fabrication choisis (épaisseur de la couche (figure 2), étendue de l'écart, largeur et angle de trame (figure 3),...). Enfin, un fichier qui contient les codes de la machine (fichier G-code) est généré.

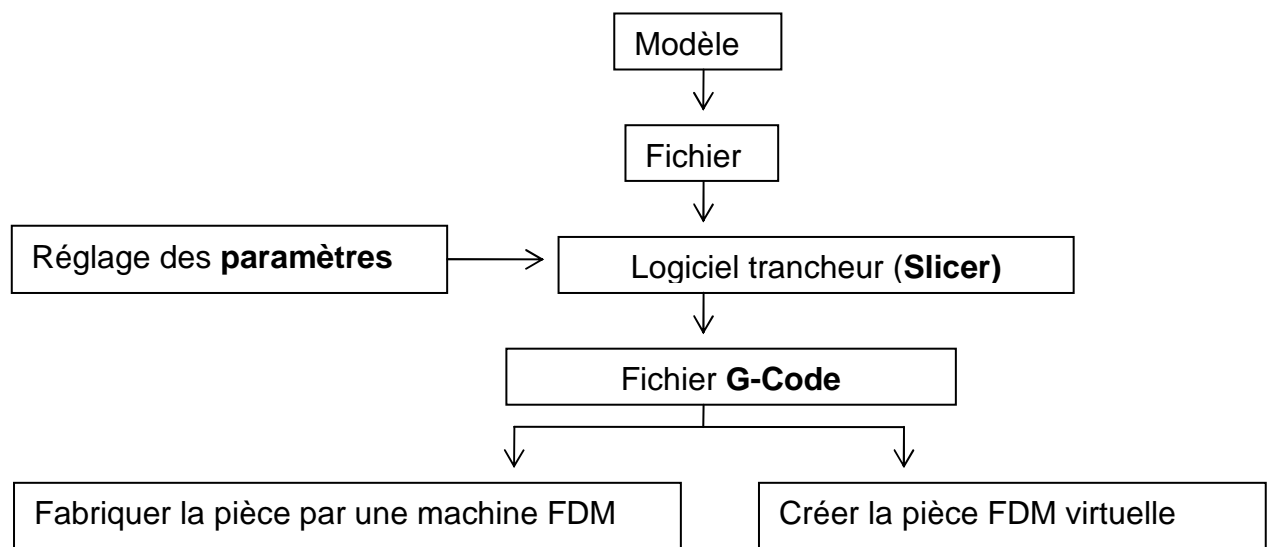


Figure 1. Création du fichier G-code

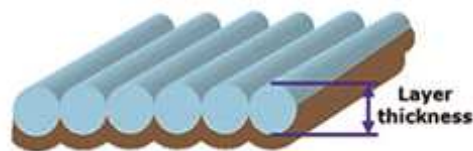


Figure 2. Épaisseur de la couche

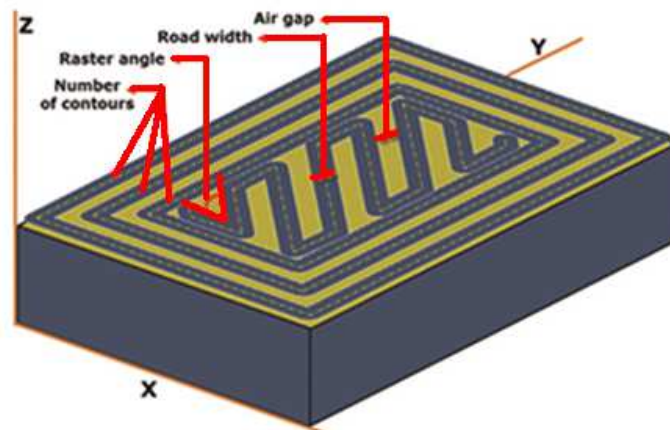


Figure 3. Largeur et angle de la trame

Pour mesurer l'influence de la température de l'extrusion et la vitesse de déplacement de la buse sur les dimensions de la section, nous avons réalisé un plan d'expérience. Les variables à mesurer sont continues, donc nous avons fait appel au plan pour surface de réponse (les plans composites à faces centrées) pour obtenir un modèle mathématique (du second degré). Pour ce faire, nous avons choisi deux facteurs (température de l'extrusion et la vitesse de déplacement de la buse) avec 2 niveaux maximaux pour chaque facteur: 225 et 255 pour la température, 15 et 80 pour la vitesse. Pour les dimensions nominales, nous avons pris 0,3 mm pour l'épaisseur de la couche, et 0,6 mm pour la largeur de la trame. Selon ce plan, 13 pièces parallélépipèdes sont fabriquées avec un taux de remplissage de 0 %. Ceci a donné la forme de la paroi mince (figure 4) dont la hauteur est de 4,8 mm et la largeur est de 20 mm. A l'aide d'un pied à coulisse de 1/50, nous avons mesuré directement l'épaisseur de la paroi pour avoir la largeur de la section. Quant à la hauteur de la section, nous avons dû mesurer et divisée la hauteur totale de la paroi sur le nombre des couches (16 couches).

