

# Etude du comportement mécanique d'une structure poreuse obtenue par impression 3D au sable

H. RAMEZANI DANA<sup>a</sup>, M. ELMANSORI<sup>a</sup>

a. Laboratoire MSMP-EA 7351, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers ParisTech, 2cours des arts et métiers, 13617 Aix-en-Provence, France

## Résumé :

*La présente étude porte sur le procédé d'impression 3D au sable habituellement utilisé pour la création de pièces et moules dans l'industrie de la fonderie. L'utilisation des pièces obtenues par ce procédé en tant que pièces fonctionnelles est relativement peu répandue en raison de variabilité de leurs propriétés mécaniques. De plus, en raison de la nature poreuse des structures imprimées, les résultats expérimentaux sont dispersés et assez difficiles à reproduire. Le but de cette étude est de caractériser l'impact de différents paramètres du processus d'impression 3D au sable sur les performances des pièces fabriquées. A cette fin, un dispositif spécifique a été réalisé pour accéder aux caractéristiques mécaniques. Les effets de différents paramètres tels que l'orientation de l'impression et la direction de construction sur les propriétés de compression des éprouvettes imprimées ont été soigneusement étudiés. Des analyses microstructurales ont été effectuées pour mieux comprendre la relation entre le procédé de fabrication et les propriétés mécaniques finales. Les résultats obtenus montrent que la technique proposée améliore considérablement la reproductibilité des résultats.*

## Abstract :

*The present study relates to 3D Sand Print (3DSP) process conventionally employed for the creation of molds and cores in casting industry. The utilization of the 3DSP components as functional parts is quiet minimal due to the uncertainty on their mechanical property. Moreover, because of the porous nature of the printed structures, the experimental results are dispersed and rather difficult to reproduce. The aim of this study is to characterize the impact of different parameters of the 3DSP process on the performance of manufactured parts. For this purpose, a particular device was realized to access mechanical characteristics. Effects of process parameters such as printing orientation, building direction on the compressive properties of printed specimens have been carefully studied. Microstructural analyses were performed to better understand the relationship between the manufacturing process and the final mechanical properties. The obtained results show that the proposed technique significantly improve the reproducibility of the results.*

**Mots clefs: 3D Sand print process, Mechanical characterization, Compression test, Microstructural, Printing parameter.**

## 1 Introduction

Les technologies de fabrication additive sont couramment employées en raison des avantages qu'elles présentent, notamment en matière de complexité géométrique des pièces produites [1]. A l'origine, ce type de procédé était utilisé pour du prototypage rapide qui permettait de réduire considérablement les

investissements dans des procédés de fabrication postérieurs. Au fur et à mesure que la précision des pièces obtenues par ce type de procédé s'est améliorée, leur domaine d'application s'est élargi, passant du prototypage rapide à la fabrication rapide en tant que telle [2]. Certaines études [3] confirment l'utilisation de cette technique pour la réalisation des pièces finales. Aujourd'hui, il existe une grande variété de techniques de fabrication additive. Le choix d'une technique nécessite une bonne compréhension des problématiques multi physiques afférentes à chacune d'entre elles.

