

Technologie FDM et effet des paramètres d'impression sur le comportement mécanique des pièces imprimées en 3D

FDM technology and effect of printing parameters on mechanical behavior of 3D printed Parts

Abdellah El omari¹, Youssef Cherif², Aissa Ouballouch³, Mohammed Nassraoui⁴

¹ Laboratoire de mécanique productique et de génie industriel (LMPGI), Ecole Supérieure de Technologie, Université Hassan 2, Casablanca, Maroc, abdellah.elomari-etu@etu.univh2c.ma

² Laboratoire de mécanique productique et de génie industriel (LMPGI), Ecole Supérieure de Technologie, Université Hassan 2, Casablanca, Maroc, youssef.cherif2-etu@etu.univh2c.ma

³ Laboratoire de mécanique productique et de génie industriel (LMPGI), Ecole Supérieure de Technologie, Université Hassan 2, Casablanca, Maroc, aissa.ouballouch@univh2c.ma

⁴ Laboratoire de mécanique productique et de génie industriel (LMPGI), Ecole Supérieure de Technologie, Université Hassan 2, Casablanca, Maroc, mohammed.nassraoui@univh2c.ma

RÉSUMÉ. La technologie FDM en impression 3D est une avancée majeure dans la fabrication additive, offrant divers avantages tels que la réduction de masse, la liberté de conception et la rapidité de prototypage. Cependant, le comportement mécanique des pièces dépend des paramètres d'impression. Bien que populaire et économique, le FDM a des limites comme le temps d'impression et les finitions de surface. L'optimisation des paramètres, comme la température et la vitesse d'extrusion, est essentielle pour les propriétés mécaniques des pièces. Des choix judicieux peuvent améliorer la résistance via la densité et le motif de remplissage. Une recherche continue dans ce domaine est cruciale pour des applications plus diversifiées et personnalisées dans des industries telles que la médecine et l'aéronautique.

ABSTRACT. FDM technology in 3D printing is a significant advancement in additive manufacturing, offering various benefits such as mass reduction, design freedom, and rapid prototyping. However, the mechanical behavior of parts depends on printing parameters. While popular and cost-effective, FDM has limitations like print time and surface finishes. Optimization of parameters, such as temperature and extrusion speed, is crucial for mechanical properties of parts. Thoughtful choices can enhance strength through density and infill pattern. Ongoing research in this field is vital for more diverse and customized applications in industries like medicine and aerospace.

MOTS-CLÉS. Fabrication additive, Dépôt de matière fondue, Motif de remplissage, Densité de remplissage, Comportement mécanique.

KEYWORDS. Additive Manufacturing, Fused Deposition Modeling, Infill Pattern, Infill Density, Mechanical Behavior.

1. Introduction

La fabrication additive, également connue sous le nom d'impression 3D, est une technique de production qui permet de créer des objets en ajoutant des couches successives de matériaux, contrairement à la fabrication soustractive qui agit par enlèvement de matière [1]. Cette technique a connu une croissance exponentielle ces dernières années et offre de nombreuses possibilités dans de nombreux domaines.

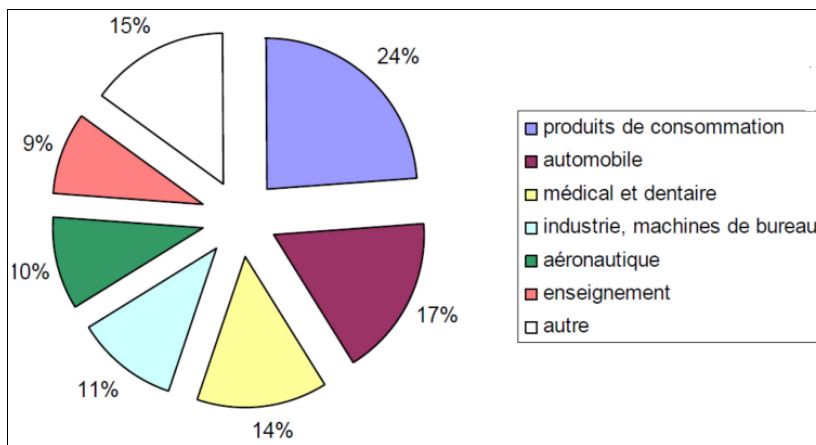


Figure 1. Secteur d'applications de l'impression 3D [2]

