

COMPORTEMENT DES MÉLANGES À BASSE
VISCOSITÉ DE POLYMÈRES HAUTEMENT CHARGÉS
EN POUDRE D'ACIER INOXYDABLE SUR LES
PROPRIÉTÉS DIMENSIONNELLES ET GÉOMÉTRIQUES
DES PIÈCES OBTENUES EN IMPRESSION 3D PAR
EXTRUSION

par

EMMANUEL PELLETIER

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA
MAITRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M. SC. A.

MONTREAL, LE 2 MAI 2024

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Emmanuel Pelletier, 2024



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Vincent Demers, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Lucas Hof, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Philippe Bocher, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 24 AVRIL 2024

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

C'est avec une profonde gratitude que j'exprime mes remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de mon mémoire de maîtrise.

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma reconnaissance envers mon directeur M. Vincent Demers pour son implication dans ce projet. Son partage de connaissance, ses conseils et sa compréhension m'ont permis de finaliser mon cheminement scolaire d'une façon mémorable. Son expertise et son dévouement ont su guider ce projet afin de le mettre à terme. J'aimerais également remercier Dorian Delbergue, Raphaël Côté, Benoit Beaulieu et Joël Grignon pour leurs implications et leurs partages de connaissance tout au long de ces deux dernières années.

Bien que l'apport de savoir-faire ait joué un grand rôle dans ce projet, le soutien moral ainsi que la motivation de certains ont eu un impact significatif à la mise à terme de cette éducation. Je tiens à remercier mes parents, ma tante ainsi que mon frère, ma sœur et mes amis. Vous avez cru en moi et votre soutien m'a été d'une des plus grandes aides. J'aimerais également souligner le support incroyable que mon conjoint Pascal. Tu m'as épaulé et soutenu du début à la fin. Dans les moments les plus difficiles, tu as su apaiser mon doute et mon angoisse. Je te dois une grande partie de ma réussite.

COMPORTEMENT DES MÉLANGES À BASSE VISCOSITÉ DE POLYMÈRES HAUTEMENT CHARGÉS EN POUFRE D'ACIER INOXYDABLE SUR LES PROPRIÉTÉS DIMENSIONNELLES DES PIÈCES OBTENUS EN IMPRESSION 3D PAR EXTRUSION

Emmanuel PELLETIER

RÉSUMÉ

La fabrication additive par extrusion de matériau (MEX) utilisant des polymères hautement chargés en poudres métalliques est un procédé permettant de fabriquer des pièces métalliques en quatre étapes. La formulation du mélange, l'impression 3D par extrusion, le déliantage et le frittage mènent à la fabrication d'une pièce métalliquement dense possédant les propriétés mécaniques proches du même métal corroyé. Le présent projet vise à mieux définir les propriétés dimensionnelles et géométriques atteignables en utilisant le procédé MEX avec des mélanges d'acier inoxydable 17-4 PH à basses viscosités. La performance de deux imprimantes a été investiguée, soit une imprimante à base de piston en développement par les étudiants à l'ÉTS ainsi qu'une imprimante commerciale fabriquée par Desktop Metal qui utilise un système de tige acheminé par des cartouches dans les extrudeurs. L'imprimante commerciale utilise un mélange de polymère confidentiel et de poudre 17-4 PH qui est formulé par la compagnie tandis que l'imprimante en développement utilise un mélange à base de cire et de poudre 17-4 PH ayant une plage de viscosité allant de 50 à 120 Pa*s. La caractérisation CMM des propriétés dimensionnelles des pièces à vert (prismes rectangulaires) a permis de quantifier des déviations dimensionnelles maximum $4.1 \pm 0.1\%$ par rapport aux dimensions nominales. La quantification de caractéristiques géométriques sur des pièces prismatiques et axisymétriques a aussi permis de conclure qu'il était possible d'imprimer des angles de surplomb supérieur à 70 degrés sans l'utilisation de support avec les deux principes d'imprimante.

Mots-clés: Fabrication additive, extrusion, caractérisation dimensionnelle, caractérisation géométrique

BEHAVIOR OF LOW-VISCOSITY BLENDS OF POLYMERS HIGHLY LOADED WITH STAINLESS STEEL POWDER ON THE DIMENSIONAL PROPERTIES OF PARTS OBTAINED IN 3D PRINTING BY EXTRUSION

EMMANUEL PELLETIER

ABSTRACT

The additive manufacturing by material extrusion (MEX) using polymers highly loaded with metallic powders is a process that allows the production of metal parts in four stages. The formulation of the mixture, 3D printing by extrusion, debinding, and sintering lead to the fabrication of a densely metallic part with mechanical properties close to those of the same alloyed metal. The present project aims to better define the achievable dimensional and geometric properties using the MEX process with low-viscosity blends of stainless steel 17-4 PH. The performance of two printers has been investigated, one being a piston-based printer in development by students at ÉTS and the other a commercial printer manufactured by Desktop Metal, which uses a rod system fed by cartridges into the extruders. The commercial printer uses a confidential polymer blend and 17-4 PH manufactured by the company, while the developmental printer uses a wax-based blend with a viscosity range of 50 to 120 Pa*s. CMM characterization of dimensional properties on green parts (rectangular prisms) allowed quantifying maximum dimensional deviations of $4.1 \pm 0.1\%$ compared to nominal dimensions. Characterization of geometric features on prismatic and axisymmetric parts also concluded that it was possible to print overhang angles greater than 70 degrees without the use of support with both printer principles.

Keywords: Additive manufacturing, material extrusion, dimensional characteristic, geometrical characteristic

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	3
1.1 Fabrication additive des matériaux métalliques.....	3
1.2 L'impression 3D par extrusion de matière (MEX).....	5
1.2.1 Description du procédé MEX	6
1.2.2 Caractérisation des mélanges utilisés en MEX.....	9
1.2.3 Procédés post-impression (déliantage et frittage).....	11
1.3 Performances des pièces obtenues par MEX	13
1.3.1 Caractéristiques dimensionnelles des pièces à vert	14
1.3.2 Caractéristiques géométriques des pièces produites par MEX.....	19
CHAPITRE 2 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS.....	25
2.1 Problématique	25
2.2 Objectifs.....	26
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE	29
3.1 Préparation des mélanges poudre-liant	29
3.2 Types d'imprimantes et pièces imprimées.....	31
3.3 Paramètres d'impression MEX.....	36
3.4 Caractérisation des propriétés dimensionnelles et géométriques.....	43
3.5 Fabrication de la presse à injection.....	46
CHAPITRE 4 RÉSULTATS	49
4.1 Caractérisation dimensionnelle des pièces imprimées.....	49
4.1.1 Qualité générale des pièces imprimées	49
4.1.2 Quantification des dimensions des pièces imprimées.....	50
4.1.3 Quantification de la masse des pièces imprimées.....	55
4.2 Mesure de l'angle seuil de surplomb	56
4.3 Capabilité géométrique de l'impression MEX	58
4.3.1 Impression de la pièce prismatique.....	58
4.3.2 Impression de la pièce axisymétrique	60
4.4 Influence du diamètre théorique de la buse d'impression	62
4.5 Retour sur les résultats	63
CONCLUSION.....	65
RECOMMANDATIONS	67
ANNEXE I Plan des tiges de l'imprimante commerciale	69

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....71

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Dimensions moyennes et écart-type des cubes imprimés et frittés selon les configurations FD (cube plein) et TC (cube semi-vide)	18
Tableau 3.1 Essais préliminaires sur l'imprimante commerciale.....	38
Tableau 3.2 Paramètres d'impression.....	41
Tableau 4.1 Définition des légendes avec leurs paramètres respectifs.....	51

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Modèle 3D (a), conversion en fichier STL (b), trajet d'outil dans le logiciel de découpe (c) et pièce imprimée (d) en utilisant une imprimante 3D.....	3
Figure 1.2 Schéma de l'impression par extrusion MEX	5
Figure 1.3 Nombre de publications sur le sujet du MEX entre 1995 et 2022.....	6
Figure 1.4 Représentation des différentes étapes du procédé MIM et MEX, fabrication du mélange polymère/poudre (a), injection MIM (b), impression 3D MEX (c), déliantage (d) et frittage (e)	8
Figure 1.5 Viscosité apparente à 200°C, 250°C et 300°C de quatre mélanges polymère/poudre avec des charges solides de (a) 50 %, (b) 55 %, (c) 60 % et (d) 65 % en 17-4 PH.....	11
Figure 1.6 Défauts géométriques lors du déliantage sur une pièce simple (a, c et e), et une pièce complexe (b, d, f) obtenus avec un mélange polymère/poudre en LPIM.....	12
Figure 1.7 (a) Viscosité du mélange à différentes températures et (b) les cubes imprimés	14
Figure 1.8 (a) Influence du multiplicateur de débit (noté EM), (b) du diamètre de la buse et (c) de la hauteur de couche sur la densité à vert et la déviation dimensionnelle des pièces imprimées.....	16
Figure 1.9 Trajets d'outils des impressions (a) de cube plein (FD), et (b) de cube partiellement-vide (TC)	17
Figure 1.10 Déviation dimensionnelle (a) des dimensions externes et (b) de la hauteur en fonction de la hauteur de couche et du chevauchement lors de.....	19
Figure 1.11 Impression d'une cellule gyroïde selon (a-c) trois différentes stratégies, ou l'utilisation d'une configuration (d) de cellule unique et (e) de cellule étendue 1.5x	21
Figure 1.12 Modèle 3D du support initial (a) ainsi que les mesures obtenues avec les numériseurs (b) et leurs déviations (c).....	23
Figure 2.1 Schéma d'une pièce imprimée illustrant la problématique de ce projet, où les caractéristiques dimensionnelles (A) et géométriques (θ) ne sont pas encore bien connues.....	26

Figure 3.1 (a) Image MEB de la poudre 17-4PH utilisé dans le mélange ÉTS ainsi que le graphique de la PSD (b) et (c) profil de viscosité des mélanges ÉTS et du mélange commercial	30
Figure 3.2 (a) Image de l'imprimante en développement de l'ÉTS et (b) une vue de coupe expliquant son fonctionnement	32
Figure 3.3 (a) Image de l'imprimante commerciale, (b) schéma de fonctionnement de l'imprimante et image des tiges utilisées (c).....	33
Figure 3.4 Vue isométrique, de côté et de dessus des (a-c) pièces rectangulaires (d-f) pièces arquées (tirée de https://www.thingiverse.com/thing:2442722) (g-i) pièces prismatiques et (j-l) pièces axisymétriques.....	36
Figure 3.5 Trajets d'outil standard (a, c) et optimisé (b et d) de la pièce prismatique et axisymétrique ainsi que trajets d'outils standards de la pièce arquée (e) et prisme rectangulaire (f).....	43
Figure 3.6 photo de la balance (a), de la CMM ainsi que de la tête numériseur au laser utilisée (c).....	44
Figure 3.7 Stéréoscope utilisé pour la visualisation des angles de surplomb	45
Figure 3.8 Presse à injection pour fabriquer les tiges de l'imprimante commerciale	47
Figure 4.1 Vue de dessus (a, d), de face (b, e) et isométrique (c, f) des pièces rectangulaires imprimées avec l'imprimante commerciale et l'imprimante ÉTS.....	50
Figure 4.2 Graphique présentant les longueurs (a), les largeurs (b) et les hauteurs (c) avec leurs écarts-types mesurées des prismes rectangulaires.....	55
Figure 4.3 Graphique présentant les masses mesurées des prismes rectangulaires	56
Figure 4.4 Vue de côté (a), de dessus (b) et de dessous (c) de la pièce arquée imprimée	57
Figure 4.5 Pièces prismatiques imprimées avec l'imprimante de l'ÉTS avec un angle de surplomb de 70° (a-b) et 75° (c-d), et imprimées avec l'imprimante commerciale avec un angle de surplomb de 70° (e-d) et 75° (g-h)	60
Figure 4.6 Vues isométriques (a-c), de dessus (d-f) et de dessous (g-i) des pièces axisymétriques sur l'imprimante commerciale à 70° et à 75°, puis à 70° sur l'imprimante de l'ÉTS.....	61

- Figure 4.7 Surface en dessous de l'angle de surplomb des pièces prismatiques imprimées avec l'imprimante commerciale avec le diamètre de buse théorique de 0.48 mm (a-b) et 0.40 mm (c).....62
- Figure 4.8 Surface en dessous de l'angle de surplomb des pièces axisymétriques imprimées avec l'imprimante commerciale avec un diamètre théorique de buse de 0.48 mm (a) et 0.40 mm (b)63

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

MEX	Impression par extrusion de matière (<i>Material Extrusion</i>)
MIM	Moulage par injection de poudre métallique (<i>Metal Injection Molding</i>)
LPIM	Moulage par injection de poudre métallique à basse pression (<i>Low Pressure Injection Molding</i>)
ÉTS	École de technologie supérieure
EVA	Éthylène-acétate de vinyle (<i>Ethylene-Vinyl Acetate</i>)
SA	Acide stéarique (<i>Stearic Acid</i>)
FA	Fabrication additive
PBF	Fusion sur lit de poudre (<i>Powder Bed Fusion</i>)
DED	Dépôt d'énergie dirigée (<i>Direct Energy Deposition</i>)
BJ	Jet de liant (<i>Binder Jetting</i>)
LOM	Fabrication d'objets laminés (<i>Laminated Object Manufacturing</i>)
CMM	Machine à mesurer tridimensionnelle (<i>Coordinate-Measuring Machine</i>)

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

$\varnothing_{\text{tige}}$	Diamètre de tige (mm)
$\varnothing_{\text{filament}}$	Diamètre de filament (mm)
ϕ	Fraction volumique de poudre dans le mélange (% vol.)
D ₅₀	Taille des particules au 50 ^e percentile (μm)
θ	Angle de surplomb (°)

INTRODUCTION

L'impression 3D par extrusion de matière (MEX) est un procédé de fabrication par ajout de matériau couche par couche de pièces ayant de géométries complexes qui peuvent être difficiles à obtenir avec des procédés par enlèvement de matière, comme l'usinage. Il y a quatre grandes étapes. La première consiste à fabriquer le mélange de polymère hautement chargé qui sera imprimé. Ce mélange est constitué de cire de paraffine et d'additif comme de l'acide stéarique et de l'éthylène-acétate de vinyle afin d'obtenir la viscosité désirée. À ce mélange, une fine poudre d'acier inoxydable y est ajoutée. Ce mélange est ensuite mis en forme en fonction du type d'extrudeur utilisé dans l'imprimante. Le cas présent nécessite un mélange sous forme liquide pour l'imprimante de l'ÉTS et sous forme de tige pour les cartouches de l'imprimante commerciale. Ensuite vient le déliantage, qui consiste à retirer les polymères présents dans la pièce soit par solvant ou thermiquement avec succion capillaire. Une fois la pièce libre de polymère, elle est chauffée à 90% du point de fusion du métal afin d'obtenir une pièce métalliquement dense. Dans ce processus, la pièce rétrécit environ de 20 % en volume, mais obtient une densité jusqu'à environ 95% de sa densité théorique. Le procédé contient énormément de similitudes avec le procédé d'injection MIM comme les étapes de déliantage et de frittage. Dans ce projet, les mélanges de polymères utilisés proviennent directement d'un mélange de MIM. Les proportions sont similaires afin d'utiliser un mélange à basse viscosité dans le procédé d'impression. Ce travail consiste donc à évaluer les performances dimensionnelles et géométriques d'un mélange à basse viscosité provenant du MIM dans un procédé MEX en utilisant deux principes d'impression.

Ce document est divisé en cinq sections. La première présente une revue de littérature sur le procédé MEX et ses performances dimensionnelles et géométriques. La deuxième section présente la problématique ainsi que les objectifs à atteindre dans ce travail. La section 3 est la méthodologie dans laquelle les machines utilisées, les démarches et les paramètres sont définis et expliqués. Ensuite viennent les résultats des analyses dimensionnelles et géométriques des

pièces imprimées. Une dernière section viendra résumer les analyses et proposer une conclusion finale.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Fabrication additive des matériaux métalliques

La fabrication additive (FA) comprend plusieurs procédés différents permettant de créer des pièces, couche par couche en trois dimensions. Ces procédés FA utilisent une méthode d'ajout de matière plutôt que l'enlèvement de matière comme l'usinage conventionnel. Bien que le but principal des procédés d'impression 3D soit le même, la procédure pour y arriver diffère énormément pour chaque type d'imprimante. La Figure 1.1 présente les quatre étapes démontrant la démarche pour obtenir une pièce avec une imprimante 3D, soit la modélisation d'une pièce, la conversion en fichier STL, la définition des paramètres dans le logiciel de découpe ainsi qu'une pièce finale après impression.

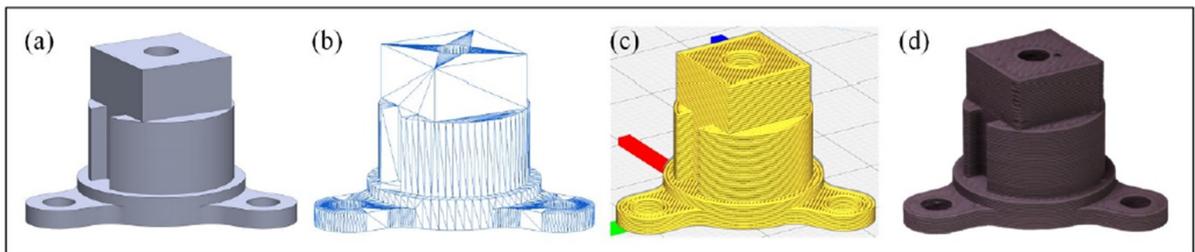


Figure 1.1 Modèle 3D (a), conversion en fichier STL (b), trajet d'outil dans le logiciel de découpe (c) et pièce imprimée (d) en utilisant une imprimante 3D tirée de Miclette et al., (2022)

Il existe différents procédés de fabrication additive qui utilisent un matériau métallique afin d'obtenir une pièce métallique dense qui peut être utilisée dans le domaine de l'automobile, de l'aéronautique, de l'industrie, de la construction, de la bio-impression, de l'alimentation ainsi que dans le domaine de l'espace. La fusion sur lit de poudre (PBF), le dépôt d'énergie directe (DED), le jet de liant (BJ), la fabrication d'objets laminés (LOM) et l'extrusion de matière

(MEX) font partie des procédés de fabrication additive capables de produire des pièces métalliques tridimensionnelles (Yi et al., 2018). Le procédé PBF utilise un lit de poudre métallique fourni par une lame mobile où une source de chaleur fait fondre localement la poudre, couche par couche, pour créer la pièce de manière sélective, soit par fusion au laser, soit par fusion par faisceau d'électrons. Le fort gradient thermique subi par la pièce pendant le processus de PBF peut induire des contraintes résiduelles susceptibles de provoquer des déformations, des fissures et le délaminage des couches des pièces imprimées. Dans le DED, le matériau métallique (sous forme de poudre ou de fil) est acheminé vers la buse pour être fondu à l'aide d'un laser ou d'une source de faisceau d'électrons avant d'être déposé couche par couche. Comme pour le processus de PBF, l'approche DED produit également des gradients thermiques susceptibles de provoquer les mêmes problèmes géométriques. Le BJ utilise le même principe de construction de pièces à partir d'un lit de poudre que celui utilisé dans la PBF. Au lieu d'une source de chaleur, une tête d'impression à jet d'encre pulvérise sélectivement un liant liquide avant de le solidifier pour produire la pièce verte (poudre et liant) nécessitant un post-traitement (c'est-à-dire le déliantage et le frittage) pour atteindre sa forme finale. Dans le LOM, les rubans métalliques sont empilés, soudés par ultrason puis usinés par fraisage. Les principaux inconvénients de cette approche de fabrication sont les faibles propriétés mécaniques, le mauvais fini de surface et la difficulté à fabriquer des formes complexes. Le MEX, quant à lui, est un procédé plus polyvalent puisque l'extrusion peut se faire autant avec des plastiques (FDM) que des polymères hautement chargés en poudre métallique. Le matériau utilisé est fondu dans l'extrudeur avant d'être poussé au travers une buse ($0.2 < \varnothing < 0.8$ mm) à l'état liquide avant de se solidifier graduellement lors du dépôt des couches qui vont former la pièce. L'utilisation de plus faible température permet de créer des pièces avec moins de contraintes résiduelles comparativement aux procédés PBF et le DED (Rouf et al., 2022). Quelle que soit la stratégie de fabrication additive, le prototypage, la fabrication rapide, la production en faible volume et la personnalisation du produit deviennent possibles en réduisant ou en éliminant les besoins en assemblage et en outillage. Ces approches d'impression sont également reconnues pour offrir des réductions de coûts principalement dues à la réduction des délais, des stocks, des déchets et de la main-d'œuvre.

1.2 L'impression 3D par extrusion de matière (MEX)

Cette section présente plus en détail le procédé d'impression 3D par extrusion de matière (appelé en anglais *Material Extrusion, MEX*). La description du procédé avec ses similitudes avec le procédé de moulage par injection des poudres (appelé en anglais *Metal Injection Molding, MIM*), la préparation du mélange polymère/métal utilisé ainsi qu'une brève explication des étapes de post-traitement qui permettent d'obtenir des pièces finales métalliquement denses. La Figure 1.2 présente un schéma général de l'impression MEX ainsi que ces composantes.