Parmi les techniques existantes, nous pouvons citer la stéréolithographie (SLA) [4], le frittage laser sélectif (sls) [5] et le dépôt de matière fondue [6]. Récemment, une nouvelle technique d'impression 3D au sable a été proposée pour produire des pièces et des ensembles de moules complets destinés aux applications de fonderie. La technique d'impression 3D au sable est considérée comme un procédé de moulage rentable [7] et qui permet de travailler avec une grande variété des matériaux. Ce procédé est basé sur la technologie d'impression à jet d'encre [8] et a été utilisé pour la production de structures métalliques et céramiques. Ce procédé est similaire aux autres techniques à base de poudre et utilise une tête d'impression à jet d'encre pour pulvériser le liant sur la zone de construction. Récemment, la société ExOne™ a développé ce système pour réaliser des moules en sable en appliquant la technologie de projection de liant. La technique d'impression 3D au sable ExOne est de plus en plus utilisée car elle permet de réduire considérablement les délais de conception de moule à partir d'un modèle numérique (CAO) dans un mode couche par couche et permet de réaliser des pièces de géométries complexes. Les caractéristiques mécaniques des pièces obtenues par impression 3D au sable ExOne sont méconnues en raison des multiples paramètres du procédé qui peuvent en affecter leurs propriétés [9]. En plus, du fait de la nature poreuse des structures imprimées, les résultats obtenus à l'issue des essais expérimentaux présentent une très grande dispersion et sont difficilement reproductibles. Le but de cette étude est de caractériser les pièces imprimées en analysant l'impact individuel des différents paramètres du procédé d'impression 3D au sable sur les performances des produits manufacturés sous sollicitation statique. La caractérisation mécanique des éprouvettes élaborées a été réalisée au moyen d'essais de compression uniaxiale. Dans ce but, un dispositif spécifique a été réalisé pour accéder aux propriétés mécaniques. L'utilisation de ce dispositif anti-flambement lors des essais de compression nécessite des éprouvettes de dimensions spécifiques. Cependant, les éprouvettes imprimées ont été doublement entaillées afin d'initier la fissuration dans une zone prédéfinie. Cette dernière permet de focaliser la zone de rupture et d'améliorer la reproductibilité des résultats. Les caractéristiques mécaniques telles que le chargement à la rupture et le déplacement ultime sont déterminées via cette technique. Les effets des paramètres du procédé comme l'orientation d'impression et la direction de construction sur les propriétés en compression des éprouvettes imprimées ont été étudiés rigoureusement. En complément, des observations microstructurales permettent d'évaluer la porosité des pièces imprimées et d'appréhender la relation entre le procédé d'élaboration et les propriétés mécaniques finales des pièces.

## 2 Description du procédé d'impression 3D au sable ExOne

Dans cette étude, les éprouvettes ont été réalisées en utilisant la machine ExOne S-Print Furan [7]. La dimension du plateau de job box de cette appareil est  $800 \times 500 \times 400 \text{ mm}^3$ . La première étape du procédé d'impression est la préparation du mélange d'un catalyseur à base d'acide sulfonique et de 8 kg de sable de silice. Les sables imprégnés par l'acide sulfonique ont été étalés successivement sur le plateau de job box (dans le plan X-Y). Ensuite, une force de compactage est appliquée sur le lit de sable en utilisant un recoater. Il faut noter que la taille d'un grain de sable est la moitié de l'épaisseur d'une couche déposée (soit environ  $140 \mu\text{m}$ ). Dans une seconde étape, la buse de la tête d'impression injecte la résine liquide (liant à base d'alcool furfurylique) sur les sables déposés. Cette dernière

permet l'adhésion des sables via la formation de ponts entre grains de sable. En effet le dépôt de liant sur la couche de lit de sable activé par l'acide, aide à la création d'une fine couche de liant furanique sur chaque grain de sable. Les liants réticulent en surface des grains de sable pour former des ponts entre les grains. Les pièces ont été bâties dans la zone où le liant adhère les sables. Ensuite, le plateau de job box a été abaissé d'une distance égale à l'épaisseur d'une couche de sable avant de déposer à nouveau le liant sur la zone prédéfinie. Ces étapes se répètent jusqu'à l'impression de la dernière couche de la pièce. Les pièces imprimées sont durcies à température ambiante pendant cinq heures avant d'être retirées du job box.