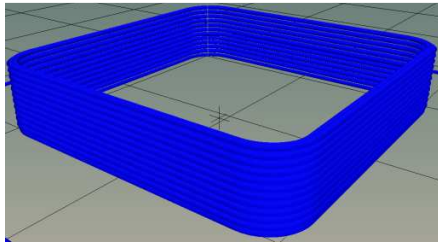


Figure 4. Pièce sous forme d'une paroi mince

2. Réalisation expérimentale

Pour la fabrication d'une pièce, le fichier G-code créé précédemment est envoyé à l'imprimante 3D. Le procédé de fabrication commence par l'extrudage à travers une buse se déplaçant sur 3 axes, x, y et z d'un filament thermoplastique semi-liquide de l'ordre de 1,75 mm de diamètre sur une plateforme [8]. Quand la première couche est déposée, la plateforme de la machine descend d'un niveau pour appliquer une nouvelle couche. Le processus se répète jusqu'à l'impression totale de la pièce.

Une coupe transversale (section) de la pièce obtenue a été réalisée. Une photographie de cette section à l'aide d'un microscope électronique a été effectuée pour déterminer la forme et les dimensions du filament fondu. Selon nos observations, la section du filament est sous forme oblongue ; une forme géométrique bidimensionnelle simple (figure 5). Une section théorique est adoptée pour se rapprocher de la section réelle. Désormais, cette section sera nommée : la section FDM.

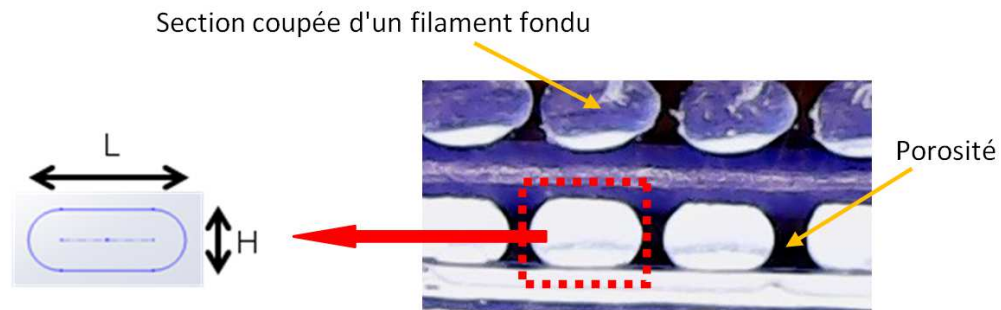


Figure 5. Image microscopique de la section du filament fondu,
H : hauteur de la section, L : largeur de la section

3. Modélisation de la pièce FDM

Grâce au fichier G-code, nous avons pu obtenir un nuage de points qui présente la trajectoire de la buse extrudeuse. Ces points sont ensuite connectés par des segments de droite des lignes auxquels est affectée une section qui modélise la section du filament déposé (figure 6). Pour générer une couche, nous avons utilisé la fonction « Bossage balayé » pour généraliser (balayer) cette section sur toutes les lignes. Cette opération est répétée jusqu'à l'obtention de la maquette virtuelle tridimensionnelle de la pièce FDM (figure 7).

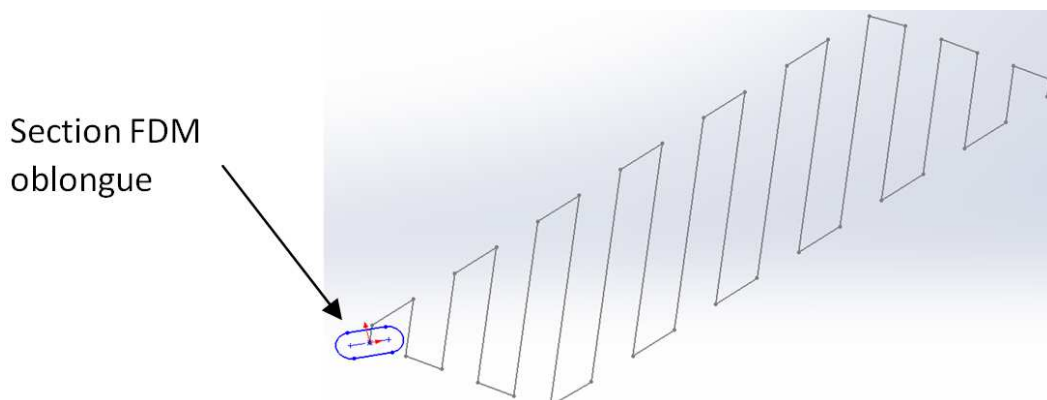


Figure 6. Affectation de la section du filament fondu déposé suivant une trajectoire pour la création d'une couche par extrusion