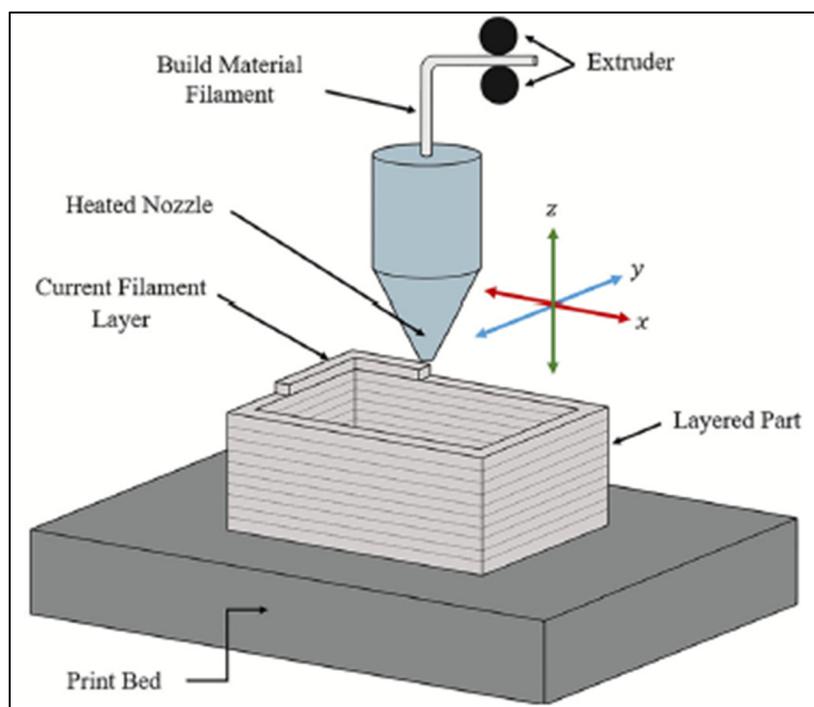


Figure 1.2 Schéma de l'impression par extrusion MEX
tirée de Shah et al., (2019)

1.2.1 Description du procédé MEX

Le procédé MEX des polymères chargés en poudre est une forme de FA. La Figure 1.3 présente le nombre de publications par année sur le procédé MEX des pièces métalliques entre 1995 à 2022. Jusqu'en 2015, les publications par année demeurent faibles, puis quelques références ont été recensées sur le sujet, pour ensuite connaître une augmentation de plus de 100 % en 2021. Le sujet de l'impression par extrusion avec des matériaux métalliques peut donc être qualifié de très jeune. Cependant, les similarités du procédé MEX avec le moulage MIM font que certaines phases comme le déliantage et le frittage sont déjà acquises et maîtrisées.

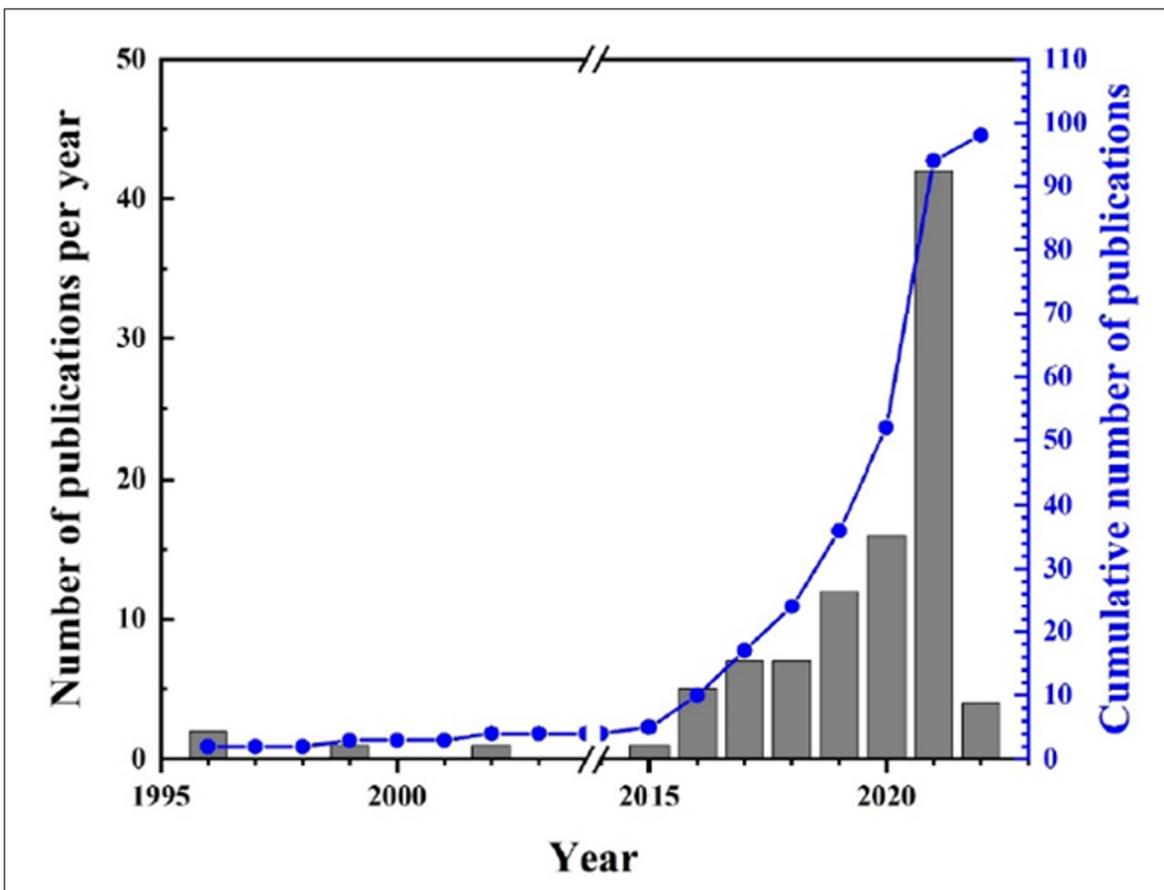


Figure 1.3 Nombre de publications sur le sujet du MEX entre 1995 et 2022
tirée de Suwanpreecha & Manonukul, (2022)

Le procédé d'impression par extrusion contient des similitudes avec le procédé de moulage par injection MIM puisqu'ils utilisent des mélanges polymères/métaux semblables. La Figure 1.4 montre les étapes du procédé MEX et MIM. La Figure 1.4a schématise la fabrication des mélanges poudre-liant afin de les utiliser par la suite dans le procédé d'injection ou d'impression montrées respectivement à la Figure 1.4b-c. En MIM et en MEX, le mélange poudre-liant peut être fourni selon trois formes : des granules, qui sont utilisés dans les deux procédés ou un filament et la barre qui sont principalement utilisés en MEX. Pour l'injection MIM, le mélange est fondu puis acheminé par une pression provenant d'un piston ou d'une vis sans fin qui transporte le mélange dans sa forme visqueuse vers le moule. Suivant l'étape du remplissage, une période d'attente est nécessaire afin de refroidir le moule et de solidifier la pièce avant de la démouler. Pour l'impression MEX, le mélange est acheminé par un piston, une vis sans fin ou bien par un système d'avance qui force le filament ou bien la barre vers la buse de l'extrudeur. Le mélange est chauffé à son entrée dans l'extrudeur avant d'être poussé à travers la buse pour y être extrudé puis déposé couche par couche sur une plaque de construction. La Figure 1.4d schématise les différentes approches de déliantage (solvant et thermique) permettant l'extraction des polymères afin de ne retenir que la poudre métallique dans la pièce avant de fritter la pièce comme montré à la Figure 1.4e. Cette dernière étape consiste à chauffer la pièce afin d'activer la diffusion à l'état solide pour que les particules de métal se consolident entre elles et produisent la densité métallique à la pièce finale.

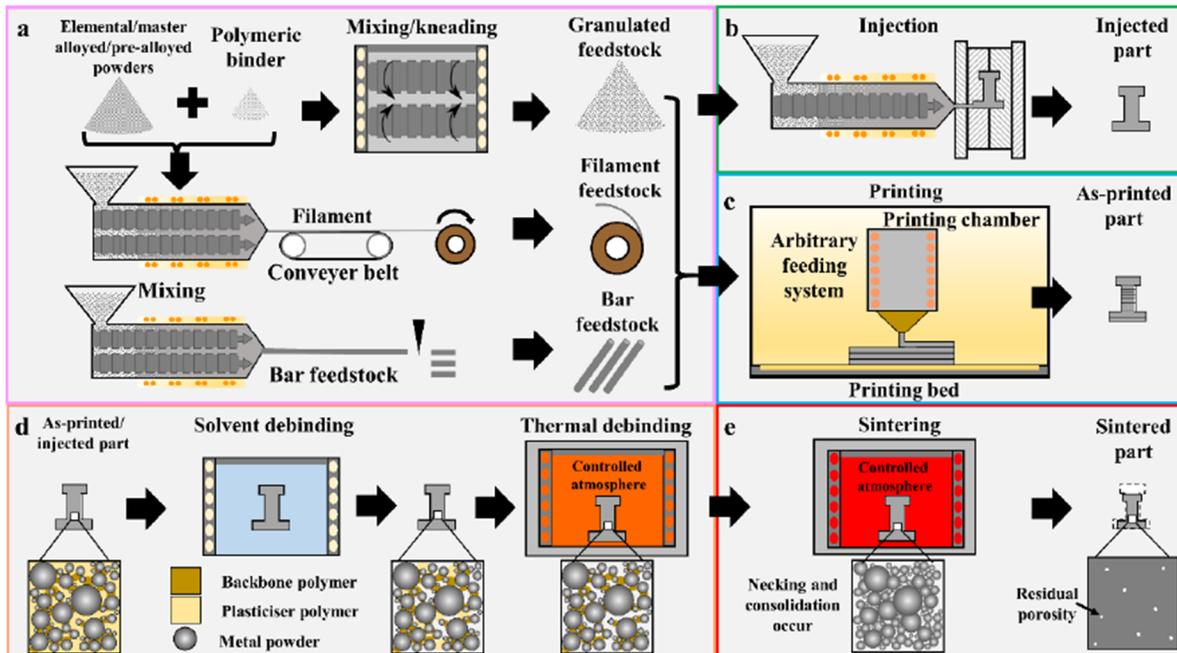


Figure 1.4 Représentation des différentes étapes du procédé MIM et MEX, fabrication du mélange polymère/poudre (a), injection MIM (b), impression 3D MEX (c), déliantage (d) et frittage (e)

tirée de Suwanpreecha & Manonukul, (2022)

Spécifiquement, l'étape d'impression du procédé MEX consiste à pousser un matériau d'alimentation fondu (poudre + liant) à travers une buse qui est ensuite déposé sur une plaque de construction. Le mouvement relatif entre la plaque de construction et la buse dans les trois directions cartésiennes permet de construire couche par couche une pièce tridimensionnelle. La température atteinte dans l'extrudeuse est légèrement supérieure au point de fusion du polymère pour favoriser à la fois une viscosité adéquate du mélange pendant l'étape d'impression et un faible rétrécissement des joncs déposés pendant la solidification. Il y a près de 30 ans, des chercheurs (Greul et al., 1995) ont utilisé un système à base de filaments (Stratasys Inc.) pour imprimer une pièce en acier inoxydable en utilisant un mélange faiblement chargé en poudre ($\phi = 50$ vol. %). Plus récemment, Kukla et al. (Kukla et al., 2017) ainsi que Cerejo et al. (Cerejo et al., 2021) ont confirmé qu'une proportion de poudre plus élevée d'environ $\phi = 60$ vol. % ne pouvait pas être utilisée dans cette approche pour maintenir la flexibilité du filament. En parallèle au développement de l'approche à base de filament,

l'approche à vis a été proposée pour contourner la limitation du chargement solide intrinsèquement liée au filament (Bellini et al., 2005; Singh et al., 2021; Spiller & Fleischer, 2018). Bien que des matériaux d'alimentation similaires à ceux du MIM puissent être utilisés dans de telles imprimantes, l'alimentation d'un sous-produit nécessite la fusion des granulés qui augmente nécessairement la durée totale du processus. Une variante de l'approche à base de filament a également été proposée pour tirer parti du savoir-faire développé dans cette technologie, mais en utilisant des tiges à charge solide élevée ($\varnothing_{\text{tige}} \approx 6 \text{ mm}$ vs $\varnothing_{\text{filament}} \approx 1,75 \text{ mm}$) (Bose, 2019; Bose et al., 2023). Plus récemment, des approches d'impression basées sur un piston utilisant des matériaux d'alimentation à charge solide élevée (directement à l'état liquide) ont été proposées. Par exemple, Miclette et al. (Miclette et al., 2022) ont développé une imprimante où un piston inversé peut être rempli d'un matériau d'alimentation à l'état liquide chaud avant d'être extrudé sur un système de plateforme Delta. En fait, les approches à vis, à tige ou à piston décrites ci-dessus offrent l'avantage majeur d'imprimer des pièces vertes avec un matériau d'alimentation à charge solide élevée ($\geq 65 \text{ vol. \%}$ de poudre). Notons que cette valeur de charge solide élevée est généralement requise pour réduire et contrôler le rétrécissement qui se produit pendant les étapes de déliantage et de frittage. Un autre avantage majeur consiste à utiliser des matériaux d'alimentation similaires à ceux du MIM dans le MEX et à utiliser directement les étapes de post-traitement (c'est-à-dire le déliantage et le frittage) matures, connues et bien acceptées par l'industrie.

1.2.2 Caractérisation des mélanges utilisés en MEX

Malgré le fait que les polymères présents dans les mélanges ne participent pas à la pièce métallique finale (i.e., ils disparaissent complètement de la pièce lors du déliantage et du frittage), leurs rôles et leurs compositions sont très importants lors de l'étape d'impression. Ils influencent la qualité de la production ainsi que la qualité de la pièce finale. Gonzalez-Gutierrez et al. (2018) spécifient que les liants se retrouvent en trois principales catégories. La première comprend le plus grand pourcentage volumique du mélange de polymères, soit entre

50 et 90 vol. %. C'est le premier des liants à être retiré dans l'étape de déliantage. Le deuxième est le polymère servant de structure au mélange. C'est lui qui retient la forme de la pièce lorsque le premier polymère est retiré. Il est présent entre 0 et 50 vol. % et se décompose avant le frittage. La troisième catégorie contient les agents dispersants et stabilisants permettant de bien disperser les particules de métal dans le mélange de polymères et aussi, de prévenir les agglomérations et la séparation des phases liquide et solide. Ils représentent entre 0 et 10 vol. % du volume total du mélange.

Bien entendu, la poudre métallique est ajoutée à ce mélange polymérique afin de demeurer en place suite aux déliantage et frittage permettant de produire les propriétés mécaniques à la pièce finale. Les poudres utilisées dans les mélanges de MEX sont les mêmes que dans les mélanges de poudre-liant servant au procédé d'injection MIM. Les particules de métal pour le MIM possèdent un diamètre moyen généralement entre 5 et 15 μm . Ces particules sont donc suffisamment fines pour être utilisées dans les buses d'extrudeurs des imprimantes par extrusion, qui ont généralement une ouverture de 0.3 à 0.8 mm. Gonzalez-Gutierrez et al. (2018) expliquent que la composition des mélanges affecte le comportement de ceux-ci. En effet, un mélange contenant 50 ou 60 vol. % de poudre métallique n'auront pas le même comportement lors de l'extrusion puisque la viscosité sera différente, comme démontré par un groupe de chercheurs de l'université de Castilla-La Mancha en Espagne (Naranjo et al., 2023) et présentée à la Figure 1.5. Les viscosités apparentes en fonction de trois températures (200°C, 250°C et 300°C) ont été évaluées avec quatre charges solides de poudre métallique de 17-4 PH différentes, soit une charge solide de 50 vol. % (Figure 1.5a), une charge solide de 55 vol. % (Figure 1.5b), une charge solide 60 vol. % (Figure 1.5c) et une charge solide de 65 vol. % (Figure 1.5d).

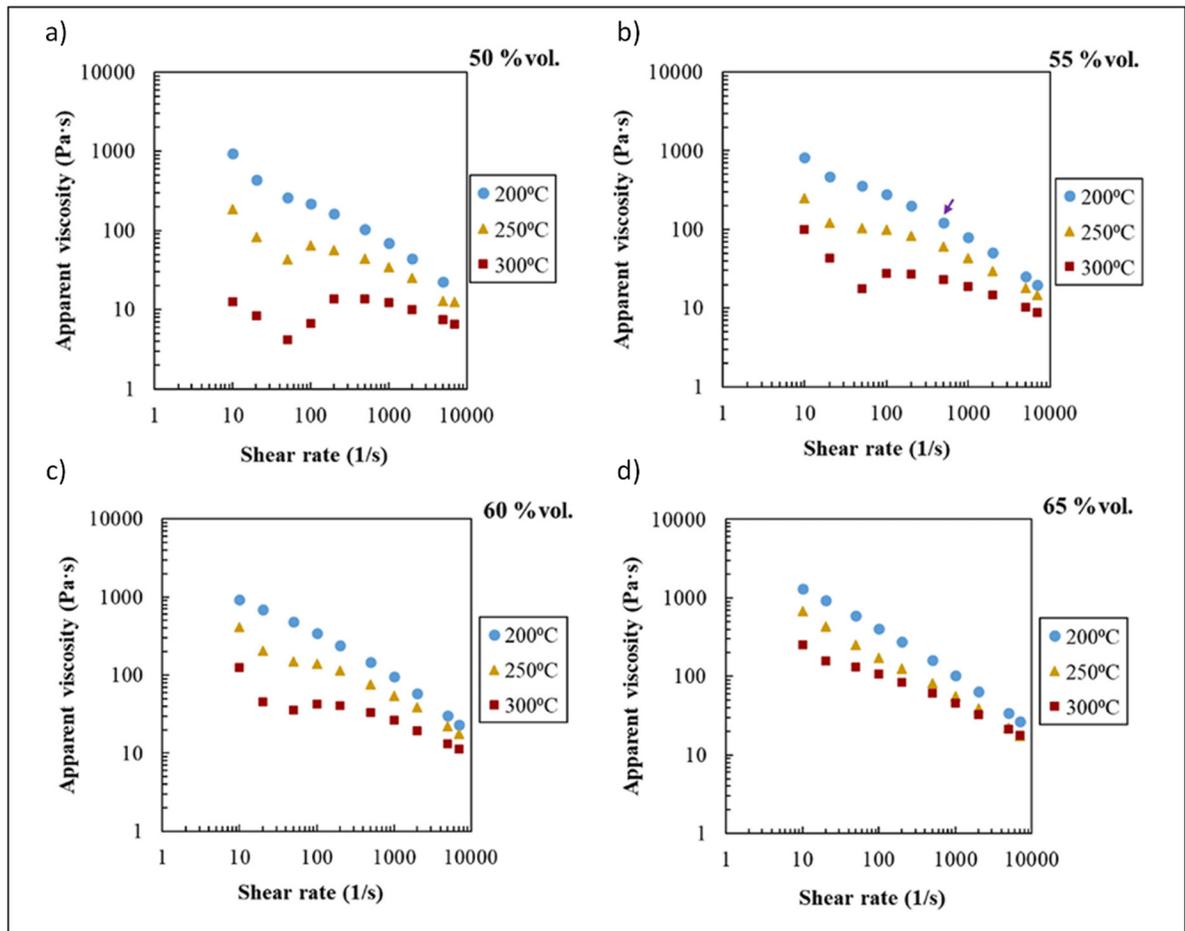


Figure 1.5 Viscosité apparente à 200°C, 250°C et 300°C de quatre mélanges polymère/poudre avec des charges solides de (a) 50 %, (b) 55 %, (c) 60 % et (d) 65 % en 17-4 PH
tirée de Naranjo et al., (2023)

1.2.3 Procédés post-impression (déliantage et frittage)

Suivant l'étape d'impression, il est maintenant temps de retirer les polymères présents dans la pièce sans en affecter sa forme. Pendant le déliantage, la majorité du liant est extrait. Si le déliantage n'est pas proprement réalisé, les pièces peuvent gonfler, fissurer, laisser de grand vide ou des résidus de carbone à l'intérieur qui affaiblirait la pièce finale. La Figure 1.6a-b démontre deux pièces à vert, une simple et un complexe, obtenu par le procédé LPIM qui utilise

le même type de mélange poudre/liant que le procédé MEX. Ces deux pièces ont subi un bon (Figure 1.6c-d) et un mauvais (Figure 1.6e-f) déliantage. Les fissures, les déformations et les marques d'oxydation sont le résultat d'une mauvaise évacuation du polymère lors de l'étape de post-traitement.