### 3 Méthodologie expérimentale

#### 3.1 Matériaux utilisés

Les pièces fabriquées par le procédé d'impression 3D au sable ExOne, dans le cadre de notre étude, ont deux composants principaux : du sable (93 à 99 % fraction massique) et du liant (1 à 3 %). Le sable de silice est l'une des variétés de sable les plus répandues à travers le monde. Pour le procédé ExOne, les tailles de sable de silice varient entre 140 et 250  $\mu\text{m}$ . Dans notre étude, la taille moyenne des sables de silice utilisés est de 140  $\mu\text{m}$ . Le liant utilisé est la résine à furanne qui est à base d'alcool furfurylique. Par ailleurs, l'acide paratoluènesulfonique (APTS) a été utilisé en tant que catalyseur de la réaction de réticulation du liant. Ce dernier accélère le durcissement du liant entre les sables de silice afin d'améliorer la cohésion entre les particules de sable et par conséquent augmenter les propriétés mécaniques des pièces imprimées. Holtzer et Danko [10] ont montré néanmoins que la réaction de réticulation de résine à furanne par ajout de catalyseur produit de l'eau qui peut dégrader le taux de cuisson (déshydrations).

#### 3.2 Géométrie de l'éprouvette

Le nombre, la forme et les dimensions des éprouvettes fabriquées au moyen du procédé ExOne sont :

- 126 éprouvettes sous forme de barreaux de section carrée ( $75*22.4*12.1 \text{ mm}^3$ ) ont été réalisées pour les essais de compression uniaxiale,
- 18 éprouvettes sous forme de cylindre (diamètre 50 mm, hauteur 50 mm) ont été imprimées pour les essais de perméabilité au gaz,
- 18 éprouvettes sous forme de cylindre ont été préparées pour les essais de perte au feu.

Les éprouvettes ont été positionnées sur le plateau de job box comme une série de 3 lignes et 6 colonnes créant 18 cellules identiques pour réaliser des échantillons dans les direction principales (X,Y,Z) comme montré sur la figure 1.

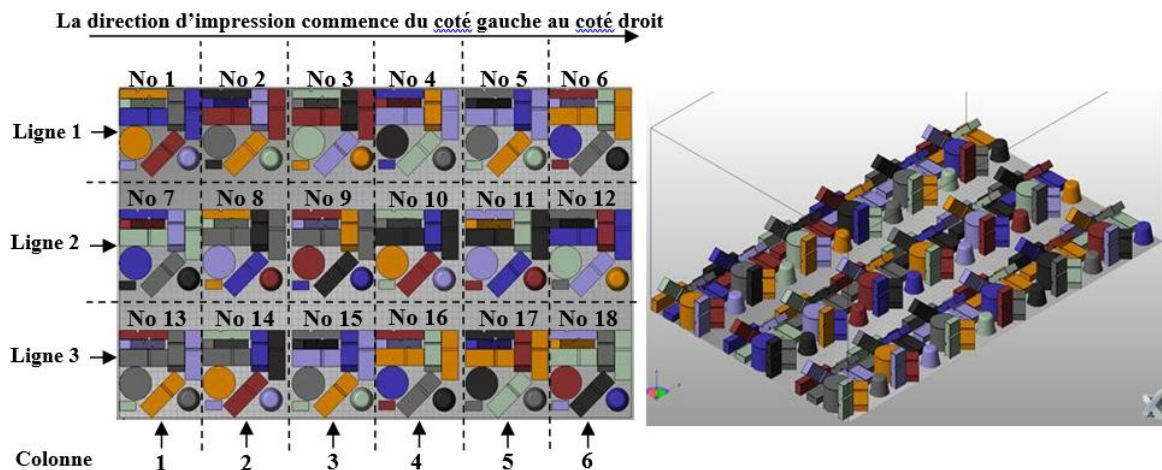


Figure 1: Positionnement des cellules des éprouvettes sur le plateau de job box

### 3.3 Paramètres d'impression

La résolution d'impression qui correspond à l'espacement entre des gouttelettes de furanne a été maintenue constante lors de la réalisation de toutes les éprouvettes. Les résolutions dans les directions X and Y sont respectivement 120  $\mu\text{m}$  and 101,6  $\mu\text{m}$ . La résolution dans la direction Z qui correspond à l'épaisseur d'une couche de sable est égale à 280  $\mu\text{m}$ . La tension de la tête d'impression qui détermine le volume de chaque gouttelette de furanne est maintenue à 78 V. La vitesse de recouvrement a été fixée à 0,182 m/s (14% de la vitesse maximale pouvant être atteinte par le recoater – Sprint ExOne) pour tous les échantillons imprimés. Il est souligné que des teneurs en liant quasi identiques étaient prouvés pour tous les échantillons imprimés. Toutes les éprouvettes ont été imprimées dans une salle à environnement contrôlé (température de  $25\pm 1$  °C et humidité relative de  $40\pm 10\%$ ).