2. Fabrication additive

2.1. Types de procédés de fabrication additive

Il existe plusieurs types de procédés de fabrication additive. Chacun d'entre eux utilise une technique différente pour construire des objets en 3D à partir de matériaux. Voici quelques-uns des types de procédés de fabrication additive les plus courants [3] :

1. Fused Deposition Modeling (FDM) : Cette technique consiste à chauffer un filament de matériau (plastique, métal, etc.) jusqu'à ce qu'il fonde et à le déposer couche par couche pour construire l'objet.
2. Stereolithography (SLA) : Cette technique utilise un laser pour solidifier une résine liquide couche par couche. La résine est durcie par la lumière du laser, créant ainsi l'objet.
3. Selective Laser Sintering (SLS) : Cette technique utilise un laser pour fusionner de la poudre (plastique, métal, etc.) couche par couche pour former l'objet.
4. Binder Jetting (BJ) : Cette technique consiste à pulvériser une fine couche de poudre de matériau (métal, sable, céramique, etc.) et à utiliser un liant pour coller les particules ensemble.
5. Digital Light Processing (DLP) : Cette technique utilise un vidéoprojecteur pour projeter une image sur une résine liquide, durcissant ainsi la résine couche par couche pour créer l'objet.
6. Electron Beam Melting (EBM) : Cette technique utilise un faisceau d'électrons pour fondre de la poudre métallique couche par couche, créant ainsi l'objet.

Chaque technique a ses propres avantages et limites, et le choix du procédé dépend de plusieurs facteurs, tels que la complexité de l'objet, le matériau utilisé et l'application prévue de l'objet [1].

2.2. Dépôt de matière fondue (FDM)

L'extrusion de matière (EM) est connue aussi sous les noms FDM (Fused Deposition Modelling) ou FFF (Fused Filament Fabrication). Ce procédé a été inventé et breveté en 1989 par Scott Crump. En 1991, la compagnie Stratasys, fondée par la famille Crump, a commencé à commercialiser sa première imprimante sur le marché. Cette technologie est l'une des plus anciennes après la stéréolithographie.

C'est une technique d'impression 3D qui utilise un matériau thermoplastique fondu pour créer des objets couche par couche (*Figure 2*). Il s'agit de la méthode d'impression 3D la plus courante et la plus accessible en termes de coûts [4].



Figure 2. Machine FDM



Figure 3. Machine FDM dual extrusion

Dans le procédé FDM, le matériau thermoplastique, généralement sous forme de filament, est chauffé jusqu'à ce qu'il atteigne un état liquide. Ensuite, il est extrudé à travers une buse chauffée et déposé sur la plate-forme d'impression en suivant les instructions du modèle numérique. Le matériau durcit rapidement au contact de l'air pour former la couche suivante. Le processus est répété pour créer l'objet final (**Figure 4**).