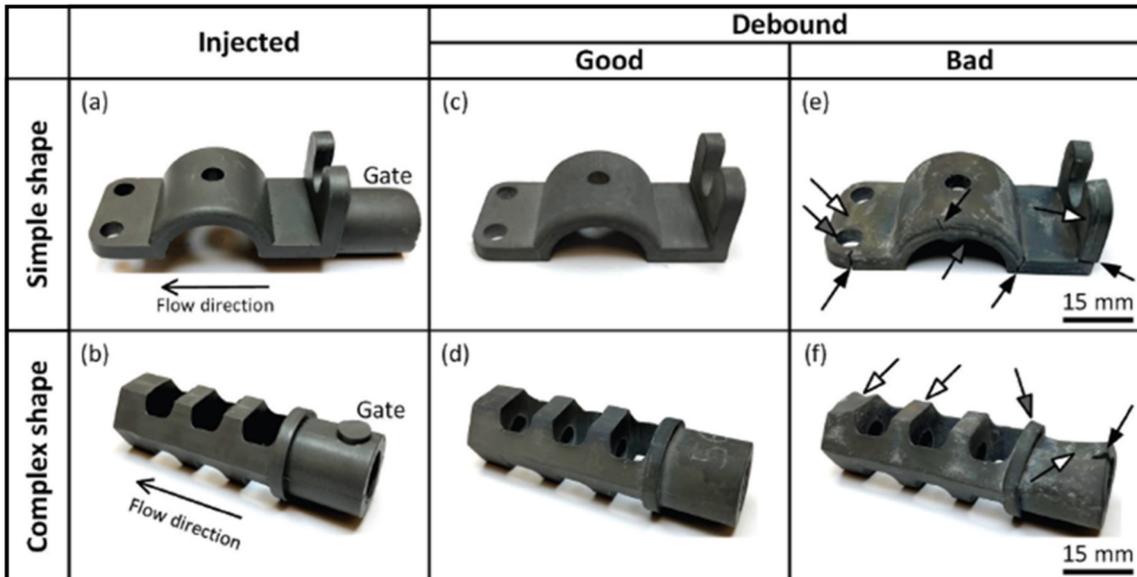


Figure 1.6 Défauts géométriques lors du déliantage sur une pièce simple (a, c et e), et une pièce complexe (b, d, f) obtenus avec un mélange polymère/poudre en LPIM tirée de Demers, (2021)

Il existe trois principaux types de déliantage. Le déliantage par solvant, catalytique et thermique. Lors de cette étape, la pièce est mise soit dans un bassin de solvant (déliantage par solvant) ou dans un four (déliantage thermique) où le liant primaire est d'abord extirpé lentement de la pièce. Ce liant laisse en place un réseau de porosité dans la pièce par lequel les polymères secondaires peuvent s'évaporer et se retirer de la pièce par la suite. Une fois que la pièce est libre de ses polymères, elle peut maintenant être frittée. Il s'agit d'un traitement thermique qui transforme les poudres utilisées en pièce solide. Généralement, le frittage s'effectue à l'état solide entre 70 et 90 % du point de fusion de la poudre. Pour de l'acier inoxydable, cette température se situe généralement . À ce niveau de température, les particules se réarrangent par le transport de masse lors de la diffusion à l'état solide. Les pièces sont

initialement poreuses et les surfaces sont libres. Lorsque la température de la pièce augmente, l'énergie de surface diminue en formant des liens solides entre les particules. Lorsque la température dépasse les 50 % du point de fusion, une diffusion atomique se produit à la surface des particules, ce qui crée des liens solides entre ces particules. Plus la température augmente, plus la diffusion est activée et plus la porosité diminue. À la fin du procédé, les pores sont isolés et la densité de la pièce peut atteindre 99 % de la densité théorique du matériau. Par le fait même, lorsque la porosité est réduite, la pièce rétrécit légèrement. Plus le niveau de polymère est élevé dans la pièce à vert, plus le volume de la pièce finale sera réduit. Une fraction volumique initiale de 65 vol. % de poudre métallique peut engendrer un rétrécissement anisotrope entre 10 et 20 % de la pièce. (Gonzalez-Gutierrez et al., 2018)

1.3 Performances des pièces obtenues par MEX

Cette section présente les performances dimensionnelles et géométriques des pièces à vert produites par MEX recensé dans la littérature. Plusieurs groupes de recherche ont comparé les propriétés mécaniques des pièces produites par le MIM et le MEX avant de conclure que des propriétés similaires pouvaient être obtenues avec ces deux voies de fabrication (Singh et al., 2017; Spiller et al., 2022; Suwanpreecha & Manonukul, 2022). Bien que le procédé MEX soit attractif en termes de liberté de conception, de prototypage rapide et de rentabilité par rapport à d'autres techniques de fabrication additive, il existe très peu d'informations pertinentes sur les propriétés dimensionnelles et géométriques comme la précision et la répétabilité des dimensions produites ainsi que la capacité à produire des caractéristiques imprimées en surplomb. Gaynor et al. (Gaynor & Guest, 2016) ont montré que les angles en surplomb devraient être pris en compte lors des phases d'optimisation topologique. À cet égard, ils ont développé une méthode permettant de réduire les angles en surplomb tout en optimisant la conception d'une poutre en porte-à-faux. L'équipe de van de Ven et al. (van de Ven et al., 2020) ont utilisé une approche similaire pour optimiser des pièces comprenant des angles en surplomb. Cependant, ces deux derniers groupes de recherche n'ont démontré ces nouvelles capacités que par simulations numériques qui n'ont jamais été validées par des impressions 3D

à l'échelle réelle. Kaji et al. (Kaji et al., 2023) ont utilisé un procédé de dépôt d'énergie dirigée par laser robotique pour imprimer des composants tubulaires avec des angles en surplomb variables. L'innovation proposée par ce groupe réside dans l'ajout d'un axe de rotation à la plaque de construction fournissant une rotation de $\pm 90^\circ$ dans l'un des axes, tout en maintenant la buse perpendiculaire à la surface de construction.

1.3.1 Caractéristiques dimensionnelles des pièces à vert

La précision dimensionnelle du procédé d'impression 3D par extrusion avec des polymères hautement chargé en particule métallique n'est pas, encore aujourd'hui, clairement quantifiée où seulement quelques groupes de chercheurs ont tenté d'aborder ce sujet. Dreier et al. (Dreier et al., 2023), chercheurs de la Chaire en Microfluide (Rockstock, Allemagne) ont utilisé l'imprimante ExAM 255 CEM produite par la compagnie AIM3D GmbH qui utilise un extrudeur à vis avec des granules d'un mélange à base de poudres d'oxyde d'aluminium. La viscosité du mélange en fonction de la température de celui-ci utilisé est présentée à la Figure 1.7a. Les pièces imprimées présentées à la Figure 1.7b sont des cubes de 1000 mm^3 fabriqués en utilisant différents multiplicateurs d'extrusion et trois buses de 0.4 mm, 0.6 mm et 0.8 mm de diamètre.

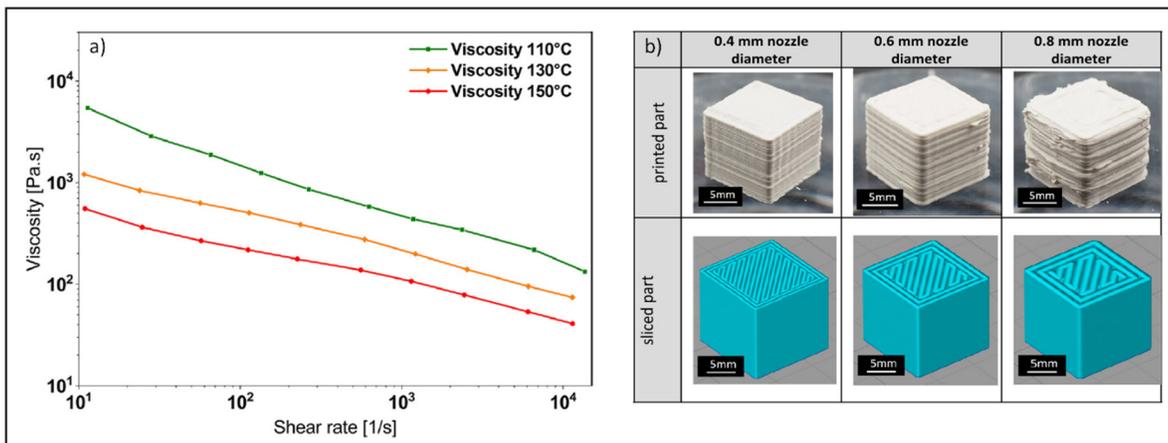


Figure 1.7 (a) Viscosité du mélange à différentes températures et (b) les cubes imprimés tirée de Dreier et al., (2023)

Bien entendu, augmenter le multiplicateur d'extrusion augmente la quantité de matière extrudée lors de l'impression par rapport à la quantité requise théoriquement. La Figure 1.8a confirme que l'augmentation du multiplicateur d'extrusion (noté « EM » sur la figure) produit une augmentation proportionnelle des déviations dimensionnelles. Ces déviations impressionnantes passent de 0.5 mm jusqu'à 3.25 mm. Notons par contre que ces données dimensionnelles ont été mesurées à l'aide d'un pied à coulisse, outil probablement limité pour mesurer ce genre de faibles variations des dimensions. La Figure 1.8b quant à elle démontre que l'augmentation du diamètre de la buse lors de l'extrusion a un impact seulement sur la déviation des dimensions dans le plan XY, soit la largeur et la longueur des pièces. La déviation verticale Z n'est pas affectée par le changement de la buse. La Figure 1.8c démontre l'effet de différentes hauteurs de couche lors de l'impression sur les déviations dimensionnelles. Elle confirme qu'une hauteur de couche de 0.1 mm obtient des déviations minimales à environ 0.25 mm dans toutes les directions, soit dans le plan XY pour la longueur et la largeur et selon l'axe Z pour la hauteur des pièces.

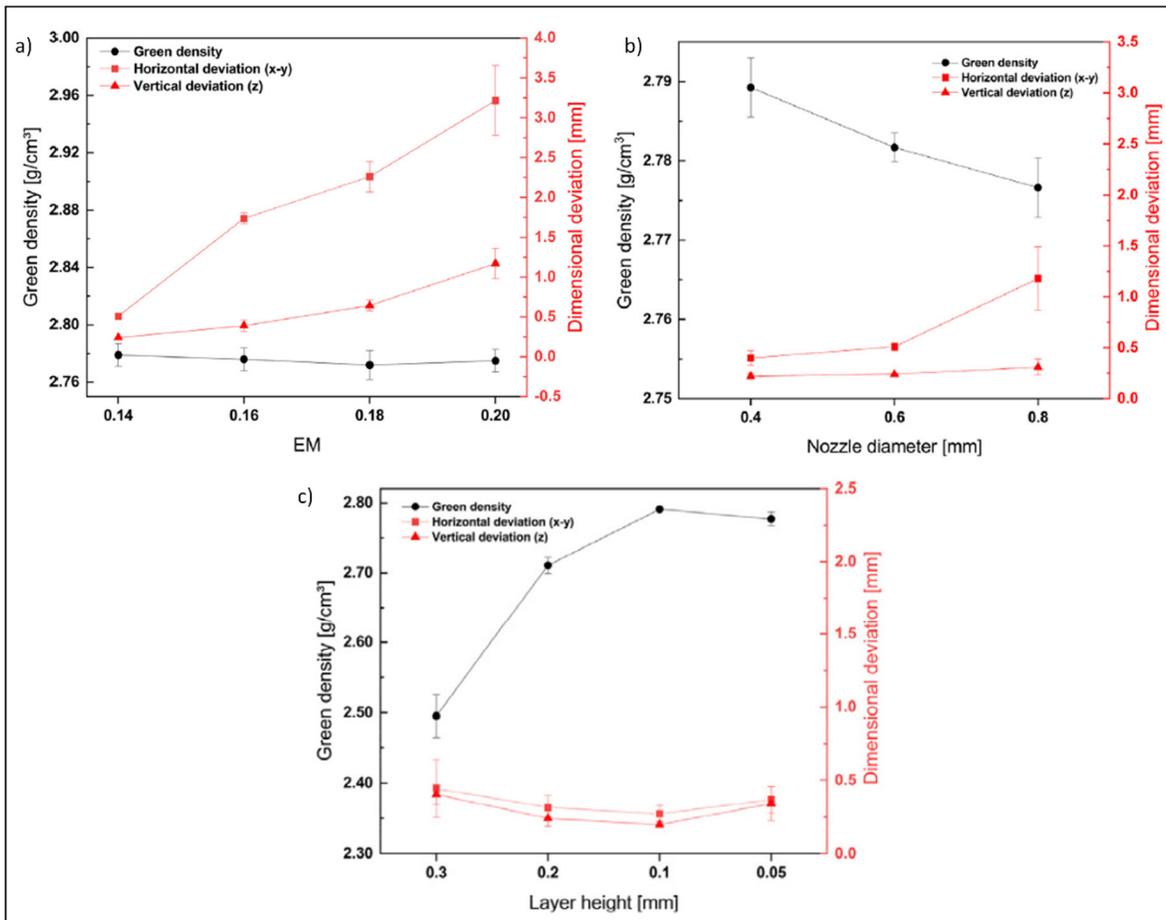


Figure 1.8 (a) Influence du multiplicateur de débit (noté EM), (b) du diamètre de la buse et (c) de la hauteur de couche sur la densité à vert et la déviation dimensionnelle des pièces imprimées
tirée de Dreier et al., (2023)

Un autre groupe de chercheurs en provenance de la Polytechnique de Torino (Italie), ont utilisé le procédé ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing) de la compagnie Markforged afin d'imprimer des cubes à partir d'un mélange à base de 17-4PH (Galati & Minetola, 2019). Ils ont utilisé deux méthodes d'impression schématisées à la Figure 1.9. La première consiste à imprimer les cubes de façon à les remplir complètement (nommé FD « Full Density » par les auteurs). La deuxième méthode consiste à vider partiellement l'intérieur des cubes avec des triangles (nommé TC « Triangular Cell » par les auteurs).

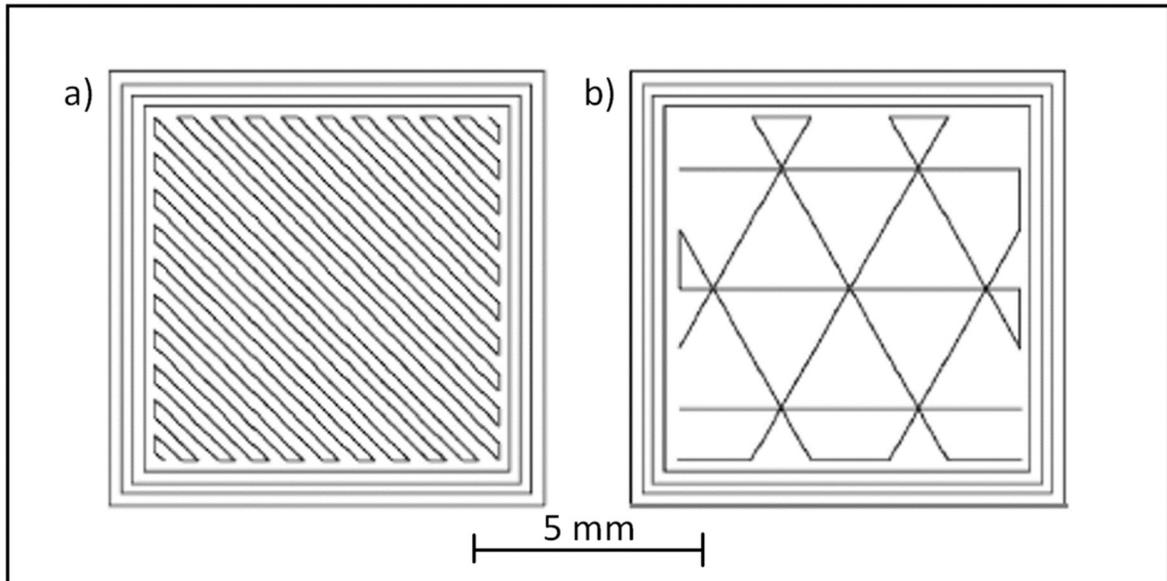


Figure 1.9 Trajets d'outils des impressions (a) de cube plein (FD), et (b) de cube partiellement-vidé (TC)
tirée de Galati & Minetola, (2019)

Ils ont ensuite mesuré les dimensions de chaque cube à l'aide d'un micromètre dans l'état à vert et dans l'état fritté pour compiler les résultats dans le Tableau 1.1. La première colonne identifie les cubes, les trois colonnes suivantes présentent les dimensions mesurées des cubes dans la condition à vert (largeur (w), longueur (l) et hauteur (h)), tandis que les trois colonnes suivantes présentent ces mêmes dimensions à l'état fritté. Pour les cubes plein FD, ils ont obtenu des mesures entre 11.88 et 11.97 mm dans le plan XY de l'impression (largeur et longueur) et des mesures entre 12.00 et 12.03 mm pour la hauteur des cubes à vert. Ciblant une dimension nominale de 12 mm dans les trois axes, l'impression est donc légèrement en dessous des conditions demandées dans le plan XY et légèrement supérieures aux conditions demandées dans la direction Z (hauteur). Bien entendu, ces légères différences se transposent à la pièce frittée. Les cubes FD frittés ont obtenu des dimensions de 9.88 à 9.96 mm dans le plan XY et des dimensions de 10.04 à 10.09 mm dans la direction Z. Au niveau des cubes TC de mêmes dimensions que les cubes FD, ils ont obtenu des mesures de 11.96 à 12.13 mm dans le plan XY et de 12.11 à 12.13 mm dans la direction Z dans l'état à vert. À l'état fritté, ces

dimensions se transposent à des mesures de 9.96 à 10.08 mm dans le plan XY et de 10.25 à 10.29 mm dans la direction Z. Pour les cubes TC2, qui sont les cubes plus gros ciblant une dimension de 23 mm dans les trois axes, les dimensions mesurées sont les suivantes : 22.99 à 23.13 mm pour le plan XY et 23.06 mm pour la hauteur des cubes à vert. Une fois frittés, ils ont obtenu des dimensions de 19.95 à 20.04 mm dans le plan XY et des hauteurs de 20.15 à 20.17 mm. Ces résultats démontrent que les dimensions sont légèrement inférieures à la dimension nominale au niveau de la largeur et de la longueur (plan XY) et des dimensions légèrement supérieures au niveau de la hauteur des cubes.

Tableau 1.1 Dimensions moyennes et écart-type des cubes imprimés et frittés selon les configurations FD (cube plein) et TC (cube semi-vide)
tirée de Galati et al., (2019)

Sample	As-Built Cube			Sintered Cube		
	w [mm]	l [mm]	h [mm]	w [mm]	l [mm]	h [mm]
FD ₁	11.88 ± 0.01	11.96 ± 0.01	12.03 ± 0.01	9.88 ± 0.01	9.95 ± 0.01	10.09 ± 0.01
FD ₂	11.97 ± 0.01	11.96 ± 0.01	12.00 ± 0.01	9.96 ± 0.01	9.95 ± 0.01	10.04 ± 0.01
FD ₃	11.96 ± 0.02	11.95 ± 0.02	12.01 ± 0.02	9.94 ± 0.02	9.93 ± 0.02	10.07 ± 0.01
TC1 ₁	12.03 ± 0.01	12.03 ± 0.02	12.13 ± 0.01	10.06 ± 0.08	10.02 ± 0.05	10.26 ± 0.01
TC1 ₂	12.02 ± 0.02	12.01 ± 0.03	12.11 ± 0.01	10.04 ± 0.04	10.00 ± 0.05	10.29 ± 0.01
TC1 ₃	11.99 ± 0.00	12.13 ± 0.01	12.13 ± 0.01	9.99 ± 0.02	10.08 ± 0.05	10.26 ± 0.00
TC1 ₄	11.99 ± 0.00	12.11 ± 0.08	12.13 ± 0.00	9.99 ± 0.00	10.05 ± 0.12	10.26 ± 0.00
TC1 ₅	12.03 ± 0.03	11.96 ± 0.02	12.13 ± 0.00	10.05 ± 0.07	9.96 ± 0.02	10.25 ± 0.00
TC2 ₁	22.99 ± 0.01	23.13 ± 0.03	23.06 ± 0.01	19.97 ± 0.02	20.04 ± 0.11	20.15 ± 0.00
TC2 ₂	23.05 ± 0.02	23.10 ± 0.08	23.06 ± 0.00	20.03 ± 0.02	20.02 ± 0.11	20.15 ± 0.01
TC2 ₃	22.99 ± 0.06	23.13 ± 0.05	23.06 ± 0.01	19.97 ± 0.05	20.04 ± 0.09	20.16 ± 0.01
TC2 ₄	22.98 ± 0.02	23.10 ± 0.06	23.06 ± 0.01	19.95 ± 0.06	20.02 ± 0.09	20.17 ± 0.00
TC2 ₅	22.99 ± 0.05	22.95 ± 0.08	23.06 ± 0.01	20.01 ± 0.09	19.98 ± 0.04	20.15 ± 0.00

Un autre groupe de chercheurs (Côté et al., 2023) a évalué l'influence de la hauteur de couche ainsi que du chevauchement lors de l'impression MEX sur les performances dimensionnelles des pièces. Les pièces en question dans cette recherche sont des carrés vides. La Figure 1.10 présente les résultats obtenus sur les carrés au niveau des dimensions externes de ceux-ci ainsi que sur la hauteur de chaque carré. Au niveau des dimensions externes, la déviation est minimale pour une hauteur de couche de 0.1 mm et un pourcentage de chevauchement de 20-

25 % pour une déviation dimensionnelle de seulement 10 μm (comparativement à 30-140 μm obtenue précédemment par Galati and Minetola (2019)). Au niveau de la hauteur, la déviation maximale est de -30 μm pour une hauteur de couche de 0.1 mm avec un chevauchement de 15 %. La hauteur de couche de 0.1 mm est donc encore une fois le paramètre à choisir afin d'augmenter la précision lors de l'impression.