### 3.4 Protocole expérimental

Le Néel et al. [11] ont montré que la quantité de liant dans la pièce réalisée par le procédé d'impression 3D peut modifier ses propriétés mécaniques. En effet, les pièces réalisées par ce procédé subissent l'effet de l'humidité générée par la réaction de réticulation du liant qui affecte les propriétés mécaniques des éprouvettes imprimées, notamment la résistance à la rupture en compression. Afin d'éliminer la présence d'humidité des pièces élaborées et donc de supprimer son impact sur les propriétés mécaniques, une opération ultérieure dite de vieillissement a été réalisée. Les éprouvettes ont donc été maintenues à  $25 \pm 2$  °C pendant 24 heures. Les éprouvettes ont été pesées toutes les 2 heures à cette température afin d'évaluer la perte de masse au cours du vieillissement. Par ailleurs, les dimensions des pièces imprimées ont été mesurées toutes les 6 heures afin d'examiner les modifications dimensionnelles des éprouvettes durant cette opération. Aucune variation significative ni de la masse, ni des dimensions n'a été constatée. Les essais de compression uniaxiale et de perméabilité aux gaz ont été réalisés à l'issue de cette étape.

Les essais compression ont été effectués via une machine INSTRON avec un capteur de force de capacité maximale 100 kN. Les éprouvettes ont été sollicitées à une vitesse de 0,5 mm/min et les données du capteur de force et de déplacement ont été enregistrées à une fréquence de 20 Hz. Tous les essais ont été réalisés à température ambiante et à 50% d'humidité relative.

## 4 Résultats et discussion

### 4.1 Test de perméabilité au gaz

Les analyses de perméabilité au gaz des éprouvettes imprimées ont été effectuées à l'aide d'un compteur de perméabilité à l'air numérique avec une plage de mesure de 0 à 1000 GP  $\pm$  1 GP. La méthode standard d'orifice a été appliquée conformément aux recommandations de l'AFM (American Foundry Society). La perméabilité au gaz (GP) des éprouvettes imprimées est calculée en utilisant l'équation suivante:

$$GP^1 = (Q \times h) / (S \times p \times t) \quad (2)$$

---

<sup>1</sup> Ce n'est pas la définition standard de la perméabilité aux gaz selon la loi de Darcy et ne possède donc pas l'unité SI de perméabilité aux gaz mais est utilisée dans les industries de fonderie, recommandée par American Foundry Society (AFS).

Où  $Q$  est le volume d'air dans la chambre de l'appareil ( $2000 \text{ cm}^3$ ),  $h$  est la hauteur de l'éprouvette testée ( $50 \text{ mm}$ ),  $S$  est la section transversale de l'éprouvette ( $19,63 \text{ cm}^2$ ) et  $t$  est le temps de passage pour les  $2000 \text{ cm}^3$  d'air (en minutes). Une valeur moyenne GP égale à  $98,05 \pm 9,39$  a été calculée pour les échantillons testés. La Figure 2 représente la valeur de la GP des éprouvettes imprimées en fonction de leurs positionnements sur le plateau job box (numéro de cellule). Nous pouvons constater que la GP diminue en se déplaçant de la gauche à la droite du plateau de job box. Cet effet est associé au fonctionnement de la machine et au sens de déplacement du recoater qui génère une compactation différente des sables du job box. Plus précisément, lors de la phase de compactage, les sables des nouvelles couches déposées sont tassés de la gauche vers la droite par le recoater. Les quantités de sables déplacées par le recoater sont plus importantes à droite qu'à gauche du job box. Par conséquent, la densité des sables dans ce sens augmente et la perméabilité au gaz diminue.