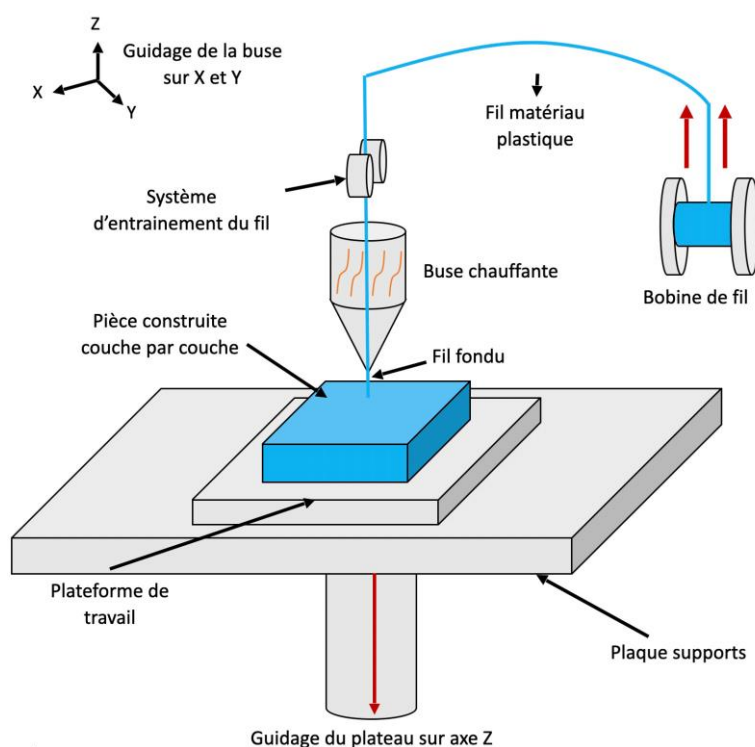


Figure 4. Principe du procédé FDM (<https://www.3dprint.fr/>)

2.2.1. Avantages

Les avantages du FDM comprennent un faible coût de la technologie et des matériaux, une grande précision, une grande résistance mécanique, la capacité à utiliser une variété de matériaux et la possibilité de produire des pièces avec des formes complexes [6].

2.2.2. Inconvénients

Les inconvénients du FDM comprennent un temps d'impression plus long, le temps total d'impression atteint parfois plusieurs jours pour un modèle normal de volume moyen. Une finition de surface limitée (post-traitement), les produits finis fabriqués par les imprimantes FDM n'ont pas de très bonne finition. Les structures de support sont nécessaires pour des géométries et des caractéristiques complexes. Bouchage de la buse et la résistance mécanique limitée des pièces.

2.2.3. Evaluation des performances

Il existe plusieurs facteurs pour évaluer les performances ou les caractéristiques des pièces imprimées en 3D. Nous citons ci-après les principaux facteurs :

- Les propriétés mécaniques: la résistance à la traction ou à la flexion ou à la compression ou à l'impact, l'élongation et la rigidité des pièces présentent de principales propriétés recherchées dans de divers domaines et qui peuvent être influencée par les paramètres d'impression.
- La vitesse d'impression: ce facteur influe sur le temps d'impression et également sur la qualité des pièces imprimées.
- La stabilité dimensionnelle: c'est un facteur très important qui affecte la précision des mesures des pièces imprimées.
- L'aspect visuel: la rugosité, la couleur et la brillance sont toutes des facteurs recherchés non seulement dans le domaine d'art, mais aussi bien dans d'autres domaines.

2.3. Paramètres d'impression

Le processus d'impression FDM est une méthode qui matérialise des objets à l'aide de matériaux thermoplastiques fondus couche par couche. L'obtention des résultats souhaités nécessite un contrôle minutieux des paramètres clés, tels que la température et la vitesse d'extrusion, la vitesse d'impression [7] et l'épaisseur de la couche [8]. D'autres facteurs, tels que le taux d'extrusion, la température de la plaque chauffante et l'utilisation du support, ont un impact sur la qualité et la fiabilité de l'impression. L'ajustement des paramètres en fonction des spécifications du matériau, de l'imprimante et du produit peut donner des résultats sur mesure. Le tableau (**Tableau 1**) définit les paramètres remarquables dans le procédé FDM.