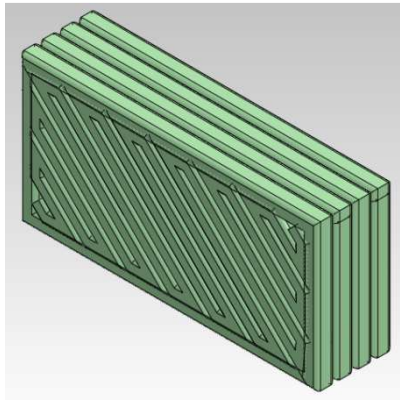


Figure 7. Maquette virtuelle de la pièce FDM

3. Détermination de la hauteur et de la largeur de la section

Plusieurs éprouvettes ont été fabriquées selon plusieurs combinaisons de facteurs. Nous avons ensuite mesuré à l'aide du pied à coulisse et comparé la hauteur et la largeur de leur section aux valeurs nominales pour chaque combinaison de facteurs (Tableau 1). Les largeurs et les hauteurs relevées sont représentées sous forme de courbes sur la figure 8. Pour les combinaisons qui se répètent, nous avons calculé la moyenne pour la largeur et la longueur. Nous observons que l'écart entre les hauteurs de la section est négligeable comparé à celui entre les largeurs de la section. Par conséquent, le modèle mathématique que nous avons retenu représente uniquement la variation de largeur de la section tandis que pour la hauteur de la section nous avons pris une hauteur constante par défaut égale à l'épaisseur de la couche.

Le modèle mathématique (1) obtenu qui donne la valeur des écarts en fonction de la température et de la vitesse est le suivant :

$$\text{Écart} = 1,671 - 0,01260 T + 0,001293 V + 0,0000216 T^2 - 0,0000429 V^2 + 0,0000204 T * V \quad (1)$$

Avec:

T; température de l'extrusion.

V; vitesse de déplacement de la buse.

Écart = Largeur nominale - Largeur mesurée

Tableau 1. Caractéristiques géométriques et les écarts relevés entre la largeur nominale et celle mesurée de la section obtenue par FDM

Température T (°C)	Vitesse V (mm/s)	Hauteur mesurée H (mm)	Largeur mesurée L (mm)	Largeur nominale Ln (mm)	Écart (mm)
225	47,5	0,3	0,5	0,6	0,1
240	47,5	0,30375	0,52	0,6	0,08
255	15	0,3	0,66	0,6	-0,06
255	47,5	0,3	0,54	0,6	0,06
225	15	0,3	0,6	0,6	0
240	47,5	0,3025	0,52	0,6	0,1
240	47,5	0,30375	0,52	0,6	0,1
225	80	0,2875	0,48	0,6	0,12
255	80	0,2875	0,5	0,6	0,1
240	80	0,29375	0,5	0,6	0,1
240	47,5	0,3	0,52	0,6	0,1
240	47,5	0,30125	0,52	0,6	0,1
240	15	0,3	0,64	0,6	-0,04