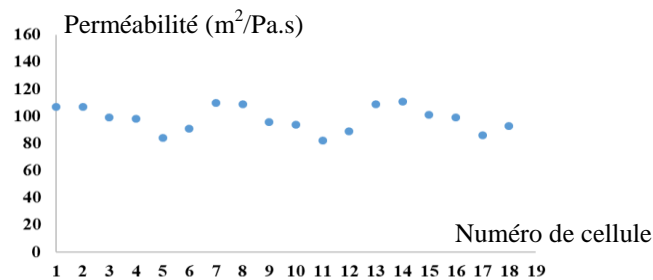


Figure 2 : Perméabilité des éprouvettes imprimées en fonction de la cellule d'éprouvette

## 4.2 Analyse perte au feu

Afin de mesurer les quantités d'humidité, de liant et d'impuretés présentes dans les pièces imprimées, nous avons utilisé l'analyse au perte au feu en utilisant un four haute température. L'éprouvette imprimée a été pesée rigoureusement puis positionnée dans un creuset et l'ensemble a été maintenu dans le four pendant 30 minutes à  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ . Après calcination, le creuset est récupéré et pesé. La masse finale perdue est calculée au moyen de l'équation suivante :

$$\text{Perte au feu} = ((\text{masse initiale} - \text{masse finale}) / \text{masse initiale}) * 100 \quad (3)$$

18 éprouvettes ont été brûlées via cette analyse. Positionnements ces 18 éprouvettes correspondants aux 18 cellules de plateau job box. Nous trouvons une perte de masse autour de  $0,73 \pm 0,03 \%$ . L'écart type considérablement faible de la valeur obtenue témoigne la bonne reproductibilité du procédé de dosage du liant.

## 4.3 Etude de l'influence de la structure de matériaux poreux

Certaines études ont été réalisées afin d'identifier l'impact de différents paramètres du procédé impression 3D au sable ExOne sur les performances mécaniques des pièces élaborées [12], [9]. Coniglio et al. [12] ont été évalués influence de l'orientation d'impression, la résolution d'impression, le positionnement d'éprouvette dans le job box et la vitesse de recouvrement sur la résistance à la flexion 3 points et la perméabilité. Les auteurs ont prouvé que la vitesse de recouvrement a influencé simultanément la résistance à la flexion et la perméabilité, alors que la résolution d'impression affecte seulement la contrainte en flexion. Dans l'étude menée par Mitra et al. [9] les effets des paramètres comme la température de durcissement et le temps de vieillissement sur la résistance en flexion et la perméabilité ont été démontrés. Leurs résultats révèlent que les pièces imprimées peuvent être stockées à température ambiante pendant une longue période avant d'être utilisées, en préservant considérablement leurs propriétés mécaniques notamment la résistance en flexion 3 points. Les

résultats mécaniques obtenus par ces études montrent une forte dispersion, ce qui dégrade la fiabilité des résultats. Cette dispersion peut induire par la configuration d'essai flexion 3 points appliqué dans ces études pour révéler l'impact des paramètres du procédé sur la résistance en flexion. En fait l'appareil d'essai qui constitue trois appuis (deux fixes et un mobile) sollicite l'éprouvette imprimée localement et surtout dans la zone où se trouve l'appui mobile. Du fait de la structure poreuse de notre pièce céramique imprimée, cette zone sollicitée par l'appui mobile peut être riche en silice ou porosité. Dans le cas où l'appui mobile sollicite ponctuellement une zone très poreuse, les propriétés mécaniques sont considérablement faibles en comparaison avec le cas où l'appui mobile sollicite ponctuellement une zone compactée par des particules de silice. Autrement dit le volume élémentaire soumis aux chargement générés par le déplacement de l'appui ne représente pas la microstructure de l'ensemble de la pièce. Par conséquent, la révélation des effets des conditions d'impression sur la base du volume élémentaire représentatif (VER) qui est localisé près du point d'appui n'est plus valable. Nous avons donc proposé une nouvelle stratégie d'essai mécanique pour évaluer l'impact des paramètres du procédé d'impression 3D au sable ExOne. L'essai choisi est un essai mécanique en compression uniaxiale. Nous avons également proposé un dispositif expérimental pour améliorer les conditions de bords lors de la sollicitation des éprouvettes imprimées (figure 3).