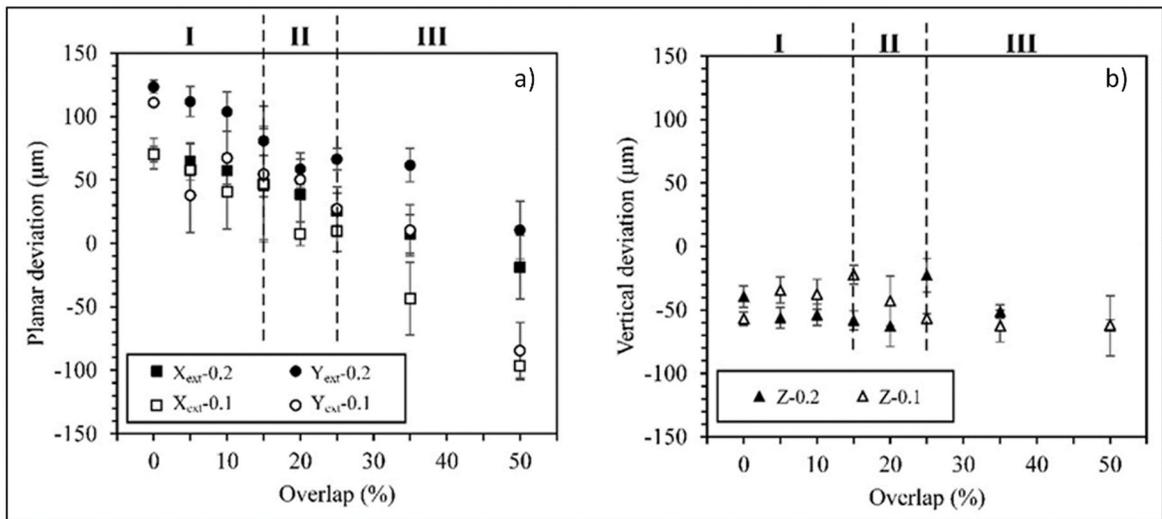


Figure 1.10 Déviation dimensionnelle (a) des dimensions externes et (b) de la hauteur en fonction de la hauteur de couche et du chevauchement lors de l'impression tirée de Côté et al., (2023)

1.3.2 Caractéristiques géométriques des pièces produites par MEX

Un groupe de chercheurs de l'École polytechnique de Milan ont utilisé l'imprimante Studio System de Desktop Metal afin d'imprimer des géométries complexes avec des polymères hautement chargés en particule de 17-4 PH (Parenti et al., 2022). Ces géométries sont composées de gyroïdes en trois dimensions qui comprennent des murs minces, des formes sphériques et des angles de surplombs, comme démontré à la Figure 1.11a-c. Ce type de structure requiert généralement l'utilisation de support lors de l'impression (indiqué en violet sur la Figure 1.11a-b) afin de pouvoir imprimer les sections ayant des angles de surplomb

supérieur à 55°. Cependant, les chercheurs ont trouvé une manière d'éviter l'utilisation de ceux-ci afin de réduire le temps d'impression et la complexité des étapes de retraits de ces supports. Cette méthode consiste à ajouter $\frac{1}{4}$ de cellule de chaque côté de la pièce (Figure 1.11d, e). Avec cette portion de cellule, les endroits où les angles de surplomb étaient critiques deviennent imprimables sans support. Ils ont conclu que la pièce était imprimable avec des murs supérieurs à 1 mm d'épaisseur, mais qu'il était aussi possible d'obtenir des murs plus minces si la longueur de chaque cellule ne dépassait pas 15 mm. Bien qu'ils aient réussi à imprimer la géométrie complexe sans l'utilisation de support, cette géométrie a tout de même été modifiée afin d'être réalisable. Ces angles de surplomb sont difficiles à imprimer avec le procédé MEX.

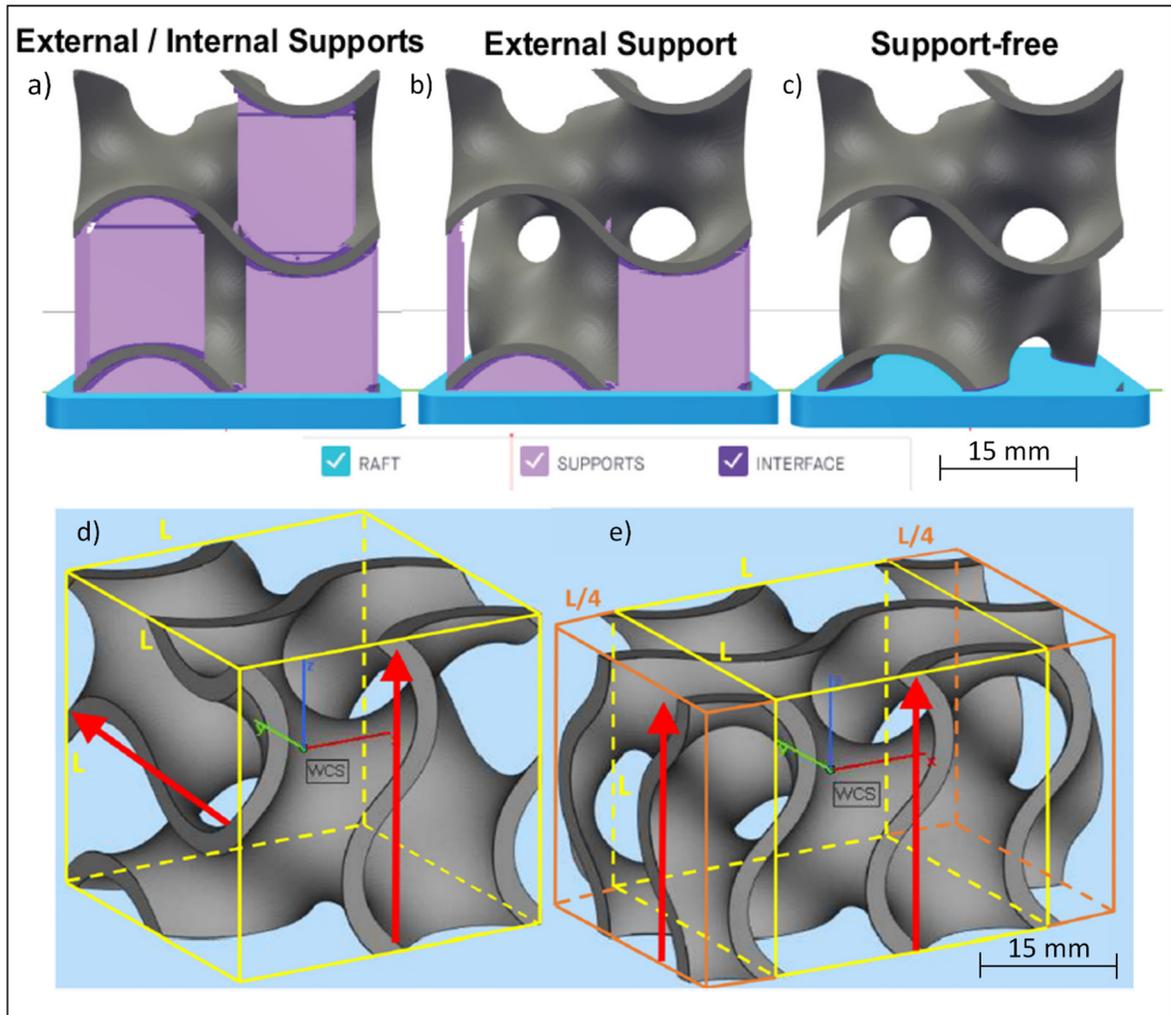


Figure 1.11 Impression d'une cellule gyroïde selon (a-c) trois différentes stratégies, ou l'utilisation d'une configuration (d) de cellule unique et (e) de cellule étendue 1.5x tirée de Parenti et al., (2022)

Un autre groupe de chercheurs de l'Université des Technologies de Troyes, en France, ont étudié la faisabilité d'un support de moteur d'avion avec le procédé MEX (Kauffmann et al., 2022). Ils ont utilisé l'imprimante Metal X de la compagnie Markforged avec un polymère hautement chargé en poudre d'acier 17-4PH. La Figure 1.12 présente la pièce qu'ils ont imprimée et évaluée. Les dimensions indiquées sur l'image (notées « a » à « f ») sont présentées dans le graphique de la Figure 1.12, où la déviation dimensionnelle est obtenue

expérimentalement par une numérisation 3D de la pièce. Ils ont utilisé deux numériseurs différents afin de mesurer la pièce et de la comparer au fichier CAD initial. Un numériseur Einscan SP à lumière structuré avec une précision de 50 μm et un numériseur LC60Dx au laser avec une précision de 9 μm . En se basant sur le numériseur LC60Dx, qui offre une précision supérieure, ils ont obtenu des déviations de 0.41 % (31 μm), -0.22 % (-80 μm), 1.20 % (700 μm), 0.92 % (610 μm), -0.22 % (-10 μm) et 0.04 % (1 μm) pour les dimensions a , b , c , d , e et f reportées sur la Figure 1.12. Ils ont donc obtenu d'excellents résultats au niveau dimensionnel et géométrique avec cette imprimante sauf pour les dimensions c et d qui ont montré des déviations dimensionnelles submillimétriques. De plus, il est mentionné que les déviations des angles de surplomb ont été retirées de l'analyse puisqu'il y avait une trop grande incertitude de mesure. Bien que certaines de leurs déviations soient faibles, la répétabilité de leur mesure est tout de même à revoir. Ils ont donc eu des difficultés au niveau dimensionnelle ainsi que géométrique avec leur impression.

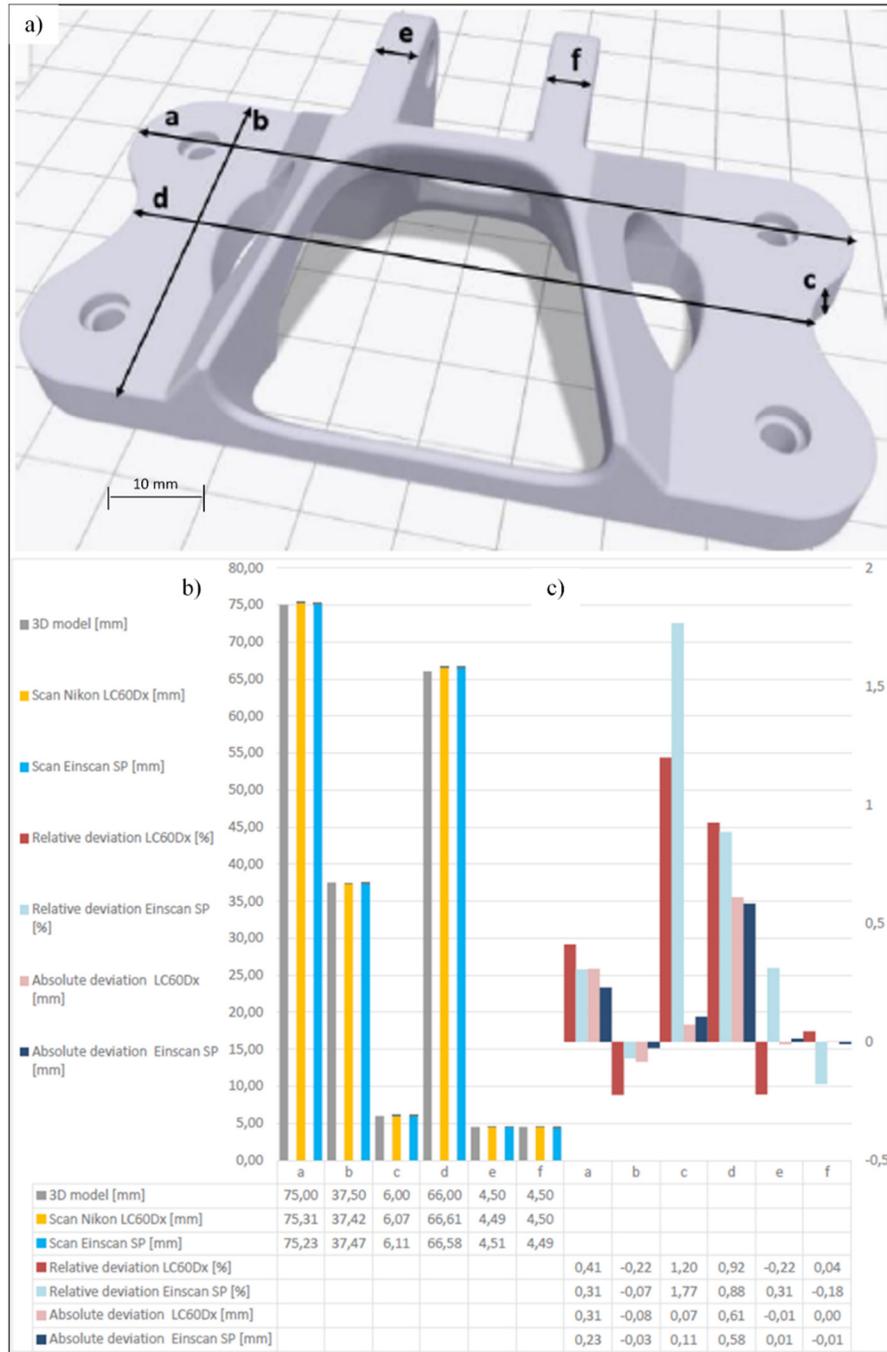


Figure 1.12 Modèle 3D du support initial (a) ainsi que les mesures obtenues avec les numériseurs (b) et leurs déviations (c) tirée de Kauffmann et al., (2022)

La revue de littérature a donc permis de comprendre l'état du procédé d'impression 3D MEX et d'établir les lacunes sur lesquels une amélioration est nécessaire. Il est évident que la variation des tolérances dimensionnelles des pièces est beaucoup trop grande pour assurer une fiabilité ainsi qu'une répétabilité des résultats. Des déviations allant de 300 μm à 1200 μm dans plusieurs cas ne permettent pas de rentabiliser le procédé étant donné que des étapes de post-traitements s'ajoutent afin de corriger les pièces obtenues. De plus, il est établi que les géométries complexes comprenant des angles de surplomb sont problématiques dans l'impression par extrusion. Les supports entraînent des coûts supplémentaires dans la fabrication, ou bien les géométries ne permettent simplement pas de les retirer facilement. La limite de ces angles de surplomb n'étant pas quantifiée, il est difficile de quantifier les performances et les capacités d'impression afin d'éviter ces supports. C'est ce qui amène à la problématique présentée à la section suivante.

CHAPITRE 2

PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

2.1 Problématique

La revue de la littérature présentée dans ce travail montre les possibilités intéressantes d'impression 3D en utilisant le procédé d'extrusion de matière MEX. Cependant, les capacités dimensionnelles et géométriques des mélanges polymère-poudre métalliques sont, jusqu'à maintenant, généralement traitées en second rang ou simplement non quantifiées. De plus, l'utilisation d'un mélange MIM à faible viscosité n'est pas souvent envisagée. Bien entendu, une pièce fabriquée par MEX subit ensuite des étapes de post-traitement comme le déliantage et le frittage, pour ensuite subir de l'usinage afin d'obtenir des finis de surface adéquate ainsi que des dimensions précises répondant à des critères plus serrés. Cette solution est viable, mais ajoute des étapes à valeur non ajoutée dans le procédé. De plus, la complexité des pièces obtenues par impression 3D peut compliquer ou simplement rendre impossibles les étapes d'usinages en post-traitement. Bien que quelques groupes de recherche dans le monde aient exploré des moyens d'imprimer des pièces avec des angles en surplomb (en ajoutant un quatrième axe au système ou en réduisant les supports), la capacité du procédé MEX à imprimer des surplombs sans utiliser de supports n'a pas été démontrée expérimentalement. De plus, les propriétés dimensionnelles en termes de précision et répétabilité ne sont pas encore clairement établies dans la littérature savante. La Figure 2.1 illustre schématiquement la problématique soulevée dans ce projet où les caractéristiques dimensionnelles (A) et géométriques (θ) ne sont pas encore bien quantifiées dans la littérature.

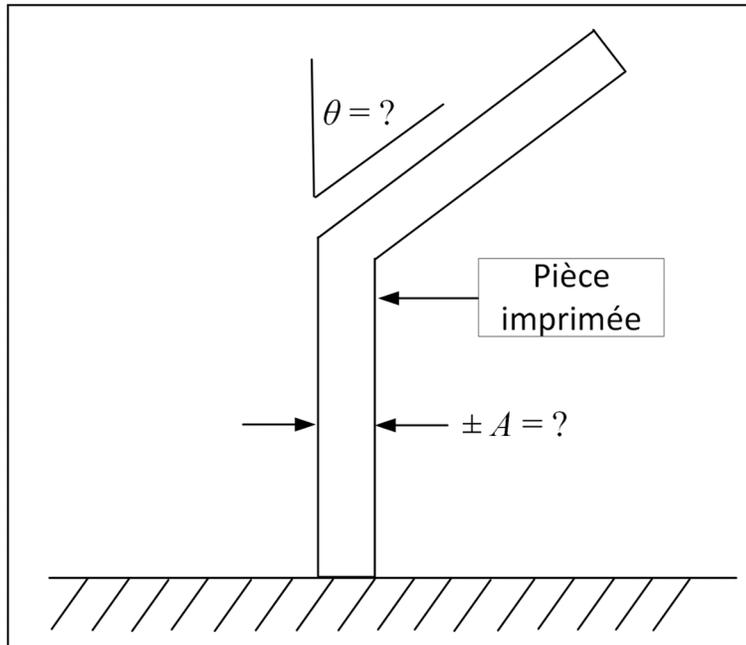


Figure 2.1 Schéma d'une pièce imprimée illustrant la problématique de ce projet, où les caractéristiques dimensionnelles (A) et géométriques (θ) ne sont pas encore bien connues

2.2 Objectifs

L'objectif principal de ce projet est d'évaluer les caractéristiques dimensionnelles et géométriques de différents mélanges de polymère hautement chargés en particule métallique à basse viscosité lors du procédé d'impression 3D par extrusion sur les pièces à vert imprimées. Afin d'atteindre l'objectif global, les sous-objectifs suivants seront évalués :

- Étudier la capacité de différentes imprimantes et mélanges à produire des pièces exhibant des angles en surplomb
- Quantifier l'angle en surplomb maximal pouvant être produit avec une nouvelle gamme de mélanges à basse viscosité.
- Quantifier la précision dimensionnelle des pièces à vert produites par le procédé MEX
- Évaluer la capacité d'imprimer des formes complexes avec des angles de surplomb à partir des mélanges basses viscosités

De plus, un second objectif était présent initialement dans ce projet. Cet objectif était de valider les performances en termes de tolérance dimensionnelle et géométrique en utilisant les mélanges de polymères/poudres fabriqués à l'ÉTS dans l'imprimante commerciale. Pour y arriver, une presse à injection a été fabriquée afin d'obtenir les tiges utilisées dans l'imprimante commerciale. Cependant, cet objectif n'a plus été réalisé par faute de liberté dans les paramètres de cette imprimante.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

Cette section présente les différentes étapes de la méthodologie détaillant la fabrication du mélange polymère-poudre métallique à basse viscosité, la géométrie des pièces utilisées pour évaluer les performances d'impression, les types d'imprimantes utilisées ainsi que le plan de tests.

3.1 Préparation des mélanges poudre-liant

Deux mélanges poudre-liant ont été utilisés dans le cadre de ce projet. Le premier mélange à faible viscosité est utilisé avec l'imprimante à piston et sera nommé « mélange ÉTS » dans ce document. Il est composé de poudre d'acier inoxydable 17-4PH (65 vol. %) illustrée à la Figure 3.1a, et d'un liant composé de cire de paraffine (23 vol. %), d'acide stéarique (2 vol. %) et d'éthylène-acétate de vinyle (10 vol. %). Cette poudre atomisée à l'eau (Epson Atmix Corporation) présente une distribution granulométrique (Figure 3.1b) caractérisée par un $D_{10} = 3.4 \mu\text{m}$, un $D_{50} = 11.8 \mu\text{m}$ et un $D_{90} = 31.3 \mu\text{m}$ mesurés à l'aide d'un analyseur de granulométrie par diffraction laser LS 13320 XR (Beckman Coulter). Le mélange a été chauffé à 90 °C sous vide pendant 3 minutes afin l'homogénéiser et éliminer les bulles d'air présentes dans le mélange. Ces constituants du liant ont été sélectionnés pour le procédé MEX, car ils sont souvent utilisés dans la MIM à basse pression. La cire de paraffine est couramment utilisée dans la MIM comme média de transport pour la poudre, tandis que l'acide stéarique et l'éthylène-acétate de vinyle sont généralement utilisés comme agent tensioactif et épaississant, respectivement. Le deuxième mélange à faible viscosité est utilisé avec l'imprimante commerciale à tige et sera nommé « mélange commercial » dans ce document. Il est composé de la même poudre 17-4PH, mais la proportion des constituants, la granulométrie de la poudre et la nature chimique du liant n'ont pas été divulguées par le fournisseur Desktop Metal. Les profils de viscosité présentés ont été obtenus à une température comprise entre de 70-175°C à

l'aide d'un rhéomètre rotatif MCR 302 (Anton Paar) équipé d'une configuration de cylindre et de coupelle de mesure (CC-17) placée dans un système de mesure à température contrôlée (C-PTD 200).