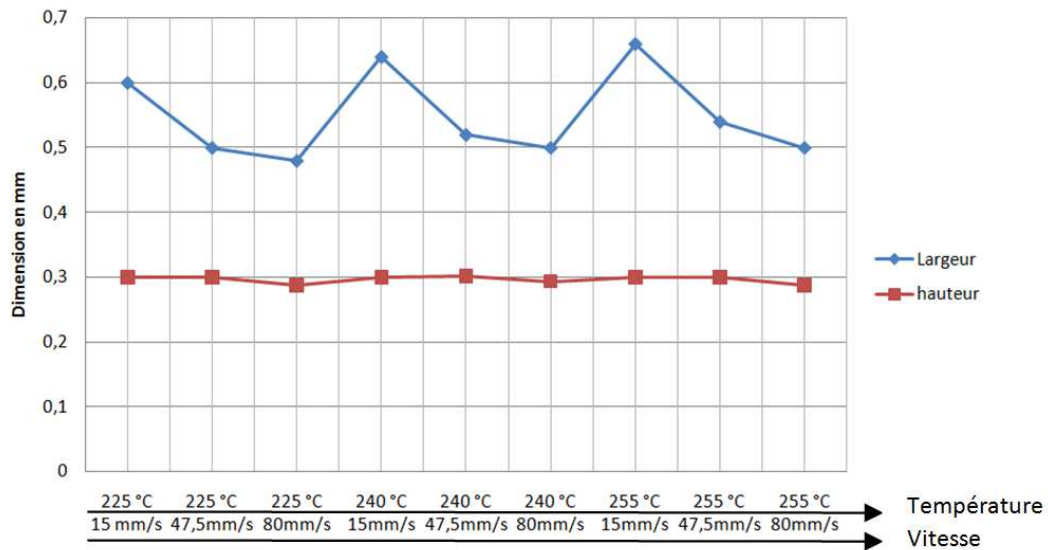


Figure 8 : Variation de Largeur-Hauteur des couches suivant la vitesse et la température

Le modèle mathématique de l'écart nous permet d'ajuster la section virtuelle pour qu'elle soit proche de la section réelle.

4. Calcul de la porosité

Nous rappelons que la porosité est caractérisée par le quotient de la somme des volumes des pores sur le volume total de la pièce. Nous pouvons donc déterminer en pourcent, la valeur de la porosité "P" en utilisant la formule suivante [9,10]:

$$P = \left(1 - \frac{V_r}{V_t}\right) * 100 \quad (2)$$

Avec:

V_r ; volume réel de la pièce.

V_t ; volume total apparent (sans porosité).

La pièce que nous avons prise comme exemple de calcul est un parallélépipède de longueur 75 mm, de largeur 12,5mm et de hauteur 2mm. Cette pièce a été réalisée avec un angle de la trame constant dans toutes les couches.

Dans notre calcul, nous avons négligé l'effet de l'angle de la trame, car il a peu d'influence sur le résultat final [9]. Nous avons aussi considéré que la section FDM est constante dans toutes les couches. Par conséquent, pour notre pièce qui est construite avec le même angle de la trame dans chaque couche, nous pouvons calculer la porosité dans une seule couche en considérant la surface au lieu du volume. La relation à travers laquelle nous calculons la porosité est donnée par :

$$P = \left(1 - \frac{S_r}{S_t}\right) * 100 \quad (3)$$

Avec:

S_r ; surface réelle de la section transversale d'une seule couche de la pièce,

S_t ; surface totale apparente de la section transversale d'une seule couche de la pièce (sans porosité).

Comme S_r est la somme de toutes les sections FDM transversales dans une couche, elle se détermine par :

$$S_r = N \left[H (L - H) + H^2 \left(\frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (4)$$

Avec:

H; épaisseur de couche.

L; largeur de la trame réelle mesurée.

N; nombre de section FDM.

En fin, S_t est calculée par la formule suivante:

$$S_t = L_p * H \quad (5)$$

Avec:

H ; épaisseur de couche.

L_p ; largeur de la pièce.

Finalement, en considérant l'équation (1), nous pouvons déterminer la surface modélisée, à partir de l'équation suivante :

$$S_r = N [H (L - 1,671 + 0,01260 T - 0,001293 V - 0,0000216 T^2 + 0,0000429 V^2 - 0,0000204 T * V - H) + H^2 \left(\frac{\pi}{4}\right)] \quad (6)$$

Avec:

H ; épaisseur de couche.

L ; largeur nominale.

Pour notre étude comparative de la porosité entre une pièce réelle (figure 9.b) et une pièce virtuelle (modélisée) (figure 9.a), nous avons considéré par la réalisation une température de l'extrusion de 230°C, et une vitesse de 30mm/min.

Les résultats de nos calculs de la porosité sont regroupés dans le tableau 2.

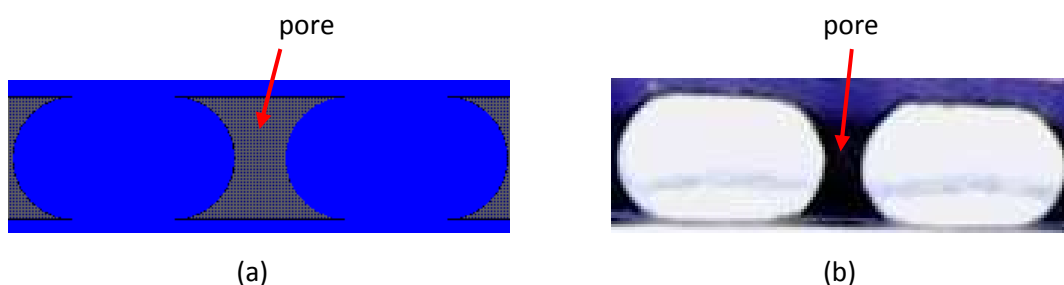


Figure 9. Porosité dans la pièce : (a) virtuelle, (b) réelle

Tableau 2. Calcule de la porosité.