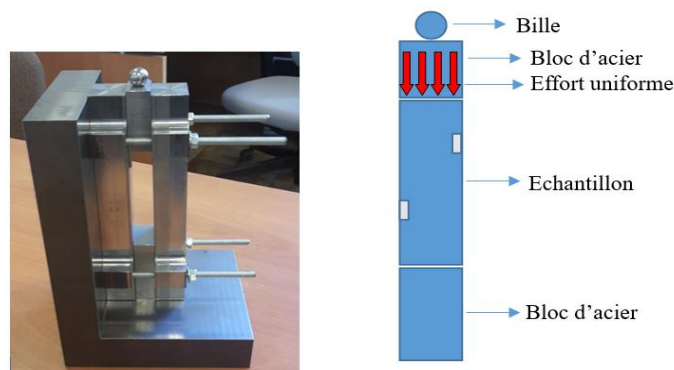


Figure 3 : Le dispositif expérimental employé dans cette étude.

L'utilisation de ce dispositif anti-flambement permet de réaliser un essai de pure compression. Il nécessite des éprouvettes aux dimensions spécifiques. Celles-ci ont été doublément entaillées afin d'initier la fissuration dans une zone prédéfinie qui se trouve au milieu des éprouvettes. Cette entaille permet de focaliser la zone de rupture et d'améliorer la reproductibilité des résultats. Cet essai permet de solliciter un volume plus représentatif par rapport à l'essai de flexion 3 points proposé précédemment. Ce VER augmente la fiabilité de reproduire le comportement global de la pièce imprimée. Les caractéristiques mécaniques telles que le chargement à la rupture et le déplacement ultime sont déterminées via cette technique.

La Figure 4 représente les courbes de charge-déplacement des éprouvettes imprimées avec une orientation d'impression de 90° par rapport à l'axe de sollicitation.

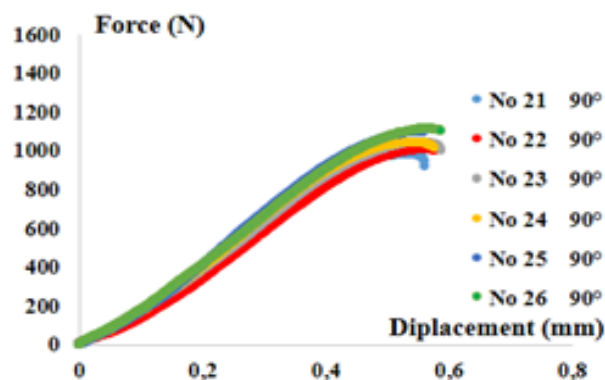


Figure 4 : comportement mécanique pour les éprouvettes réalisées par l'impression 3D au sable.

Avant tout, nous pouvons constater une bonne reproductibilité de la résistance à la compression pour ces éprouvettes. Ces courbes présentent d'abord une petite partie élastique entre 0 et 0,05mm de déplacement, puis une évolution linéaire du chargement en fonction du déplacement avant d'observer la rupture. Nous pouvons noter que l'allongement à la rupture est quasi-identique pour toutes les éprouvettes imprimées dans cette direction [90°]. Cependant nous pouvons identifier des comportements différents vis-à-vis du chargement à la rupture. Ce dernier varie entre 1005 N et 1100 N. La valeur moyenne de l'élongation à la rupture pour ces éprouvettes est égale à  $0,57 \pm 0,01$  mm.