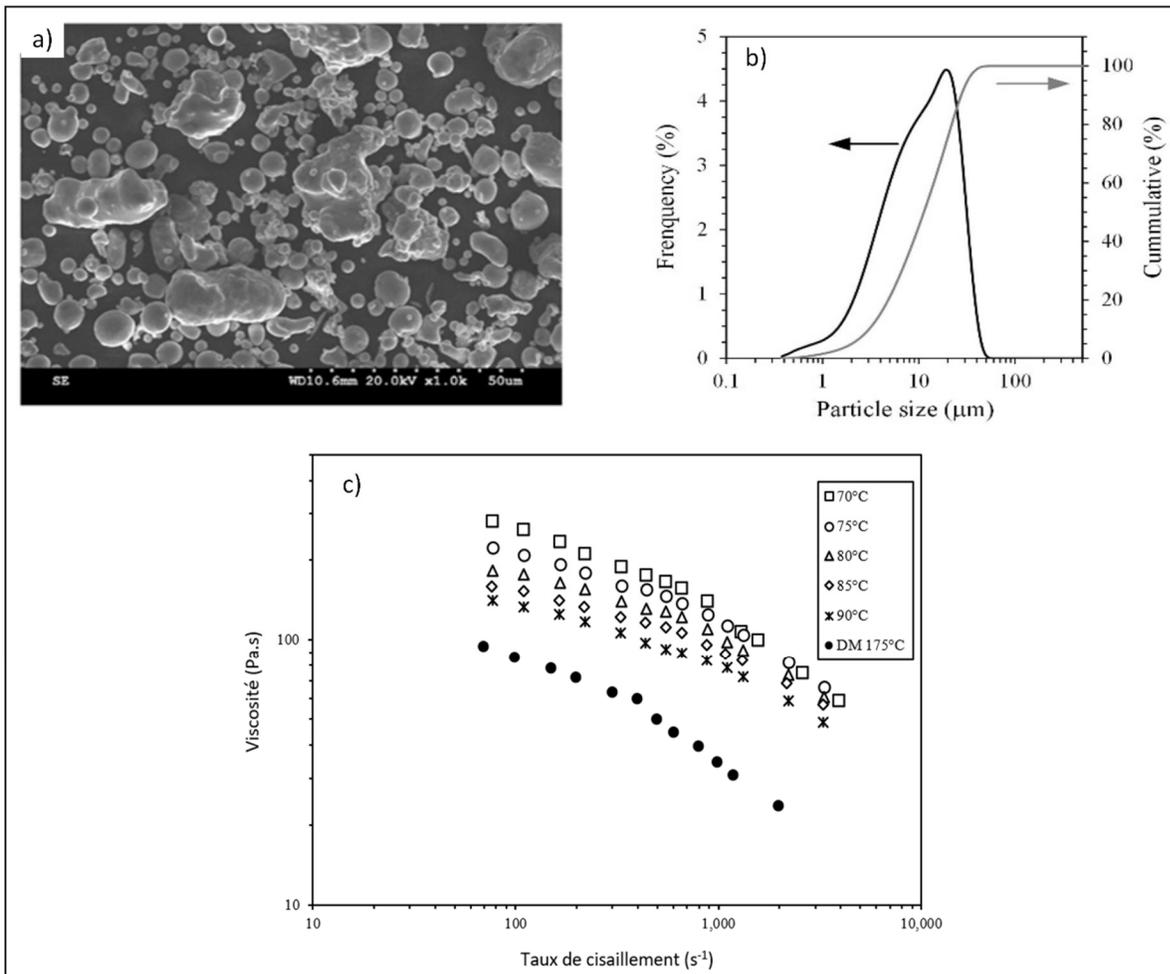


Figure 3.1 (a) Image MEB de la poudre 17-4PH utilisé dans le mélange ÉTS ainsi que le graphique de la PSD (b) et (c) profil de viscosité des mélanges ÉTS et du mélange commercial

3.2 Types d'imprimantes et pièces imprimées

Deux imprimantes différentes ont été utilisées pour imprimer les pièces qui seront ensuite caractérisées en termes de leur dimension et de leur géométrie. La première imprimante présentée à la Figure 3.2a est un équipement en cours de développement à l'ÉTS et bien adapté aux mélanges à faible viscosité. Cette imprimante à piston utilise directement un mélange poudre-liant à l'état liquide pour éviter la fabrication de sous-produits tels que des granulés, des filaments ou des tiges. Le logiciel de découpe Cura (Ultimaker) a été utilisé pour obtenir le code G à partir d'un fichier STL de l'objet désiré. La Figure 3.2b schématise les différentes composantes de l'imprimante en développement. La plaque de construction, l'extrudeur et la buse ainsi que le piston linéaire inversé sont indiqués à l'aide de flèche noire. La première étape pour utiliser cette imprimante consiste à retirer la tête d'extrusion et de placer le bol mélangeur au-dessus du piston. Lorsque la température d'utilisation est atteinte, le mélange poudre-liant préchauffé y est inséré afin de le mélanger sous vide et d'uniformiser la température. Ensuite, le mélange est ramené à la pression atmosphérique afin de descendre le piston et de remplir la chambre de celui-ci avec le mélange. Puis, le bol mélangeur est retiré et la tête d'extrusion est remise en place. L'imprimante est maintenant prête à produire des pièces. Lorsqu'elle est mise en fonction, le piston remonte en fonction du débit demandé et le mélange est acheminé dans la tête d'extrusion jusqu'à la buse. Cette tête demeure immobile pendant que la plaque de construction s'approche et effectue les déplacements selon les axes X, Y et Z afin de construire les pièces, couche par couche. Les paramètres d'impressions sont indiqués plus bas dans le Tableau 3.2.

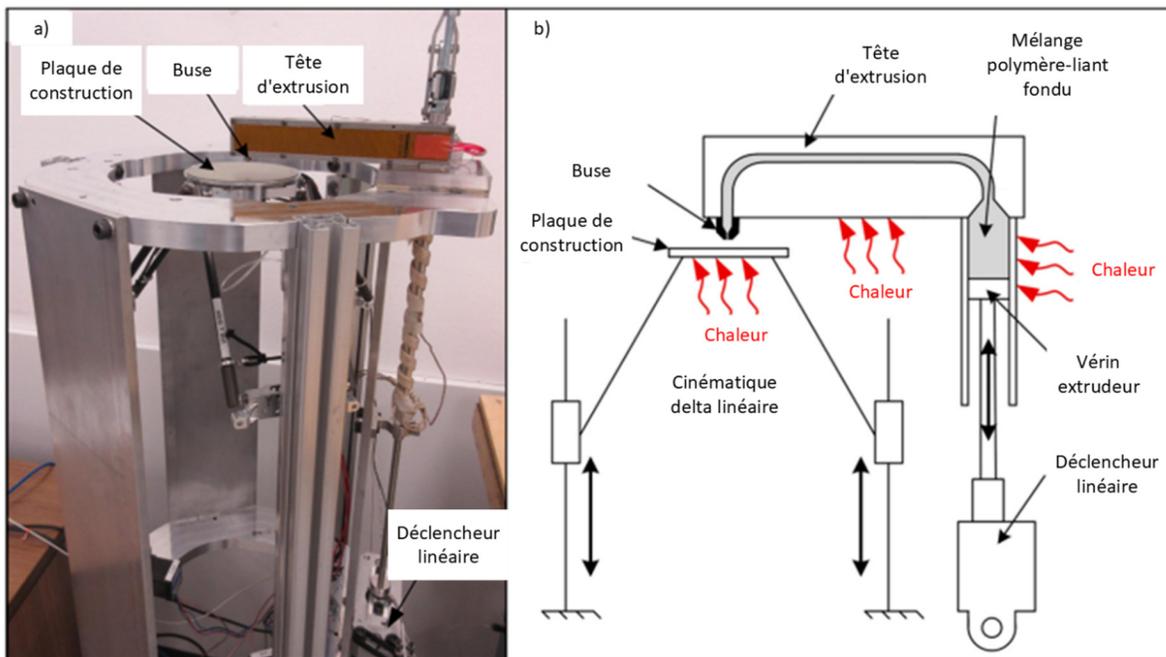
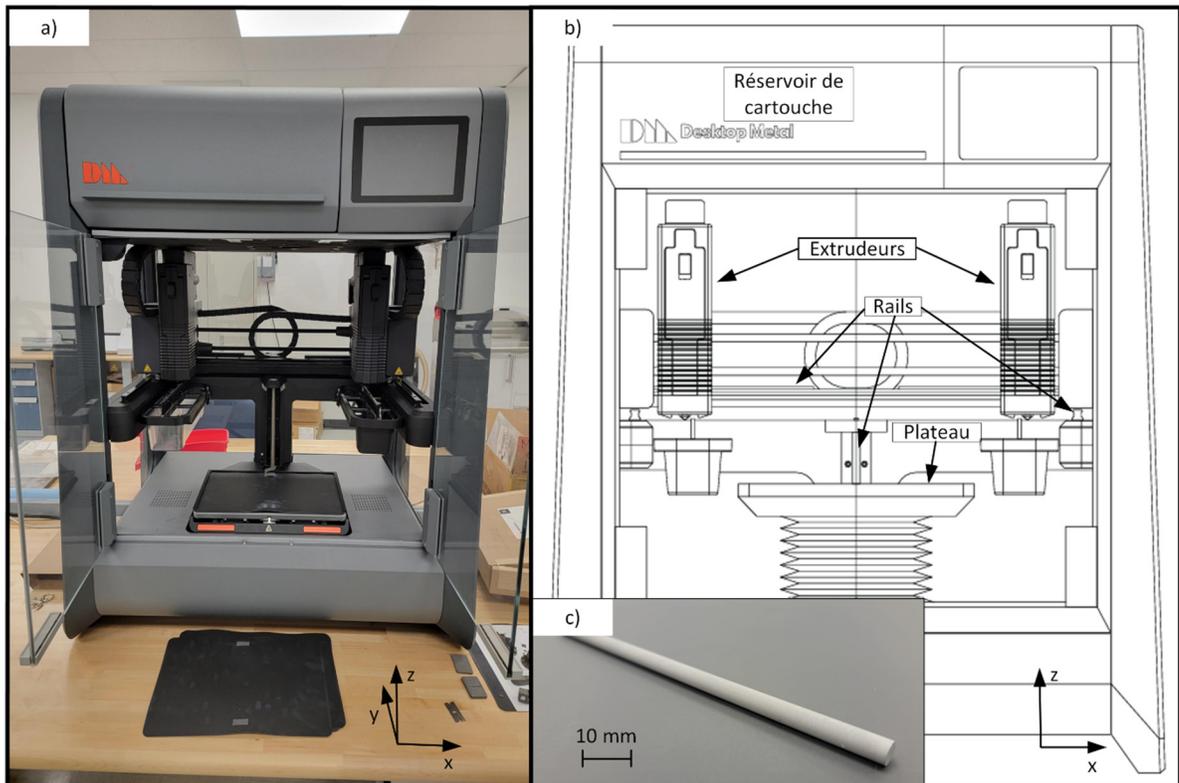


Figure 3.2 (a) Image de l'imprimante en développement de l'ÉTS et (b) une vue de coupe expliquant son fonctionnement tirée de Miclette et al., (2022)

La deuxième imprimante présentée à la Figure 3.3a est le Studio System 2 (Desktop Metal), bien adapté aux mélanges possédant de hautes fractions volumiques de poudre. Cette imprimante utilise un sous-produit sous forme de tige qui est fournie par le fournisseur ($\varnothing 6 \times 150$ mm de long, montrés à la Figure 3.3b, puis placés dans des cartouches, et alimentés à l'imprimante de manière similaire à l'approche MEX basée sur le filament. Dans le cas de cette imprimante, c'est l'extrudeur qui effectue les mouvements dans les axes X et Y et la plaque de construction effectue les déplacements en Z. L'extrudeur se déplace sous la cartouche contenant les tiges afin de recevoir une tige de mélange poudre-liant. Une fois l'extrudeur chargé, il effectue une pression sur la tige afin de la forcer à descendre vers la buse de celui-ci tout en appliquant la température d'extrusion. La tige solide devient à l'état liquide graduellement jusqu'à ce qu'elle soit extrudée de la buse. Lorsque la tige est complètement utilisée, l'extrudeur retourne sous la cartouche afin d'être rechargé et ainsi de suite. Cette

imprimante commerciale utilise le logiciel Fabricate de Desktop Metal pour découper la pièce et créer le code G. La Figure 3.3c présente les différentes composantes de l'imprimante. La plaque de construction, les deux extrudeurs ainsi que le système de rail y sont indiqués. L'avantage d'utiliser une imprimante comprenant deux extrudeurs est qu'il devient possible d'imprimer des matériaux différents dans une même pièce. Dans le cas présent, le premier extrudeur contient le mélange de polymère et d'acier inoxydable, tandis que le deuxième extrudeur contient un mélange de polymère et de céramique. Par exemple, cette céramique peut servir d'intercouche entre des sections de pièce afin que ceux-ci soient séparés lors des étapes de déliantage et de frittage.



La première pièce utilisée dans ce projet est un prisme simple à base rectangulaire présenté à la Figure 3.4a-c ayant trois dimensions différentes afin de bien identifier les axes X, Y et Z

lors de l'impression. Les dimensions sont de 15 mm de longueur, 8 mm de largeur et 10 mm de hauteur. Cette pièce a été imprimée sur les deux imprimantes, dans plusieurs configurations différentes afin de quantifier les performances dimensionnelles des mélanges à basses viscosités. La deuxième pièce présente un angle en surplomb (θ) variant de 45 à 85° (Figure 3.4d-f). Au cours des tests préliminaires, cette pièce a été utilisée pour quantifier les angles limite pouvant être imprimés à l'aide de l'imprimante commerciale puisqu'elle présente une gradation constante des angles de surplomb. En raison du temps d'impression prolongé et des problèmes de manipulation rencontrés avec cette pièce, il a été décidé d'abandonner cette dernière et de plutôt effectuer les phases d'optimisation en utilisant deux autres géométries. Une pièce prismatique (Figure 3.4g-i) et une pièce axisymétrique (Figure 3.4j-l) ont donc été conçues avec différents angles en surplomb (θ) variant de 60 à 85° en utilisant un incrément progressif de 2.5°. Le but de ces tests était de quantifier la limite géométrique pour produire, sans supports, des surplombs en utilisant ces deux imprimantes MEX. Ces deux pièces ont également été utilisées pour quantifier l'influence du chemin d'outil sur la capacité à imprimer des caractéristiques en surplomb. En effet, un chemin d'outil d'impression en ligne droite a été utilisé lors de l'impression de la pièce prismatique (Figure 3.4g-i), tandis qu'une extrusion non interrompue et un chemin d'outil circulaire continu ont été utilisés lors de l'impression de la pièce axisymétrique (Figure 3.4j-l).

Les pièces sélectionnées jouent chacune un rôle précis dans les démarches de ce projet et les critères évalués en diffèrent. Pour la pièce arquée, la pièce prismatique et la pièce axisymétrique, l'objectif de ces pièces est de déterminer leurs imprimabilités et de trouver la limite imprimable des angles de surplomb avec des paramètres standards et des paramètres avancés présentés au Tableau 3.2. Les pièces sont donc imprimées et observées afin de déterminer l'angle maximal à partir duquel les faces qui se retrouvent en dessous des angles de surplomb ne deviennent plus utilisables. C'est-à-dire à partir du moment où l'intégrité de la pièce est compromise. Pour la pièce arquée, une observation à l'œil nu suffira, puisque cette pièce sert de point de départ à partir duquel les paramètres standards ont atteint leur limite. Pour la pièce prismatique et la pièce axisymétrique, un microscope électronique à balayage

(Nikon SMZ800N) sera utilisé afin de mieux comprendre l'état de la surface de l'angle de surplomb.

Les pièces en forme de prisme rectangulaire n'ont pas la même utilité. Bien que l'intégrité de la pièce et son aspect visuel seront aussi évalués, l'objectif derrière ces impressions est de déterminer la précision par laquelle les imprimantes reproduisent les géométries demandées. Ces dimensions seront donc évaluées à l'aide d'une CMM Mitutoyo 7106 et d'un numériseur optique Metris LC-50 afin de pouvoir extraire les dimensions précises des pièces obtenues avec les deux imprimantes.

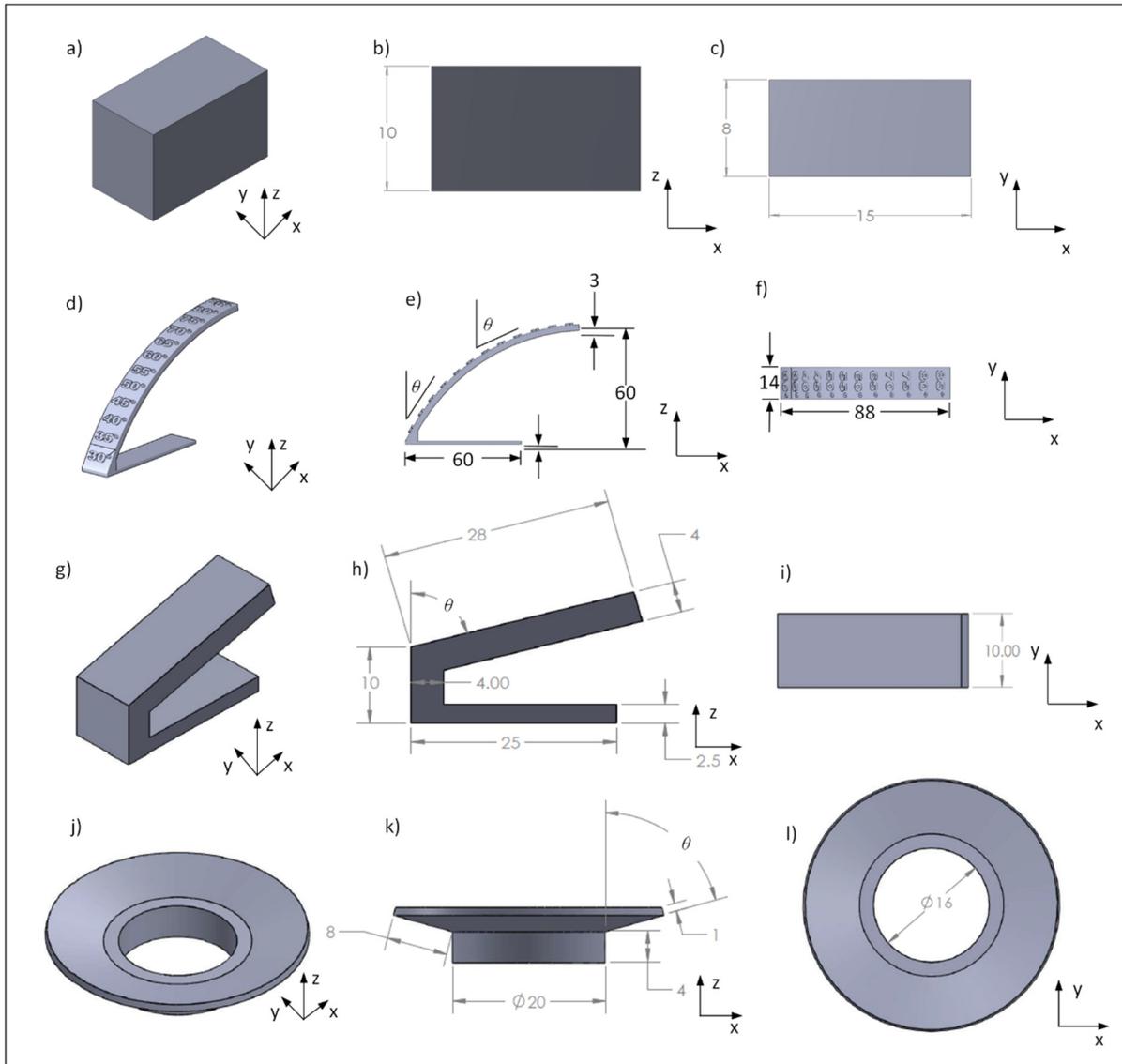


Figure 3.4 Vue isométrique, de côté et de dessus des (a-c) pièces rectangulaires (d-f) pièces arquées (tirée de <https://www.thingiverse.com/thing:2442722>) (g-i) pièces prismatiques et (j-l) pièces axisymétriques.

3.3 Paramètres d'impression MEX

Les paramètres d'impressions varient en fonction de la technologie d'impression MEX utilisée ainsi que du matériau imprimé. De plus, les géométries nécessitent des variations de ces paramètres afin d'améliorer les finis de surface et l'imprimabilité des pièces complexes. Dans

le cas d'une impression par extrusion avec des polymères hautement chargés en particule métallique, les paramètres comme la température d'extrusion et la température de la plaque de construction sont inférieurs à celles des procédés utilisant des poudres métalliques directement comme le LPBF puisque ce n'est que le liant polymérique qui est en phase liquide et non le métal directement. Les paramètres d'impressions demandent donc moins d'énergie pour ce type d'impression.

Des essais préliminaires ont été effectués afin de se familiariser avec l'imprimante commerciale et ainsi déterminer avec quels paramètres chaque pièce allait être imprimée. Le tableau suivant résume les différents essais qui ont été effectués afin d'établir les paramètres optimisés sur cette imprimante. L'ordre des impressions, le type de paramètre ainsi que la plage de ceux-ci et l'objectif derrière chacun des essais sont présentés.

Tableau 3.1 Essais préliminaires sur l'imprimante commerciale

Ordre des essais	Type de paramètre	Variation du paramètre	Objectifs
1	Hauteur de couche	0.1 mm à 0.3 mm	Déterminer la hauteur de couche qui donne des tolérances dimensionnelles optimales et qui permet des angles de surplomb plus prononcé
2	Vitesse d'impression	10 mm/s à 30 mm/s	Déterminer la vitesse d'impression qui va permettre l'extrusion la plus répétable
3	Ordre d'impression	Mur avant/après remplissage	Déterminer si l'ordre d'impression aide à l'extrusion des géométries complexes comme des angles de surplomb sans support
4	Diamètre théorique de buse	0.40 mm à 0.48 mm	Déterminer si le paramètre par défaut de l'imprimante donne de meilleurs résultats sur les tolérances dimensionnelles ainsi que sur les performances géométriques
5	Chevauchement	15 % à 30 %	Déterminer l'impact du chevauchement sur la qualité de la pièce ainsi que sur la précision des dimensions

Le Tableau 3.2 présente les différents paramètres utilisés lors des impressions des différentes pièces de ce projet. Les trois premières lignes du tableau représentent les paramètres de l'imprimante commerciale. Tout d'abord, les paramètres recommandés par la compagnie

Desktop Metal ont été implémentés et ensuite, des paramètres optimisés ont été développés afin d'améliorer les capacités d'impression des pièces comprenant des angles de surplomb. La troisième ligne présente des paramètres simplifiés afin d'imprimer les prismes rectangulaires. La quatrième ligne, quant à elle, démontre les paramètres de l'imprimante ÉTS optimisés lors de précédents travaux (Miclette et al., 2022).

La pièce arquée utilise les paramètres par défaut de l'imprimante industriel. L'objectif derrière cette pièce est de déterminer la limite imprimable des angles de surplomb avec les paramètres recommandés par le fabricant. Ces paramètres sont donc indiqués à la ligne identifiée aux paramètres standards de l'imprimante commerciale du Tableau 3.2. Ensuite, la pièce prismatique ainsi que la pièce axisymétrique utilisent les paramètres de base utilisés pour la pièce arquée afin de valider l'impressionnabilité de différentes pièces avec ces paramètres. Une fois ces pièces obtenues, les paramètres ont été optimisés à la ligne 2 des paramètres de l'imprimante commerciale du Tableau 3.2. Ces paramètres sont utilisés afin d'obtenir un angle de surplomb encore prononcé que ceux avec les paramètres standards. Une fois les pièces imprimées avec l'angle de surplomb maximal, ils ont été imprimés sur l'imprimante en développement avec les mêmes paramètres afin d'évaluer les performances d'un deuxième mélange à basse viscosité.