Paramètre géométrique	Pièce réelle	Pièce modélisée
H (mm)	0,3	0,3
L (mm)	0,534	0,525
N	19	19
S_r (mm²)	2,67615	2,62485
S_t (mm²)	3,744	3,750
P (%)	28,52	30,00

Selon ce tableau 2, les résultats que nous avons obtenus montrent que l'écart entre la porosité réelle et la porosité modélisée est très faible; cet écart est de l'ordre de 1,48 %. Il en résulte que premièrement notre modélisation du procédé de fabrication FDM génère une structure de la pièce comparable à celle d'une pièce obtenue réellement par impression 3D. Deuxièmement, en choisissant judicieusement avec un plan d'expérience les facteurs d'impression, nous pourrions maîtriser le taux de remplissage et par la suite la porosité.

5. Conclusion

Dans cet article, nous avons simulé la réalisation d'une pièce obtenue par le procédé de la fabrication additive (FDM). La bonne maîtrise de la technique FDM s'est avérée capable de nous générer le taux désiré de la porosité.

Les résultats de notre étude nous montrent que la porosité dépend du choix de certains paramètres de la fabrication et de la démarche de modélisation numérique, ainsi de la précision du plan d'expérience et de la mesure microscopique. Pour notre cas, l'écart que nous avons trouvé entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux est acceptable. Avec cette validation, le développement de la modélisation numérique nous permettra donc de prédire le taux de la porosité avec sa distribution dans la pièce, ce qui présente un atout dans le domaine industriel.

Ces résultats sont très encourageants à plusieurs niveaux. Nous pourrions, par exemple, faire varier un certain nombre de paramètres d'impression afin d'obtenir une structure présentant de meilleures performances mécaniques en minimisant le taux de la porosité. Nous pourrions également tester différentes trajectoires en vue d'obtenir un meilleur remplissage.

6. Bibliographie

- [1] OBATON Anne-Françoise, BERNARD Alain, TAILLANDIER Georges, MOSCHETTA Jean-Marc. *Fabrication additive: état de l'art et besoins métrologiques*, Revue française de métrologie, 2015, vol. 37, pp. 133.
- [2] MORVAN S, HOCHSMANN R, SAKAMOTO M. *ProMetal RCT (TM) process for fabrication of complex sand molds and sand cores*. Rapid Prototyping, 2005, vol. 11, n° 2, pp. 1-7.
- [3] Cooper KG. *Rapid prototyping technology: selection and application*. Marcel Dekker Inc., New York, 2001.
- [4] OTHMANI Mourad, CHOUAF Abdelkarim, ZARBANE Khalid. 2016. *Modeling of parts obtained by the additive manufacturing process FDM type*. In 2nd International Conference on Material and Structural Mechanics, Marrakech, Morocco. 2016.
- [5] OTHMANI Mourad, CHOUAF Abdelkarim, ZARBANE Khalid. *Numerical simulation of additive manufacturing process for FDM type*. International Conference of Innovative Materials & Their Applications, Oujda, Morocco. 2016.
- [6] JIN Yuan, HE Yong, SHIH Albert. *Process Planning for the Fuse Deposition Modeling of Ankle-Foot-Othoses*, Procedia CIRP. vol. 42, pp 760-765, 2016.
- [7] TAUFIK Mohammad, JAIN Prashant K.. *A study of build edge profile for prediction of surface roughness in fused deposition modeling*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2016, vol. 138, n° 6, pp. 061002-061002.
- [8] KOLAREVIC Branko. *Digital fabrication: manufacturing architecture in the information age*. Proceedings of the 21st Annual Conference of the Association for Computer-Aided Design in Architecture, Buffalo, New York. pp 268-278. 2001.
- [9] MASOOD S. H., SINGH J. P., MORSI Y. *The design and manufacturing of porous scaffolds for tissue engineering using rapid prototyping*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, vol. 27, n° 3-4, pp. 415-420.
- [10] CHIN ANG Ker, FAI LEONG Kah, KAI CHUA Chee, et al. *Investigation of the mechanical properties and porosity relationships in fused deposition modelling-fabricated porous structures*. Rapid Prototyping Journal, 2006, vol. 12, n° 2, pp. 100-105.