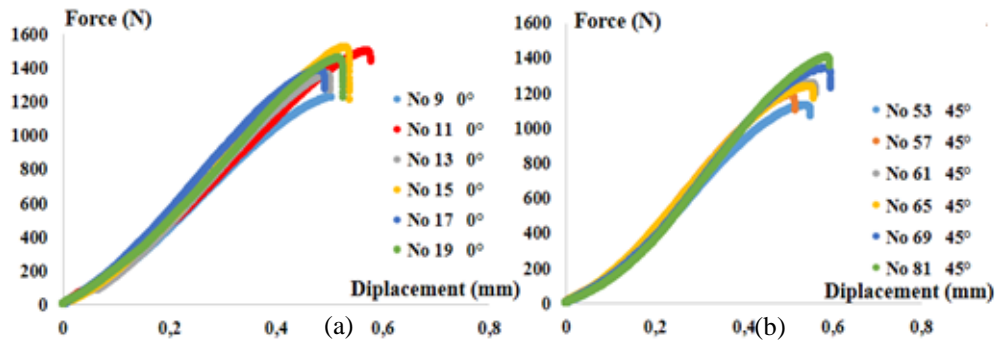


Figure 5 : courbes de charge-déplacement des éprouvettes imprimées

Comportement mécanique pour les éprouvettes imprimées avec l'orientation des couches de sable [0°] et [45°] ont été présentés sur la figure 5. Nous pouvons noter une bonne répétabilité du comportement mécanique sous compression uniaxiale pour ces éprouvettes malgré la faible dispersion de la force à la rupture. Nous trouvons une valeur moyenne du déplacement à la rupture égale à  $0,52 \pm 0,03$  mm et  $0,56 \pm 0,03$  mm pour les orientations 0° et 45° respectivement. Ces valeurs sont légèrement inférieures à la valeur moyenne du déplacement des échantillons imprimés dans la direction 90° ( $0,56 \pm 0,03$  mm). Au contraire, les forces à la rupture des éprouvettes imprimées avec l'angle d'orientation des couches [0°] et [45°] sont bien supérieures à la valeur obtenue dans la direction perpendiculaire à la sollicitation [90°]. Ceci provient très probablement des porosités (plus ou moins importantes selon l'angle d'orientation des couches sélectionnées) au sein des éprouvettes ce qui accroît la fragilité. Les caractéristiques mécaniques en compression uniaxiale des éprouvettes testées sont résumées dans le tableau 1.

	Moyenne 0°	Moyenne 45°	Moyenne 90°
Force (N)	$1380 \pm 116$	$1251 \pm 93$	$1019 \pm 67$
Déplacement (mm)	$0,52 \pm 0,03$	$0,56 \pm 0,03$	$0,57 \pm 0,01$

Tableau 1 : Paramètres du procédé d'impression 3D au sable.

#### 4.4 Observations microstructurales

Les échantillons élaborés ont été examinés à l'aide d'un microscope électronique à balayage (Zeiss XB Crossbeam SEM) avec une tension de fonctionnement de 10 kV pour mieux comprendre la microstructure des éprouvettes imprimées. La figure 6 montre des porosités et des cavités dans une éprouvette imprimée par l'impression 3D au sable. Nous pouvons voir clairement des ponts de résine furane réticulés entre les particules de sable. Ce dernier impacte considérablement les propriétés mécaniques de pièce imprimée. Nous pouvons également noter la variation de taille des particules de sable pour cette éprouvette.