Les paramètres utilisés pour les pièces rectangulaires sont présentés aux lignes 3 et 4 du Tableau 3.2. Étant donné la forme simple imprimée, les paramètres de chevauchement ainsi que les paramètres sur la séquence d'impression sont standards. Les températures d'impression demeurent identiques aux paramètres recommandés par les imprimantes puisque le point de fusion des mélanges reste le même. Des chercheurs (Dreier et al., 2023) ont démontré qu'au niveau de la précision dimensionnelle, la hauteur de couche permettant une déviation minimale est de 0.1 mm. Pour ce fait, les deux imprimantes vont utiliser une hauteur de couche de 0.1 mm pour imprimer les pièces rectangulaires afin de limiter la déviation. Pour le diamètre théorique de la buse, l'imprimante en développement utilise le diamètre réel de 0.40 mm. Cependant, les paramètres recommandés pour l'imprimante commerciale proposent un

diamètre de buse théorique de 0.48 mm. Ce diamètre théorique va donc être utilisé pour imprimer les cubes, mais une deuxième série de cubes sera imprimée avec un diamètre théorique de 0.40 mm à des fins de contre-vérification.

Tableau 3.2 Paramètres d'impression

Imprimantes	Impression		Température		Intérieur en premier	Chevauchement (%)	Théorique $\varnothing_{\text{nozzle}}$ (mm)	Pièces utilisant les paramètres indiqués
	Vitesse (mm/s)	Hauteur de couche (mm)	Mélange (°C)	Plaque de construction (°C)				
Imprimante commerciale paramètres recommandés	30	0.15	175	65	non	15	0.48	Pièce arquée, prismatique, axisymétrique
Imprimante commerciale Paramètres optimisés	25	0.10	175	65	oui	30	0.40	Pièce prismatique et axisymétrique
Imprimante commerciale Paramètres simplifiés	25	0.10	175	65	non	15	0.40 - 0.48	Prisme rectangulaire
Imprimante ÉTS	15	0.10	85	53	n/a	n/a	0.40	Pièce prismatique, axisymétrique, prisme rectangulaire

Les trajets que les buses des extrudeurs empruntent sont entièrement dépendants de la géométrie des pièces et des paramètres utilisés. La Figure 3.5a, c et e montrent les trajets d'outils en utilisant les paramètres recommandés du logiciel Fabricate de Desktop Metal. Les Figure 3.5b et d représentent les trajets d'outils optimisés. Les murs internes et externes, le remplissage interne ainsi que le chevauchement sont indiqués à l'aide de flèches noires. La pièce rectangulaire, la pièce prismatique ainsi que la pièce arquée empruntent un chemin d'impression rectiligne. Les vues de section des pièces représentent des rectangles, donc le logiciel de traitement utilise un contour rectangulaire en trois ou quatre largeurs de buse, dépendamment des paramètres, pour ensuite remplir la pièce avec des lignes droites dans un angle de 45 degrés. La pièce axisymétrique, quant à elle, utilise un trajet d'outil circulaire pour les contours. Le même type de remplissage est effectué avec des lignes droites à 45 degrés. En optimisant les paramètres, le niveau de chevauchement entre les passes de contour ainsi que le remplissage est augmenté. Ce chevauchement est visible sur les trajets d'outils présentés dans la Figure 3.5b et d.

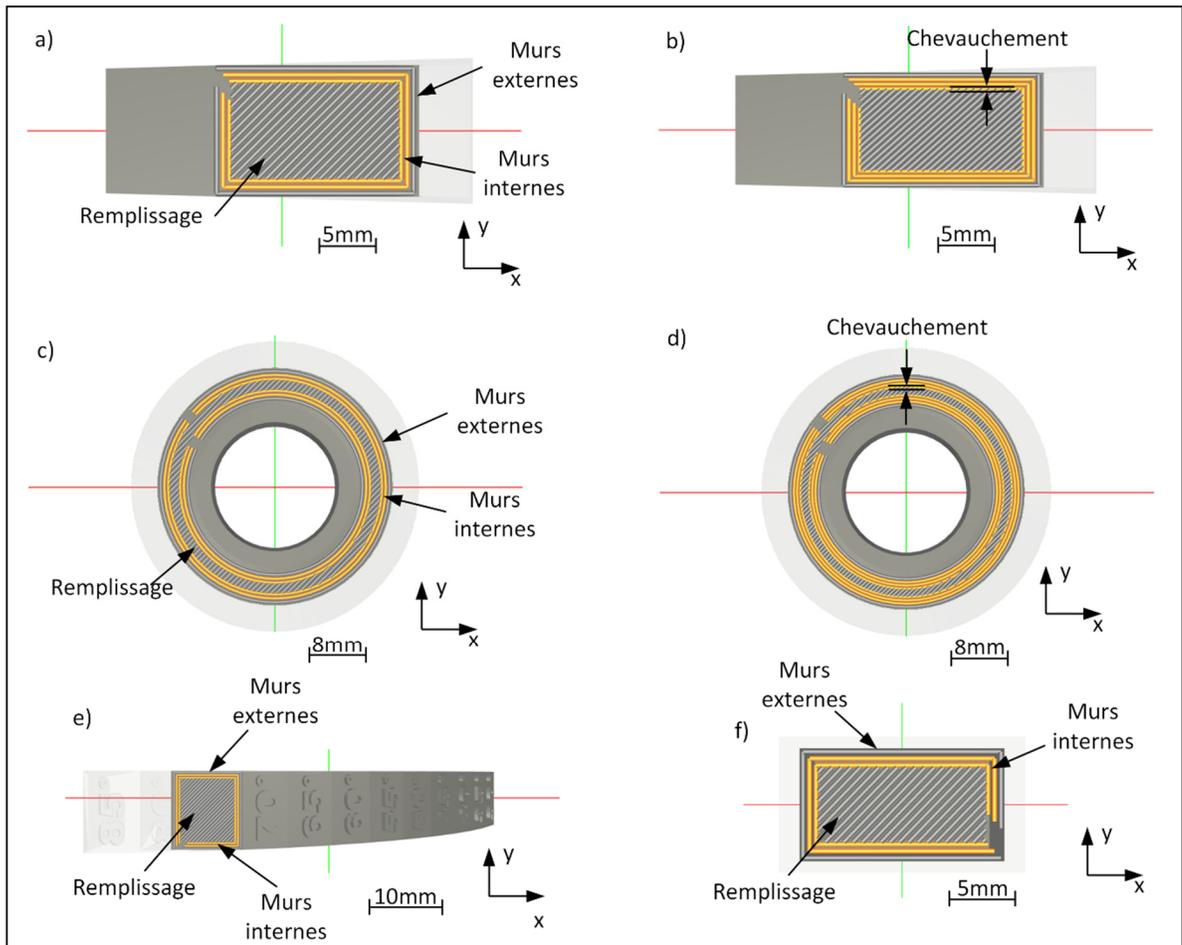


Figure 3.5 Trajets d'outil standard (a, c) et optimisé (b et d) de la pièce prismatique et axisymétrique ainsi que trajets d'outils standards de la pièce arquée (e) et prisme rectangulaire (f)

3.4 Caractérisation des propriétés dimensionnelles et géométriques

Les premières pièces évaluées sont les prismes rectangulaires de 15 x 8 x 10 mm. Ces pièces ont été imprimées afin d'évaluer les performances dimensionnelles des mélanges poudre-liant à basse viscosité. Suite à l'impression, la masse de chacune a été prélevée à l'aide d'une balance Practum de Sartorius ayant une précision de 1 μg (Figure 3.6a) et leurs dimensions ont été caractérisées à l'aide d'un appareil de type CMM de Mitutoyo. Une caméra laser Metris

LC50 a été montée à l'extrémité de la tête de mesure afin de créer des numérisations en nuage de point avec une précision de $15\ \mu\text{m}$. Ces appareils sont présentés à la Figure 3.6b-c. Ces numérisations sont ensuite transférées dans le module Inspector de PolyWorks afin de recréer les surfaces et ainsi, extraire les dimensions en X, Y et Z de chaque pièce. Ces dimensions permettent d'évaluer la précision à laquelle les cubes sont imprimés et la variation dimensionnelle des pièces.

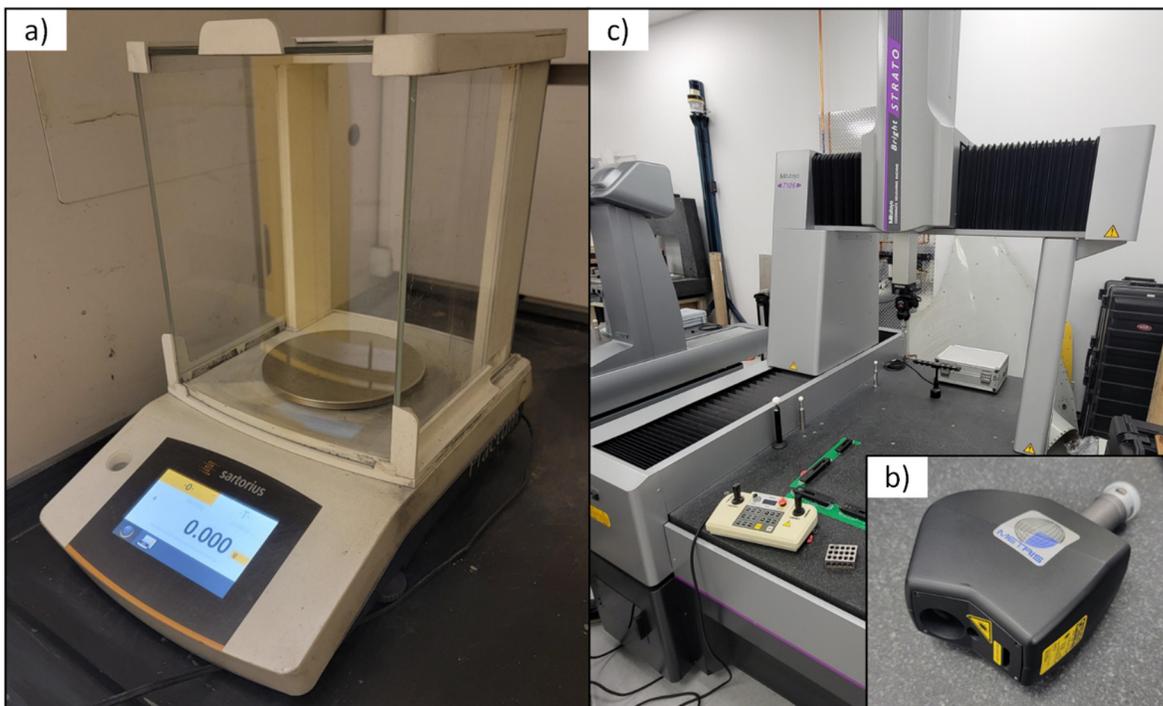


Figure 3.6 photo de la balance (a), de la CMM ainsi que de la tête numériseur au laser utilisée (c)

Les angles de surplombs font partie des formes complexes les plus contraignantes dans la conception et la fabrication de pièce mécanique en trois dimensions. Bien entendu, lorsque les pièces sont fabriquées lors d'une procédure couche par couche, il est nécessaire d'avoir une couche de matière précédente afin de supporter la nouvelle couche ajoutée à la pièce. Ces angles nécessitent donc un support lors de l'impression. Ces supports sont générés par les

logiciels qui traitent les modèles en trois dimensions et créent le code pour l'imprimante (Cura, Fabricate, etc.). Ces supports sont imposés géométriquement, c'est-à-dire que certains paramètres du logiciel permettent de les réduire, mais pas de les retirer complètement. De plus, ces supports sont collés directement sur la pièce. Si l'imprimante ne dispose pas d'un deuxième extrudeur permettant d'ajouter une couche de céramique entre le support et la pièce, ce support diminue directement la mise au mille de la matière (ratio *Buy-to-fly*) et ajoute une étape de post-traitement afin de le retirer. Dans certains cas, comme dans la fabrication d'une sphère vide, le retrait du support interne devient simplement impossible.

Étant donné l'utilisation récente de mélange de polymère hautement chargé à basse viscosité, il devient important de comprendre la limite des angles de surplomb du matériel lors de la conception des pièces en trois dimensions. De plus, certains paramètres peuvent favoriser l'impression de ces angles en garantissant une uniformité dans la pièce ainsi que des surfaces répondant aux critères demandés. Trois pièces ont été créées pour évaluer ce critère. La pièce arquée, la pièce prismatique ainsi que la pièce axisymétrique. Le but de ces essais est de déterminer la limite de la pièce en évaluant un trajet d'outils rectangulaire et circulaire. L'appareil utilisé pour évaluer les surfaces des pièces est un stéréoscope Nikon SMZ800N (Figure 3.7) avec le logiciel CLEMEX Captiva qui offre une clarté d'image avec un zoom allant jusqu'à 100x.



Figure 3.7 Stéréoscope utilisé pour la visualisation des angles de surplomb

3.5 Fabrication de la presse à injection

Comme mentionné plus haut dans la section « objectifs », ce travail avait aussi comme autre mandat d'utiliser le mélange fabriqué à l'ÉTS dans l'imprimante commerciale. Pour y parvenir, une presse à injection a dû être conçue et fabriquée afin de produire les tiges de 6 mm de diamètre allant dans les cartouches de cette imprimante. Par manque de transparence de la part de la compagnie fournissant l'imprimante, les paramètres d'impressions tels que la température d'extrusion n'ont plus été modifiés afin d'accueillir le nouveau mélange. La presse à injection a tout de même été fabriquée et elle est présente à la Figure 3.8. Elle comprend un cadre, un système de fixation, un vérin, une tête de piston, une source de courant ainsi qu'un moule à injection.



Figure 3.8 Presse à injection pour fabriquer les tiges de l'imprimante commerciale

CHAPITRE 4

RÉSULTATS

4.1 Caractérisation dimensionnelle des pièces imprimées

Cette section présente les résultats obtenus sur les pièces en forme de prisme rectangulaire. La qualité générale des pièces, la répétabilité des impressions ainsi que la quantification de la précision dimensionnelle seront abordées.

4.1.1 Qualité générale des pièces imprimées

Les pièces rectangulaires ont été imprimées à l'aide des deux imprimantes. Dans la Figure 4.1a-c, la pièce a été imprimée à l'aide de l'imprimante commerciale produite par Desktop Metal, utilisant ainsi le mélange de 17-4PH fournis par l'entreprise. La Figure 4.1d-f présente une pièce typique imprimée à l'aide de l'imprimante ÉTS. Trois vues sont présentées pour chaque pièce, soit la vue de dessus, la vue de face et une vue isométrique afin de bien voir les détails des pièces.

La vue de la surface du dessus confirme que les deux pièces présentent des surfaces pleines, sans trous visibles. Des points de départ ainsi que de fin de trajet sont aussi visibles, ce qui est normal lors de l'impression de pièce avec le procédé MEX. Les images de face des prismes présentent des surfaces lisses. Ces ondulations microscopiques sont dues à la hauteur de couche de 0.1 mm, qui aide à adoucir le fini de surface dans le plan YZ et XZ. L'imprimante commerciale présente un léger segment au bas de la pièce qui semble se détacher du reste du prisme. Ce segment est visible avec l'imprimante commerciale, car elle nécessite une couche initiale plus épaisse lors de l'impression, afin d'aider la cohésion entre la pièce et la plaque de construction. Sans cette surépaisseur, la pièce ne colle pas sur le plateau. L'imprimante de l'ÉTS, quant à elle, présente une légère surextrusion au coin gauche de la Figure 4.1d. Cette surextrusion est causée par le point de départ de la buse à chaque couche d'impression.

Globalement, les prismes rectangulaires imprimés avec les deux imprimantes proposent des finis de surface visiblement bons et semblent offrir des pièces intègres, sans trou et ni fissure.

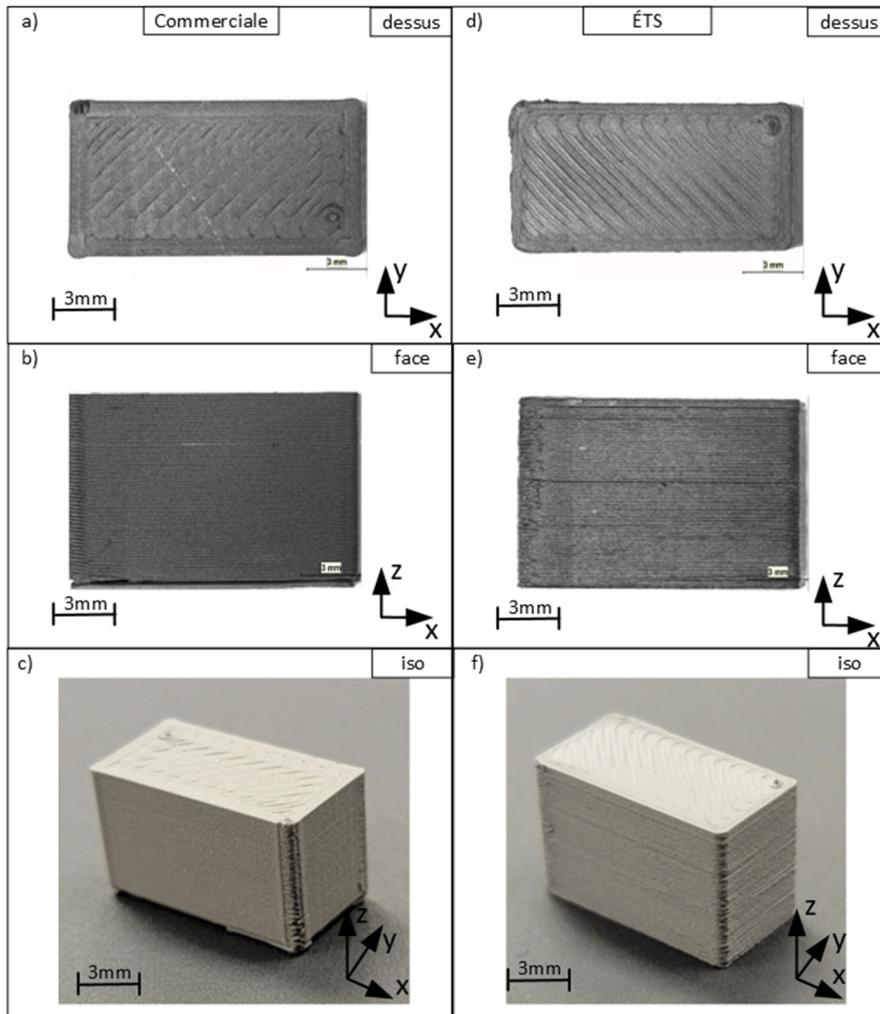


Figure 4.1 Vue de dessus (a, d), de face (b, e) et isométrique (c, f) des pièces rectangulaires imprimées avec l'imprimante commerciale et l'imprimante ÉTS

4.1.2 Quantification des dimensions des pièces imprimées

Les graphiques suivants présentent les résultats obtenus lors de la caractérisation dimensionnelle des prismes rectangulaires afin d'évaluer la précision ainsi que la répétabilité

des dimensions lors des impressions. Pour ce faire, chaque lot de paramètres a été utilisé sur 10 impressions. Il y a d'abord les prismes imprimés sur l'imprimante commerciale avec un diamètre de buse de 0.40 mm (DM-0.4) et les prismes avec les mêmes paramètres, mais avec le diamètre de buse de 0.48 mm (DM2-0.48). Le troisième lot a été imprimé avec l'imprimante de l'ÉTS avec un diamètre de buse de 0.40 mm et une hauteur de couche de 0.10 mm comme les autres lots (ÉTS-0.4). Les légendes ainsi que leurs paramètres respectifs sont indiqués dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1 Définition des légendes avec leurs paramètres respectifs

Légende	Paramètres
DM-0.4	<ul style="list-style-type: none"> • Imprimante DesktopMetal • Hauteur de couche de 0.1 mm • Diamètre de buse théorique de 0.4 mm • Multiplicateur d'extrusion de 96 % (suggéré par DesktopMetal)
DM2-0.48	<ul style="list-style-type: none"> • Imprimante DesktopMetal • Hauteur de couche de 0.1 mm • Diamètre de buse théorique de 0.48 mm • Multiplicateur d'extrusion de 96 % (suggéré par DesktopMetal)
ÉTS-0.4	<ul style="list-style-type: none"> • Imprimante en développement de l'ÉTS • Hauteur de couche de 0.1 mm • Diamètre de buse théorique de 0.4 mm • Multiplicateur d'extrusion de 100 %

Dans les graphiques de la Figure 4.2, les axes horizontaux présente les différentes mesures, soient la longueur (axe X des imprimantes), la largeur (axe Y des imprimantes) et la hauteur (axe Z des imprimantes) des cubes. Les axes verticaux, quant à eux, représentent les longueurs de ces mesures en millimètre. Les bandes ont trois couleurs, bleues pour les pièces imprimées

sur l'imprimante commerciale avec une hauteur de couche de 0.1 mm, un diamètre théorique de buse de 0.40 mm et un multiplicateur de débit de 96 %, qui est le multiplicateur standard pour l'imprimante. La couleur orange est attribuée aux pièces imprimées avec la même imprimante, mais avec un diamètre de buse théorique de 0.48 mm, qui est le paramètre standard. La couleur grise représente les pièces imprimées avec l'imprimante en développement, avec une hauteur de couche de 0.1 mm, un diamètre de buse théorique de 0.40 mm et un multiplicateur de débit de 100 %, qui sont aussi les paramètres standards de l'imprimante.

Les cubes imprimés avec l'imprimante commerciale et la buse théorique de 0.40 mm ont obtenu une longueur moyenne de 15.01 mm, ce qui représente une différence de .01 mm (0.038%) avec la longueur théorique. Les cubes imprimés avec la même imprimante, mais avec un diamètre de buse de 0.48 mm ont obtenu une longueur de 14.994 mm, pour une différence de 0.006 mm (0.039%) avec la longueur théorique. Les cubes imprimés avec l'imprimante en développement et une buse théorique de 0.40 mm ont obtenu 14.606 mm, ce qui représente une différence de 0.394 mm (2.625%) avec la longueur théorique. Au niveau de la largeur, les cubes imprimés avec l'imprimante commerciale ont obtenu une largeur de 8.082 mm et 8.063 mm, pour des différences de 0.082 mm (1.028%) et 0.063 mm (0.791%) par rapport à la mesure théorique. Les cubes de l'imprimante en développement ont obtenu une largeur de 7.672 pour un écart de 0.328 mm (4.093%). Dans le même ordre, les cubes ont obtenu une hauteur de 10.244 mm, 10.248 mm et 9.963. Les écarts avec la valeur théorique sont de 0.244 mm (2.435%), 0.248 mm (2.416%) et 0.037 mm (0.374%).