Paramètres en français	Paramètres en anglais	Description
Diamètre de buse	Nozzle diameter	Diamètre de l'orifice de sortie matière
Diamètre de filament	Filament diameter	Diamètre de fil du matériau utilisé
Température de fusion	Melting temperature	Température de chauffage de la buse
Température de lit	Bed temperature	Température de chauffage de la plateforme
Vitesse d'impression	Printing speed	Vitesse de la déposition du matériau
Épaisseur de couche	Layer thickness	Épaisseur de la couche déposée par la buse
Densité de remplissage	Infill density	Pourcentage de remplissage
Nombre de couches	Number of layer	Nombre de couches déposées
Angle de remplissage	Raster angle	Angle entre le fil déposé et l'axe X

Espacement ou vide	Air gap / raster gap	Distance entre deux lignes parallèles dans la même couche
Largeur de raster	Raster width	Largeur de fil déposé
Le motif de remplissage	Patterning	Le type de motif de remplissage

Tableau 1. Description des paramètres du procédé FDM[9].

2.4. Matériaux de la fabrication additive

Les principales catégories de matériaux utilisées dans la fabrication additive sont indiquées sur la **Figure 5.** ci-dessous :

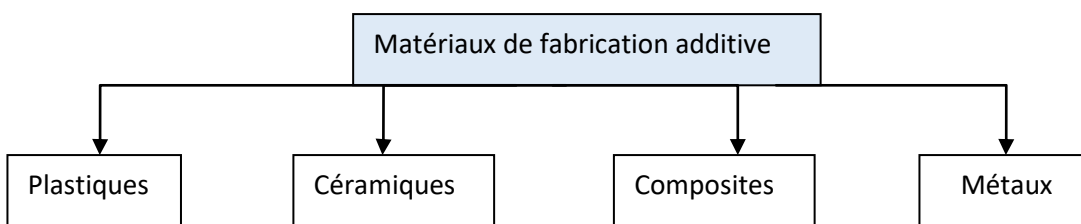


Figure 5. Matériaux utilisés dans la FA

3. Revue de littérature

La modélisation par dépôt fondu (FDM) est une technologie clé de la quatrième révolution industrielle. Une revue de la littérature a été réalisée pour explorer les principaux paramètres du processus et la gestion du processus d'impression en FDM. Ces divers paramètres affectent le comportement mécanique des pièces imprimées, telles que la résistance à la traction, la fatigue et le module d'élasticité, dépendent de paramètres tels que l'angle de dépôt, la température de l'extrusion, la vitesse d'impression, l'épaisseur de la couche, l'angle d'orientation de la pièce et le motif et le taux de remplissage [7] [10]. L'effet de ces paramètres sur les propriétés mécaniques des pièces imprimées a été largement étudié, et des modèles empiriques ont été développés pour relier la réponse aux paramètres du processus [11]. De plus, les propriétés de surface des pièces imprimées, telles que la rugosité de surface, ont également été étudiées en relation avec les paramètres d'impression [12]. L'optimisation des paramètres d'impression peut entraîner une amélioration des propriétés mécaniques, une réduction du temps d'impression, de l'utilisation de filaments et des coûts d'impression.

Les propriétés mécaniques des objets imprimés par FDM sont influencées par la densité de remplissage et le motif de remplissage [11]. L'augmentation de la densité de remplissage améliore généralement la résistance à la traction et le module d'élasticité des objets imprimés [13]. Il a été démontré que la combinaison d'une densité de remplissage plus élevée et d'un schéma de remplissage linéaire permet d'obtenir la résistance à la traction et le module d'élasticité les plus élevés [14]. Différents motifs de remplissage, tels que les motifs lignes, triangles, quadrillés et rectilignes, ont été étudiés, et les motifs en nid d'abeille et en grille se sont révélés être les plus résistants tout en étant plus légers que les motifs solides. L'orientation du motif de remplissage influe également sur les propriétés mécaniques, les échantillons imprimés à 0° ayant la couche la plus adhérente et la meilleure qualité. Le choix du motif de remplissage peut également avoir un impact sur la résistance structurelle, les motifs hexagonaux et linéaires offrant généralement une résistance supérieure à celle des motifs en diamant.