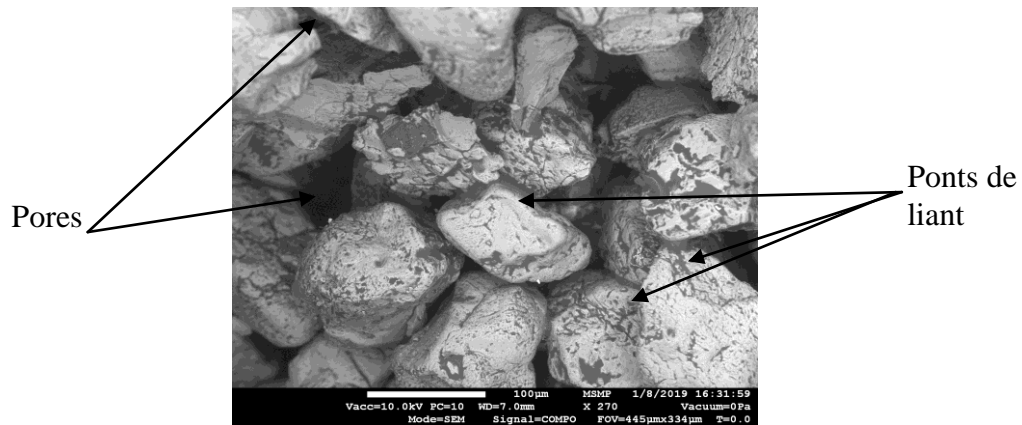


Figure 6 : Observation de microstructure d'une éprouvette testée

## 5. Conclusions

Une étude du procédé d'impression 3D au sable ExOne, habituellement utilisé dans l'industrie de la fonderie, a été mise en place. Elle repose sur une nouvelle stratégie d'essai mécanique pour évaluer l'impact des paramètres du procédé d'impression 3D au sable. A été constaté que le dispositif expérimental développé dans cette étude, augmente considérablement la reproductibilité des résultats en améliorant les conditions de bords lors de sollicitation des éprouvettes imprimés. Les caractéristiques mécaniques en compression telles que le chargement à la rupture et le déplacement ultime sont déterminées via cette technique. A été prouvé que l'orientation d'impression axiale [0 °] représente le chargement à la rupture plus importante parmi les orientations étudiées. Afin de mieux comprendre la relation entre la microstructure des éprouvettes imprimées et les paramètres du procédé ExOne, une étude microscopique a été effectuée à l'aide d'un MEB. Des ponts de résine réticulés entre les particules de sables ont été visualisés via cette technique.

## 6. Références

- [1] M. Attaran, The rise of 3D printing: the advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing, *Business horizons*60 (2017) 677-688
- [2] T.D. Ngo, A. Kashani, G. Elmbalzano, D. Hui, Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges, *Composites part b*143 (2018) 172-196
- [3] M. Sljivi, C. Fragassa, A. Pavlovi, M. Krajsnik, Additive manufacturing of functional parts based on material extrusion technology, *Contemporary materials*2 (2016) 178-184
- [4] F. Melchels, J. Feijen, D.W. Grijpma, A review on stereolithography and its application in biomedical engineering, *Biomaterials*31 (2010) 6121-30
- [5] I. Gibson, D. Shi, Material properties and fabrication parameters in selective laser sintering process, *Rapid Prototyping Journal*3 (1997) 129-136
- [6] H. Ramezani Dana, F. Barbe, Développement de matériaux cellulaires avec mise en œuvre par fabrication additive bimatérielle, *Congrès français mécanique*, Lille, France, 2017
- [7] P.M. Hackney, R. Wooldridge, Characterization of direct 3D sand printing process for the production of sand cast mould tools, *Rapid Prototyping Journal*23 (2017) 7-15
- [8] M. Singh, H.M. Haverinen, P. Dhagat, G.E. Jabbour, Inkjet Printing-Process and its applications, *Advanced Materials*22 (2010) 673-685
- [9] S. Mitra, A.R. Castro, M Elmansori, The effect of ageing process on the three-point bending strength a of 3D printed sand molds, *Advanced Manufacturing Technology*97 (2018) 1241-1251
- [10] M. Holtzer, M. Gorny, R. Danko, *Microstructure and properties of ductile iron and compacted graphite iron casting*, Springer, 2015
- [11] T.A. Le Néel, P. Mognol, J.Y. Hascoet, A review on additive manufacturing of sand molds by binder jetting and selective laser sintering, *Rapid prototyping journal*24 (2018) 1325-1336
- [12] N. Coniglio, T. Sivarupan, M Elmansori, Investigation of process parameter effect on anisotropic properties of 3D printed sand molds, *Advanced Manufacturing Technology*97 (2018) 1241-1251