Au niveau de la longueur des pièces, l'ensemble des trois lots ont obtenu des écarts-types de 0.02 mm. Pour la largeur, les deux lots de l'imprimante commerciale ont obtenu des écarts-types de 0.02 mm et l'imprimante de l'ÉTS a obtenu 0.03 mm. Les trois lots obtiennent donc une bonne répétabilité avec les dimensions dans le plan XY de l'impression. Pour ce qui est de la hauteur des pièces, le premier et le deuxième lot ont obtenu des écarts-types de 0.04 et 0.03 mm. La répétabilité est donc deux fois moins bonne avec la hauteur comparativement aux

autres dimensions. Cependant, ces écarts-types demeurent faibles. Pour le lot de pièce imprimé avec l'imprimante de l'ÉTS, l'écart-type de la hauteur est de 0.08 mm. Bien que supérieure aux autres résultats, une étendue de résultat de 0.08 mm est minimale. Les mélanges de polymère hautement chargé en particule de 17-4 PH à basse viscosité offrent donc une bonne répétabilité lors de leurs utilisations dans le procédé d'impression MEX.

En résumé, l'impression des prismes rectangulaires propose des dimensions relativement précises par rapport aux dimensions cibles. Au niveau du plan XY des impressions, soit la longueur et la largeur des pièces, les différents paramètres offrent des dimensions qui dévient de 0.038 % à 4.093 % des dimensions théoriques demandées lors des impressions. Les hauteurs des cubes, quant à elle, vont de 0.374 % à 2.435 % d'écart entre les dimensions réelles et théoriques. Les impressions avec le procédé MEX utilisant des mélanges poudres/liants à basse viscosité offrent donc une bonne précision pour ce qui est des pièces à vert.

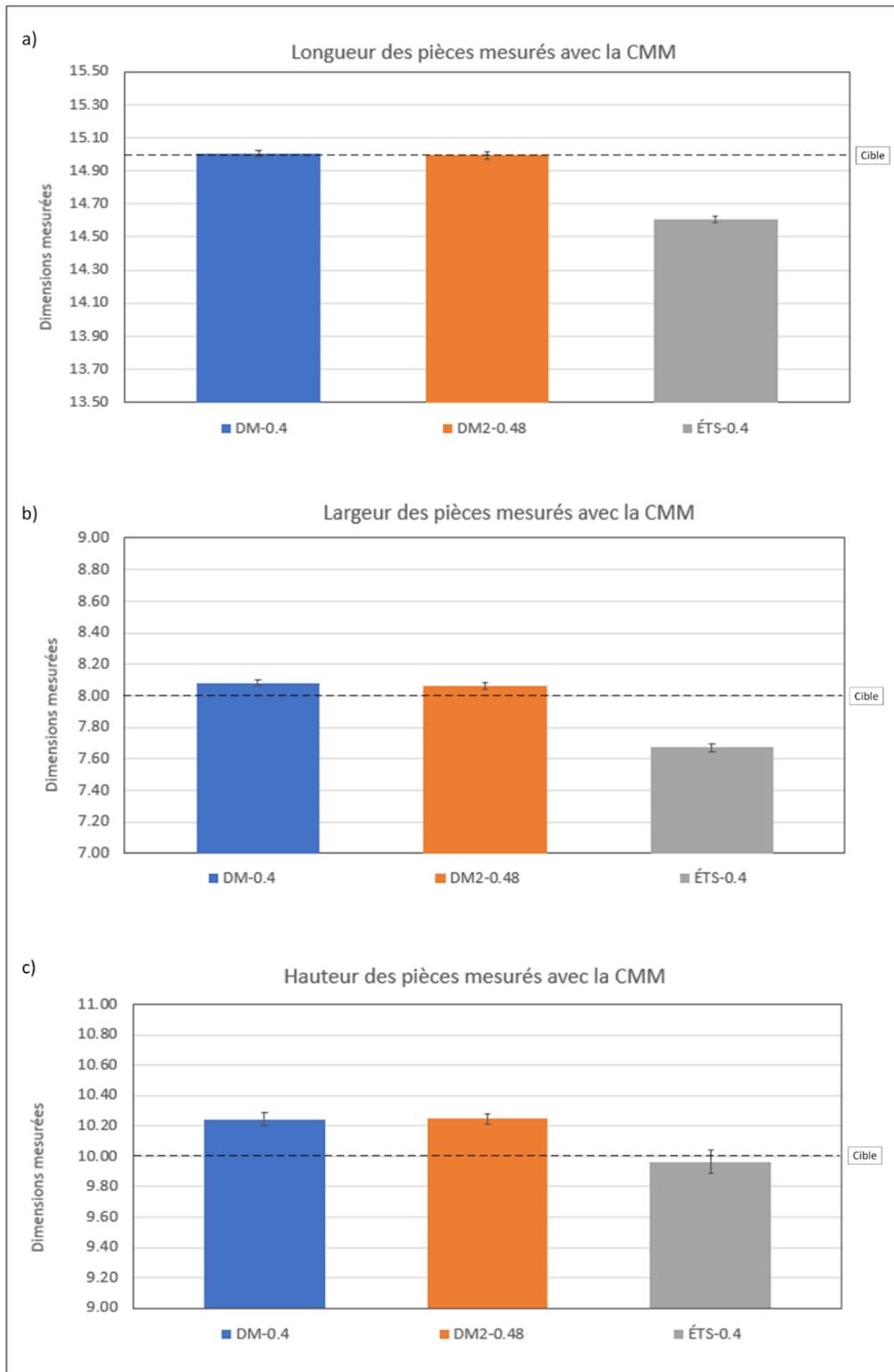


Figure 4.2 Graphique présentant les longueurs (a), les largeurs (b) et les hauteurs (c) avec leurs écarts-types mesurées des prismes rectangulaires

4.1.3 Quantification de la masse des pièces imprimées

Chaque lot de prismes rectangulaires imprimés a été pesé à l'aide d'une balance numérique Satorius avec une précision de 1 μg . La Figure 4.3 présente les résultats obtenus ainsi que les écarts-types. Encore une fois, la bande bleue représente les prismes obtenus avec l'imprimante commerciale et un diamètre de buse de 0.40 mm. La bande orange présente les prismes obtenus avec la même imprimante, mais avec un diamètre de buse de 0.48 mm et la bande grise représente les pièces imprimées avec l'imprimante de l'ÉTS. Dans le même ordre, les masses moyennes mesurées avec la balance sont de 5.978, 5.996 et 5.948 grammes. Les écarts-types respectifs sont de 0.006, 0.008 et 0.015 gramme.

Les deux lots de pièces imprimées par l'imprimante commerciale proposent des masses similaires avec une différence de 0.018 gramme. Cette légère différence provient du diamètre théorique qui passe de 0.40 mm à 0.48 mm. Bien que le diamètre de la buse réelle soit de 0.40 mm, indiquer dans les paramètres que la buse est légèrement plus grande demande à l'imprimante d'extruder plus de matière afin de respecter les vitesses d'impression sans créer de vide dans les pièces. De plus, étant donné l'utilisation du même système d'extrusion, les écarts-types sont très similaires. La masse de matières extrudées est donc constante au niveau de l'imprimante commerciale en utilisant les mêmes paramètres. L'imprimante commerciale utilise un multiplicateur de débit de 96 % par défaut, ce qui veut dire que le débit de matière extrudé est réduit de 4 % par rapport au calcul initial que fait l'imprimante en fonction du diamètre de la buse et de la vitesse d'impression. Contre toute attente, malgré l'utilisation d'un multiplicateur de débit de 100 % avec l'imprimante de l'ÉTS, la masse moyenne obtenue est inférieure de 0.030 gramme par rapport aux pièces de l'imprimante commerciale utilisant le même diamètre théorique de buse. Normalement, avec des vitesses et un diamètre identique, mais en utilisant un multiplicateur supérieur, la quantité de matière extrudée devrait être supérieure. Par contre, la section précédente indique que le volume final des pièces imprimées

avec l'imprimante de l'ÉTS est inférieur aux autres pièces. Il va donc de soi que la masse finale de la pièce devrait être différente. De plus, malgré le fait que les particules de métal dans les mélanges soient de 17-4 PH pour toutes les impressions, les proportions du mélange commerciales sont inconnues. La cause de cette différence s'explique donc par ces deux faits. Pour ce qui est de l'écart-type du dernier lot, il est de 0.015 gramme. La répétabilité est donc légèrement inférieure, mais demeure tout de même minimale. Les mélanges à basse viscosité dans le procédé MEX proposent donc des pièces constantes au niveau de la masse de celles-ci.

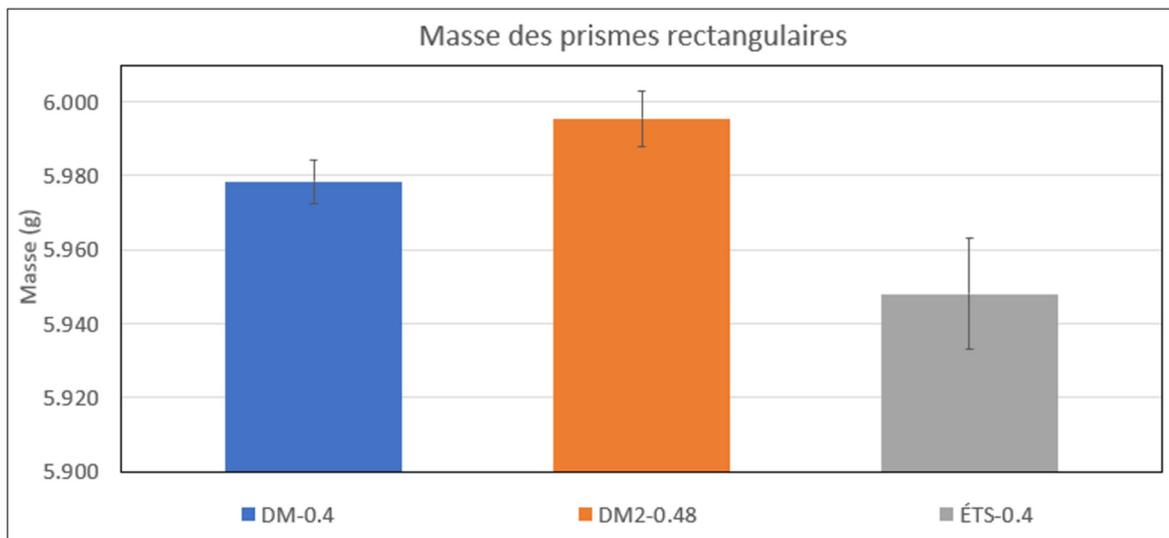


Figure 4.3 Graphique présentant les masses mesurées des prismes rectangulaires

4.2 Mesure de l'angle seuil de surplomb

La pièce arquée a été imprimée à l'aide des paramètres recommandés sur l'imprimante commerciale seulement en raison de la grande taille de l'échantillon. L'objectif de ces impressions est de déterminer le seuil d'impressionnabilité des angles de surplomb en utilisant les paramètres proposés par le fabricant. La Figure 4.4 présente un résultat typique d'un test de surplomb réalisé à l'aide des pièces arquées. La vue latérale de ces tests d'impression (Figure 4.4a) confirme qu'il est possible d'imprimer ce type de pièces minces jusqu'à un angle de 85° (de manière répétée et sans les casser) en utilisant les paramètres recommandés par le

fournisseur. Rappelons que cette pièce a été construite dans la direction z , c'est-à-dire depuis la zone inférieure en contact avec la plaque de construction (couche blanche de matériau d'arrêt) jusqu'au sommet de la pièce représentant une surface de plus en plus parallèle au plan xy (i.e., à 15° d'être parfaitement horizontal avec la table d'impression). Comme prévu, une augmentation de l'angle de surplomb entraîne une diminution de la qualité visuelle des pièces imprimées. Un zoom dans la zone d'intérêt (mauvaise qualité visuelle indiquée dans la Figure 4.4a confirme que la qualité des faces supérieure (Figure 4.4b) et inférieure (Figure 4.4c) diminue lorsque l'angle de surplomb augmente de 65° à 75° et devient irrégulier ou simplement erratique pour des valeurs $\theta \geq 75^\circ$. En fait, toutes les caractéristiques imprimées avec un angle supérieur à 75° sont susceptibles de présenter des discontinuités dans les joncs imprimés, ce qui peut rendre la pièce inutilisable. L'angle limite se situe donc dans la plage de 70° à 75° . À cet égard, une valeur de 70° a donc été transférée sur deux géométries différentes (pièces prismatiques et axisymétriques) pour étudier l'influence du chemin d'outil et de l'approche d'impression sur cet angle maximal de surplomb.

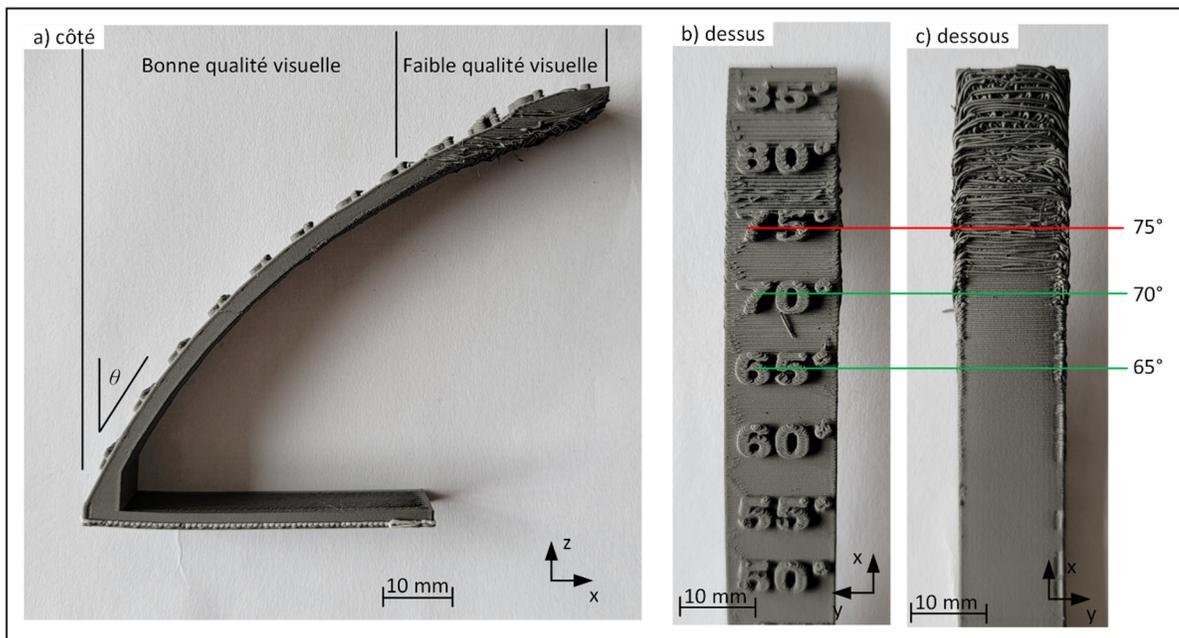


Figure 4.4 Vue de côté (a), de dessus (b) et de dessous (c) de la pièce arquée imprimée

4.3 Capabilité géométrique de l'impression MEX

Cette section concerne les performances géométriques des imprimantes MEX à basse viscosité. Deux pièces proposant des angles de surplomb ont été évaluées à l'échelle macroscopique, soit une pièce prismatique et une pièce axisymétrique.

4.3.1 Impression de la pièce prismatique

Les pièces prismatiques ont été imprimées en utilisant les deux d'imprimantes avec un angle de surplomb $\theta = 70^\circ$ comme illustré à Figure 4.5a-b. La séquence d'impression consiste à débiter par la construction de la base rectangulaire (25 x 10 x 2.5 mm), ensuite par l'impression d'une colonne verticale sur une hauteur de 4.5 mm, puis finalement à imprimer la zone rectangulaire épaisse en utilisant un angle de surplomb de 70° . En utilisant les paramètres recommandés répertoriés dans le Tableau 3.2 ces pièces épaisses ont été imprimées avec succès à l'aide de l'imprimante commerciale (Desktop Metal) ainsi que de l'imprimante ÉTS. Pour ces deux stratégies d'impression, les faces inférieures présentent des surfaces complètes et continues sans trace de lacunes, de discontinuités ou de manque de matériau. Ce résultat important confirme qu'un mélange poudre-liant à faible viscosité peut être utilisé pour imprimer des caractéristiques de formes complexes telles que des surplombs à angle élevé. Les parois verticales présentent une surface ondulée d'environ 0.10 mm de hauteur en raison de la forme oblongue des joncs déposés. La principale différence entre ces deux pièces prismatiques réside dans la colonne verticale reliant la base et la surface supérieure de la pièce. En effet, les colonnes verticales imprimées à l'aide de l'imprimante Desktop Metal présentent des surfaces lisses et constantes, tandis que celles produites avec l'imprimante ÉTS semblent enflées ou affaissées sur elles-mêmes. Ce défaut géométrique peut être attribué à une accumulation excessive de chaleur dans cette zone spécifique, peut-être due à une température d'impression trop élevée et/ou à une conductivité thermique plus faible de ce mélange. L'optimisation des paramètres d'impression (température d'impression ou utilisation d'un système de refroidissement à air) pour cette pièce prismatique est donc nécessaire dans les travaux futurs

pour minimiser et éventuellement éviter ce type de défaut géométrique situé dans la colonne verticale, comme démontré à la Figure 4.5a.

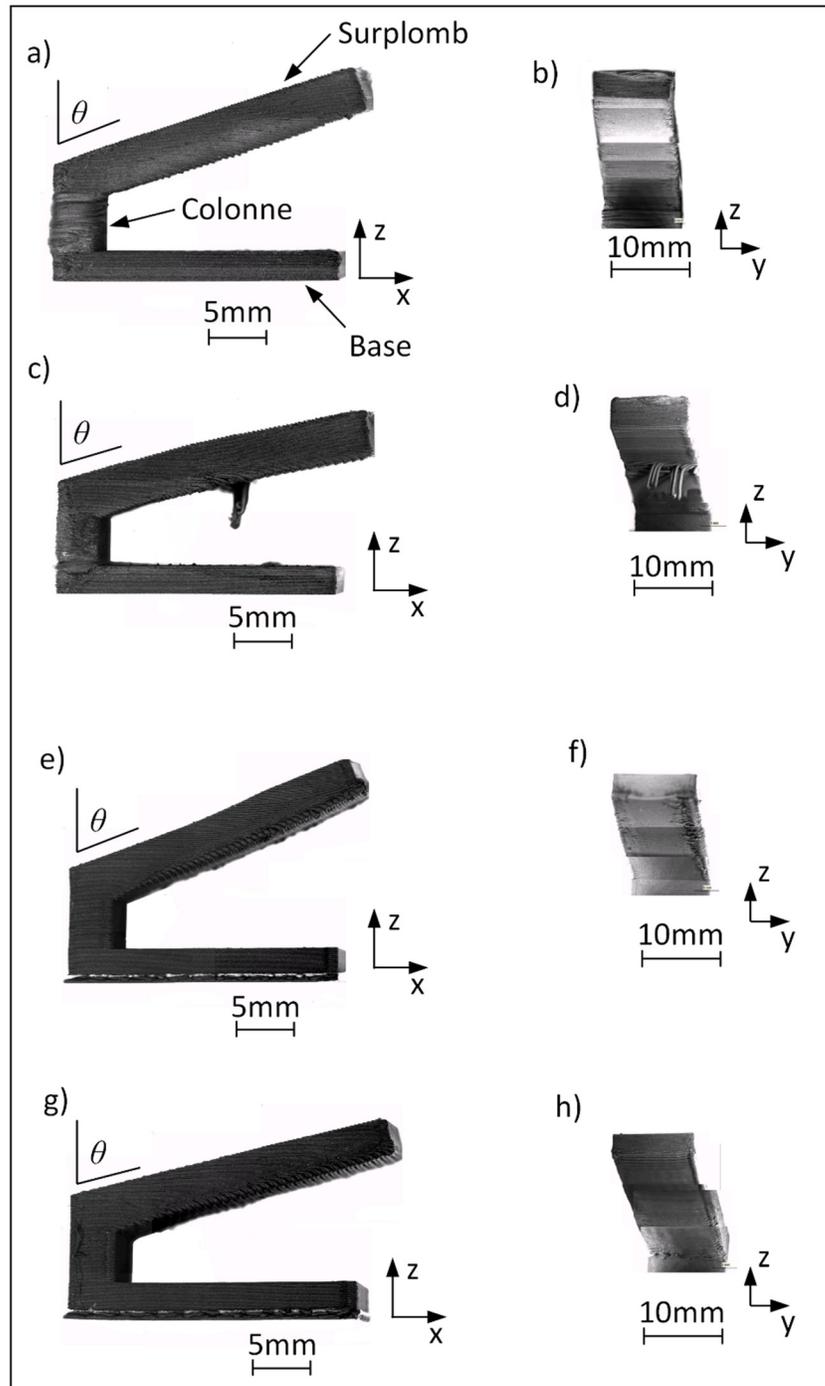


Figure 4.5 Pièces prismatiques imprimées avec l'imprimante de l'ÉTS avec un angle de surplomb de 70° (a-b) et 75° (c-d), et imprimées avec l'imprimante commerciale avec un angle de surplomb de 70° (e-d) et 75° (g-h)

Les deux technologies d'impression ont donc été poussées un peu plus loin en imprimant les mêmes pièces prismatiques avec un angle de surplomb $\theta = 75^\circ$. Cependant, comme présentées à la Figure 4.5b-d, les surfaces d'impression n'étaient pas satisfaisantes en termes de défauts macroscopiques. Disponible dans la nouvelle mise à jour du logiciel Fabricate (Desktop Metal), il a été possible d'optimiser la séquence d'impression (impression à partir de l'intérieur d'abord au lieu de l'extérieur d'abord) et d'ajouter un chevauchement de 30 % (de la largeur de la ligne entre la séquence de remplissage et la séquence du mur extérieur) pour produire une pièce prismatique présentant un angle de surplomb de 75° sans lacunes ni discontinuités sur la face inférieure, comme le montre la Figure 4.5f-h. Cette impression réussie était due au chevauchement se tenant entre les parois et le remplissage, ce dernier étant imprimé en premier avant de remplir les parois intérieures connectées au remplissage avec le chevauchement.