L'augmentation de la vitesse d'impression a un effet négatif sur les propriétés mécaniques des échantillons de PLA imprimés en 3D. Selon l'étude de Kamer et al. [8], une augmentation de la vitesse d'impression entraîne une diminution de la masse, de la dureté de la surface supérieure et de la résistance à la traction des échantillons. De plus, la porosité et la rugosité de surface des échantillons augmentent avec des vitesses d'impression plus élevées. Le module de Young effectif du matériau PLA est également réduit après l'impression. L'étude conclut que l'augmentation de la vitesse d'impression réduit la résilience du matériau PLA et le rend plus cassant.

La résistance mécanique et le comportement à la fatigue des matériaux polymères imprimés par FDM ont été largement étudiés. L'adhérence couche par couche et l'influence des paramètres d'impression rendent l'analyse de fatigue complexe et critique. Le comportement à la fatigue des polymères imprimés par FDM est influencé par des paramètres d'impression tels que la température de l'extrudeuse, l'amplitude de chargement et la fréquence. Des tests de fatigue à faible cycle (LCF) ont été réalisés pour déterminer la résistance à la fatigue des pièces fabriquées par FDM, et la relation entre les paramètres du processus FDM et la résistance à la fatigue a été développée à l'aide de la méthodologie des surfaces de réponse [15]. L'impact de la température d'extrusion et la hauteur des couches sur les caractéristiques mécaniques des pièces imprimées est plus important que la vitesse d'impression [16] [1].

4. Synthèse

Auteurs	Matériaux	Paramètres d'impression	Comportement mécanique testé	résultats	référence
J.Puigoriol-Forcada et al	PC	Orientation d'impression	Traction, Flexion	Les paramètres d'orientation XY et XZ affectent de manière significative le comportement dynamique de la pièce fabriquée	[17]
M.Müller et al	PLA , PLA renforcé	Paramètres recommandé d'impression	Traction statique, Fatigue cyclique	Le matériau PLA renforcé n'a pratiquement aucun effet sur le comportement en fatigue par rapport au PLA pur.	[18]
C. W. Ziemian and R. D. Ziemian	ABS	Orientation des strates 0°, +45°/-45°, +30°/60°	Contraintes résiduels testés après un chargement cyclique suivi d'un essai de traction	Les résistances résiduelles normalisées des éprouvettes bidirectionnelles étaient significativement plus élevées que celles des pièces imprimés à 0°	[19]
M. Domingo-Espin et al	ABS	Hauteur de la couche, Diamètre de la buse, densité de remplissage, Vitesse d'impression	Fatigue de Flexion Oscillante	la densité de remplissage est le paramètre le plus important pour les deux modèles étudiés (Wöhler et Taguchi).	[20]
A. Ouballouch et al	PA renforcé de verre ; PA renforcé de Kevlar	-Hauteur de la couche -T° d'impression -Vitesse d'impression	traction ; fatigue	L'impact de la température d'extrusion et la hauteur des couches sur les caractéristiques mécaniques des pièces imprimées est plus important que la vitesse	[16]