4.3.2 Impression de la pièce axisymétrique

Des pièces axisymétriques ont également été imprimées en utilisant les deux d'imprimantes en utilisant la valeur de surplomb maximale $\theta = 75^\circ$ obtenue précédemment avec la pièce prismatique. La séquence d'impression consiste à commencer par construire le cylindre intérieur (partie creuse) verticalement sur une hauteur de 4 mm, puis à imprimer la surface de révolution de l'intérieur vers l'extérieur pour produire un disque imprimé avec un angle de surplomb de 75° . Contrairement au trajet d'outil en ligne droite utilisé pour la pièce prismatique, la pièce axisymétrique a été spécifiquement choisie pour obtenir un trajet d'outil circulaire et continu. En utilisant les paramètres optimisés (Tableau 3.2), ces pièces circulaires ont été imprimées avec succès à 70° avec les deux imprimantes, mais seulement avec l'imprimante commerciale pour la pièce à 75° . Comme le montre la Figure 4.6 la face inférieure de la surface imprimée avec cet angle de surplomb élevé ne présente aucune lacune ni discontinuité. De plus, ce trajet d'outil favorable produit des surfaces plus lisses par rapport à celles obtenues avec les pièces prismatiques, mais limite la possibilité d'impression à 75° pour

l'imprimante ÉTS. De manière similaire aux impressions précédentes, le cylindre intérieur construit dans la direction z (c'est-à-dire les parois verticales) présente une surface ondulée avec une hauteur de couche d'environ 0.10 mm.

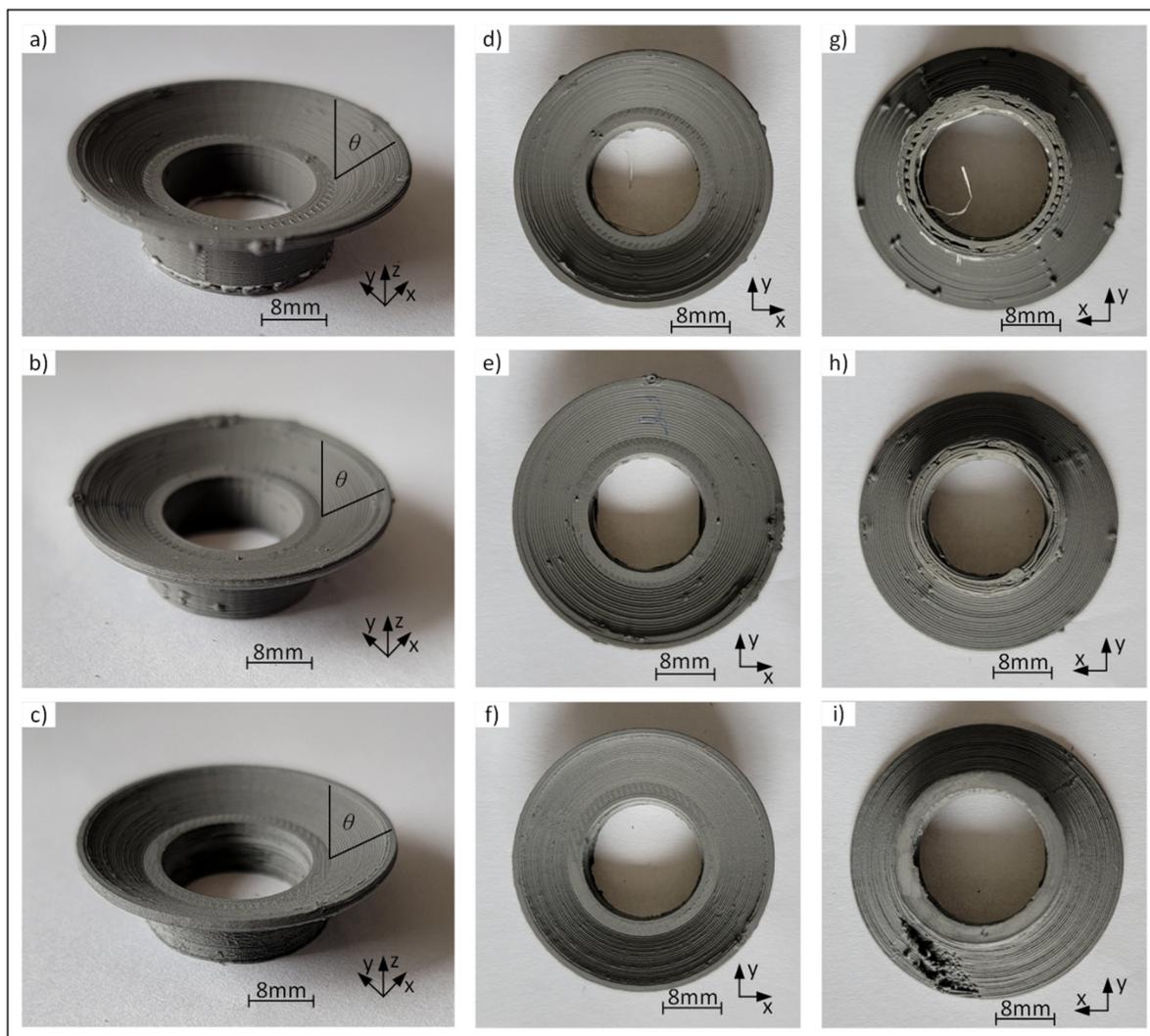


Figure 4.6 Vues isométriques (a-c), de dessus (d-f) et de dessous (g-i) des pièces axisymétriques sur l'imprimante commerciale à 70° et à 75° , puis à 70° sur l'imprimante de l'ÉTS

4.4 Influence du diamètre théorique de la buse d'impression

Pendant les tâches d'optimisation, le diamètre de la buse implémenté dans le code G a été identifié comme un paramètre ayant un impact significatif sur l'angle de surplomb. Étonnamment, la valeur par défaut du diamètre de la buse était réglée à 0.48 mm par le fabricant, mais en réalité, la valeur réelle est de 0.40 mm. L'implémentation de la valeur réelle dans le logiciel Fabricate a considérablement amélioré l'aspect visuel de la surface produite à un angle de surplomb élevé. La Figure 4.7 présente les faces inférieures des pièces prismatiques imprimées avec un angle de surplomb de 75° et une valeur de buse réglée à 0.48 et 0.40 mm. Les zones pointées par les flèches noires dans la Figure 4.7b mettent en évidence des discontinuités et des espaces dus au manque de fusion entre chaque segment de matière fondue extrudée.

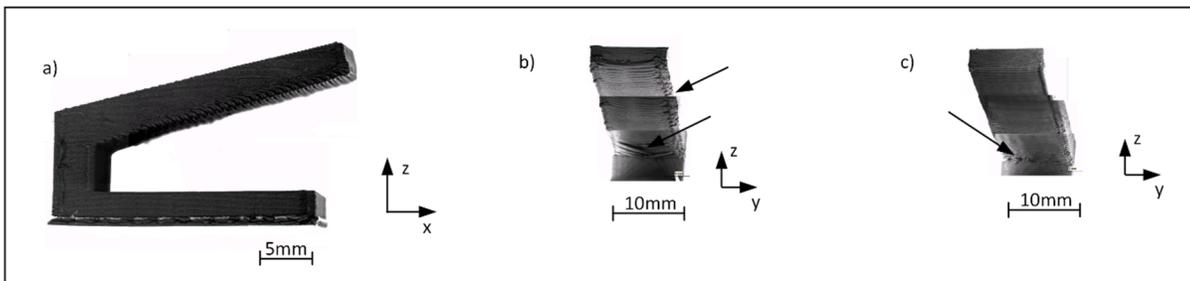


Figure 4.7 Surface en dessous de l'angle de surplomb des pièces prismatiques imprimées avec l'imprimante commerciale avec le diamètre de buse théorique de 0.48 mm (a-b) et 0.40 mm (c)

Un protocole similaire a été répété avec la pièce axisymétrique. À cette fin, les paramètres d'impression recommandés ont été utilisés (c'est-à-dire, un trajet d'outil standard et aucune superposition n'a été utilisée), tandis que l'angle de surplomb a été réglé à $\theta = 75^\circ$. Les résultats d'impression présentés dans la Figure 4.8 confirment qu'une réduction du diamètre de la buse à 0.40 mm produit un effet bénéfique sur la qualité globale des pièces imprimées. En fait, le diamètre de la buse implémenté par défaut dans le logiciel (c'est-à-dire 0.48 mm) réduit la capacité d'impression à un angle de surplomb élevé, où des extrémités lâches et des discontinuités sont clairement visibles dans la Figure 4.8. Ce genre de défauts affecte l'intégrité

de la pièce, la rendant inutilisable, tandis que les processus ultérieurs (déliantage et frittage) ne sont pas censés pouvoir réparer ces importantes déviations géométriques. En revanche, en réglant le diamètre de la buse à 0.40 mm, une surface continue sans discontinuités est produite. Cela pourrait s'expliquer par une plus grande proximité de la buse avec le cordon précédemment imprimé, car le programme de découpe pourrait déplacer la buse d'environ 0.04 mm (i.e., $[0.48-0.40]/2 =$) vers le segment précédemment déposé.

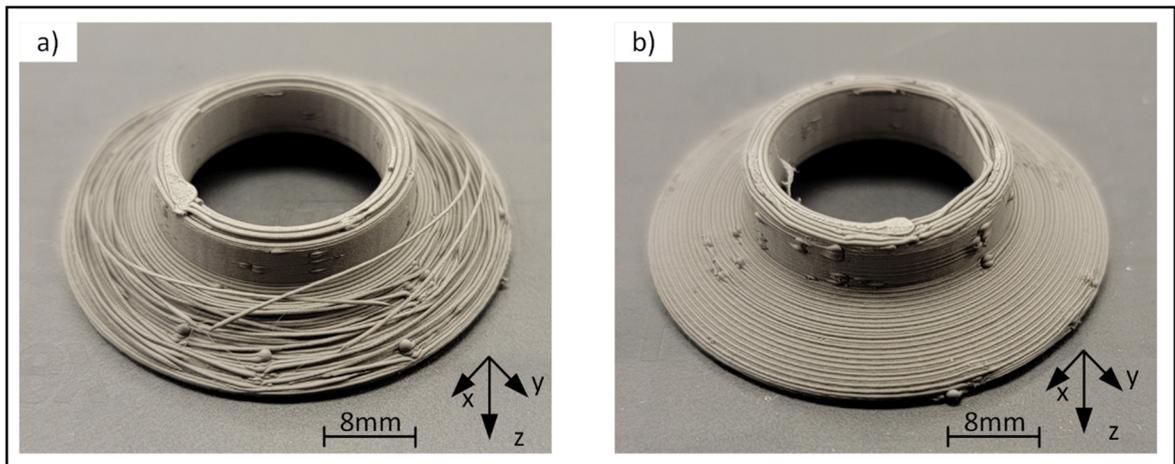


Figure 4.8 Surface en dessous de l'angle de surplomb des pièces axisymétriques imprimées avec l'imprimante commerciale avec un diamètre théorique de buse de 0.48 mm (a) et 0.40 mm (b)

4.5 Retour sur les résultats

Les deux imprimantes ont démontré leur force quant à la performance du procédé d'impression 3D par extrusion. Des prismes rectangulaires ont permis d'établir une répétabilité des impressions avec de faibles écarts-types au niveau de la masse et des dimensions ainsi que des tolérances dimensionnelles supérieures à ce que l'on retrouve généralement dans la littérature avec des déviations pouvant être aussi faibles que 6 μm sur les pièces à vert. De plus, l'impression de géométrie complexe, plus précisément la capacité à imprimer des angles de surplomb sur trois géométries ont permis de documenter et d'établir un seuil d'impression sans support. Une pièce archée, une pièce prismatique ainsi qu'une pièce axisymétrique ont été

imprimées avec des angles de surplomb aussi élevés que 70 et 75 degrés avec les paramètres appropriés. Il a été établi que les paramètres ayant le plus d'impact sur la qualité des surfaces en dessous de ces angles de surplomb sont le chevauchement des segments imprimés ainsi que le diamètre théorique de la buse utilisée.

CONCLUSION

Ce travail avait pour but d'évaluer les tolérances dimensionnelles et les performances géométriques d'un mélange de polymère et de poudre métallique à basse viscosité utilisé dans le procédé d'impression par extrusion. Deux mélanges poudre/liant ont été utilisés pour cette évaluation, soit un mélange commercial et un mélange fabriqué à l'ÉTS basé sur un mélange utilisé dans le procédé de moulage par injection de pièce métallique. L'étude a donc permis de comprendre la capacité de ces mélanges à faible viscosité à être imprimée dans des formes complexes comprenant des angles de surplomb ainsi qu'à quantifier ces angles maximums. De plus, la précision des impressions a également été abordée afin de déterminer si la faible viscosité des mélanges permettait de reproduire des pièces de manières précises et répétables. Les différentes impressions de prismes rectangulaires, de pièces arquées, de pièces prismatiques ainsi que de pièces axisymétriques ayant des angles de surplombs ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les déviations dimensionnelles horizontales des prismes rectangulaires sont de 0.006 mm à 0.082 mm en utilisant du chevauchement lors des impressions sur l'imprimante 2.
- Sans l'utilisation de chevauchement, les déviations dimensionnelles horizontales étaient de 0.327 mm à 0.394 mm sur l'imprimante 1.
- Les déviations verticales en utilisant du chevauchement sont de 0.244 mm à 0.248 mm sur l'imprimante 2
- La déviation verticale sans chevauchement est de 0.037 mm sur l'imprimante 1.
- Les écarts-types de ces mesures varient de 0.017 à 0.079 mm, ce qui confirme la répétabilité de la précision dimensionnelle des pièces imprimées.
- La capacité d'imprimer des géométries contenant des angles de surplomb est validée et documentée.

- Les mélanges à basse viscosité permettent des angles de surplomb d'au moins 70 degrés, et ce, sans l'utilisation de support lors de l'impression de pièce prismatique et axisymétrique.
- Les angles de surplomb de ces pièces peuvent aller jusqu'à 75 degrés en utilisant les paramètres appropriés.

Le présent travail a donc permis d'établir les tolérances dimensionnelles des pièces trouvées dans la littérature et de les surpasser, en plus d'obtenir une excellente répétabilité des impressions. Au niveau géométrique, les angles de surplomb sont maintenant quantifiés afin de permettre une meilleure planification des géométries et des impressions futures. Les performances des mélanges poudre/liant à basse viscosité dans le procédé d'impression par extrusion permettent donc de fabriquer des pièces précises et répétables, en plus de proposer des angles de surplomb élevé sans l'utilisation de support et ce, autant avec un mélange commercial qu'un mélange fait maison.

RECOMMANDATIONS

Bien évidemment, le développement de ce procédé de fabrication en est encore à ses débuts. La prochaine étape pour la continuation du travail présent serait d'utiliser les mélanges fabriqués à l'ÉTS dans l'imprimante commerciale. Comme mentionné à la section 3.5 de la méthodologie, une presse à injection pour obtenir les tiges allant dans les cartouches de l'imprimante a aussi été conçue et fabriquée. Il ne manque plus qu'à débloquer l'imprimante commerciale afin de réduire la température d'extrusion à 85 °C plutôt que 175 °C. Une fois l'impression avec le mélange personnalisé possible, une seconde évaluation des tolérances dimensionnelles ainsi que des performances géométriques devra être effectuée et documentée.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bellini, A., Shor, L., & Guceri, S. (2005). New developments in fused deposition modeling of ceramics. *Rapid Prototyping Journal*, *11*, 214-220.
- Bose, A. (2019). A perspective on metal additive manufacturing and emergence of binder-based powder processes. *International Journal of Powder Metallurgy*, *55*(2), 29-42.
- Bose, A., Reidy, J. P., Tuncer, N., & Jorgensen, L. (2023). Processing of tungsten heavy alloy by extrusion-based additive manufacturing. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, *110*.
- Cerejo, F., Gatões, D., & Vieira, M.-T. (2021). *Optimization of Metallic Powder Filaments for Additive Manufacturing Extrusion (MEX)*.
- Côté, R., Demers, V., Demarquette, N. R., Charlon, S., & Soulestin, J. (2023). A strategy to eliminate interbead defects and improve dimensional accuracy in material extrusion 3D printing of highly filled polymer. *Additive Manufacturing*, *68*, 103509.
- Demers, V. (2021). Review of low-pressure powder injection molding process [Conference article]. In *Proceedings of the 2021 International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials, (PowderMet2021)*.
- Dreier, T., Riaz, A., Ahrend, A., Polley, C., Bode, S., Milkereit, B., & Seitz, H. (2023). 3D printing of aluminum oxide via Composite Extrusion Modeling using a ceramic injection molding feedstock. *Materials & Design*, *227*, 111806.
- Galati, M., & Minetola, P. (2019). Analysis of Density, Roughness, and Accuracy of the Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) Process for Metal Parts. *Materials*, *12*, 4122.
- Gaynor, A. T., & Guest, J. K. (2016). Topology optimization considering overhang constraints: eliminating sacrificial support material in additive manufacturing through design. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, *54*(5), 1157-1172. (Struct. Multidiscip. Optim. (Germany))
- Gonzalez-Gutierrez, J., Cano, S., Schuschnigg, S., Kukla, C., Sapkota, J., & Holzer, C. (2018). Additive manufacturing of metallic and ceramic components by the material extrusion of highly-filled polymers: A review and future perspectives. *Materials*, *11*(5).
- Greul, M., Pintat, T., & Greulich, M. (1995). Rapid prototyping of functional metallic parts. *Computers in Industry*, *28*(1), 23-28.

- Kaji, F., Jinoop, A. N., Zardoshtian, A., Hallen, P., Frikel, G., Tang, T., Zimny, M., & Toyserkani, E. (2023). Robotic laser directed energy deposition-based additive manufacturing of tubular components with variable overhang angles: Adaptive trajectory planning and characterization. *Additive Manufacturing*, *61*, 103366.
- Kauffmann, J., Chemkhi, M., & Gardan, J. (2022). Integrated design and dimensional compliance of Bound Powder Extrusion technology: A case study of an aircraft engine bracket. *Procedia CIRP*, *108*, 158-163.
- Kukla, C., Gonzalez-Gutierrez, J., Duretek, I., Schuschnigg, S., & Holzer, C. (2017). Effect of particle size on the properties of highly-filled polymers for fused filament fabrication. *AIP Conf. Proc. (USA) 32nd International Conference of the Polymer Processing Society (PPS-32)*, 25-29 July 2016, USA.
- Miclette, O., Cote, R., Demers, V., & Brailovski, V. (2022). Material extrusion additive manufacturing of low-viscosity metallic feedstocks: Performances of the plunger-based approach. *Additive Manufacturing*, *60*.
- Naranjo, J. A., Berges, C., Campana, R., & Herranz, G. (2023). Rheological and mechanical assessment for formulating hybrid feedstock to be used in MIM & FFF. *Results in Engineering*, *19*, 101258.
- Parenti, P., Puccio, D., Colosimo, B. M., & Semeraro, Q. (2022). A new solution for assessing the printability of 17-4 PH gyroids produced via extrusion-based metal AM. *Journal of Manufacturing Processes*, *74*, 557-572.
- Rouf, S., Malik, A., Singh, N., Raina, A., Naveed, N., Siddiqui, M. I. H., & Haq, M. I. U. (2022). Additive manufacturing technologies: Industrial and medical applications. *Sustainable Operations and Computers*, *3*, 258-274.
- Shah, J., Snider, B., Clarke, T., Kozutsky, S., Lacki, M., & Hosseini, A. (2019). Large-scale 3D printers for additive manufacturing: design considerations and challenges. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *104*, 1-15.
- Singh, G., Missiaen, J.-M., Bouvard, D., & Chaix, J.-M. (2021). Additive manufacturing of 17-4 PH steel using metal injection molding feedstock: Analysis of 3D extrusion printing, debinding and sintering. *Additive Manufacturing*, *47*, 102287.
- Singh, S., Ramakrishna, S., & Singh, R. (2017). Material issues in additive manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, *25*, 185-200.

- Spiller, Q., & Fleischer, J. (2018). Additive manufacturing of metal components with the ARBURG plastic freeforming process. *CIRP Annals*, 67(1), 225-228.
- Spiller, S., Berto, F., & Javad Razavi, S. M. (2022). Mechanical behavior of Material Extrusion Additive Manufactured components: an overview. *Procedia Structural Integrity*, 41, 158-174.
- Suwanpreecha, C., & Manonukul, A. (2022). A Review on Material Extrusion Additive Manufacturing of Metal and How It Compares with Metal Injection Moulding. *Metals*, 12, 429.
- van de Ven, E., Maas, R., Ayas, C., Langelaar, M., & van Keulen, F. (2020). Overhang control based on front propagation in 3D topology optimization for additive manufacturing. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 369, 113169.
- Yi, Z., Linmin, W., Xingye, G., Kane, S., Yifan, D., Yeon-Gil, J., Je-Hyun, L., & Jing, Z. (2018). Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(1), 1-13. (J. Mater. Eng. Perform. (Germany))