				d'impression.	
M. Azadi et al	ABS ,PLA	Direction d'impression Horizontale et Verticale	fatigue de flexion à cycle élevé	Le PLA avait une meilleure durée de vie en fatigue que l'ABS. la résistance à la fatigue des échantillons imprimés en 3D dans le sens horizontal était plus élevée que celle des échantillons imprimés dans le sens vertical	[21]
R. Jerez-Mesa et al	PLA	Hauteur de la couche, Diamètre de la buse, densité de remplissage, Vitesse d'impression	Durée de vie en fatigue (Nombre de cycles avant la rupture)	la densité de remplissage, le diamètre de la buse et la hauteur de la couche sont les plus influents sur la durée de vie en fatigue des pièces imprimés	[22]
J. A. Travieso-Rodriguez et al	PLA	Hauteur de la couche, Diamètre de la buse, densité de remplissage, Vitesse d'impression Motif de remplissage Largeur du filament	Flexion statique ; fatigue par flexion rotatif	L'orientation de la couche est le paramètre le plus influent, suivi de la hauteur de la couche, de la largeur du filament et de la vitesse d'impression, tandis que la densité de remplissage et le motif de remplissage n'ont pas d'influence significative.	[23]
F. Arbeiter et al	PLA	-Paramètres recommandé d'impression	Rupture par Fatigue + Friction	La durée de vie calculée, basée sur une approche de mécanique de la rupture, s'est avérée être en bon accord avec les résultats des tests de composants en grandeur réelle	[24]
J. C. Camargo et al	PLA-graphène	-Densité de remplissage -Hauteur de la couche	traction ; flexion	Les propriétés mécaniques, augmentent avec l'augmentation du remplissage et s'améliorent à mesure que le paramètre de l'épaisseur linéaire de la couche augmente.	[25]
J. Kluczyński et al	PET-G ; ABS	-Paramètres recommandé d'impression	Traction ; Fatigue à faible cycle	Les échantillons de PETG sont caractérisés par une valeur de cycles jusqu'à la rupture 35% plus élevée que celle des échantillons d'ABS	[26]
Patil et.al	PLA	Motif et taux de remplissage. épaisseur de couche et vitesse d'impression	Rugosité de surface ; filament consommé	- La qualité dimensionnelle est affectée par la vitesse d'impression et la température d'extrusion. - La résistance à la traction maximale est obtenue à haute vitesse	[27]

5. Conclusion et perspective

En conclusion, la technologie de Fabrication par Dépôt de Matière (FDM) dans l'impression 3D représente une avancée significative dans la fabrication additive. Cette technique offre une multitude d'avantages, notamment une réduction de masse, une liberté de conception accrue, la possibilité de créer des prototypes rapidement et une utilisation variée de matériaux. Cependant, l'efficacité et le comportement mécanique des pièces imprimées en 3D dépendent largement des paramètres d'impression choisis. La variété des technologies de fabrication additive témoigne de l'évolution rapide de ce domaine, et FDM en particulier reste une méthode populaire et accessible en termes de coûts. Néanmoins, il est essentiel de reconnaître les limites inhérentes à cette technologie, telles que le temps d'impression prolongé, les finitions de surface limitées et les contraintes liées aux structures de support. L'optimisation des paramètres d'impression, tels que la température, la vitesse d'extrusion, l'épaisseur de couche et le motif de remplissage, joue un rôle crucial dans la détermination des propriétés mécaniques et fonctionnelles des pièces imprimées. La recherche dans ce domaine a permis de comprendre l'impact de ces paramètres sur la résistance, la rigidité et d'autres caractéristiques mécaniques des pièces. Les études de cas et les analyses expérimentales ont montré que des choix judicieux de paramètres d'impression peuvent améliorer considérablement les performances mécaniques des pièces imprimées, en ajustant la densité de remplissage, le motif de remplissage et la vitesse d'impression. Cependant, il convient de noter que les interactions complexes entre ces paramètres nécessitent une approche méthodique et systématique pour parvenir à des résultats optimaux.

En somme, la recherche continue dans le domaine de la technologie FDM et de l'optimisation des paramètres d'impression est essentielle pour repousser les limites actuelles et permettre une utilisation plus répandue et innovante de l'impression 3D. Les avancées dans ce domaine auront un impact significatif sur diverses industries, allant de la médecine à l'automobile, en passant par l'aéronautique et bien d'autres, en offrant des opportunités de conception et de fabrication précises et personnalisées.

Bibliographie

- [1WA] X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou, and D. Hui, “3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 110, pp. 442–458, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.11.034.
- [2NA] B. Nasr, “Optimisation des paramètres d'impression 3D par extrusion de matière des bio-composites à base des résidus industriels forestiers”.
- [3AL] R. Alfattni, “Comprehensive Study on Materials used in Different Types of Additive Manufacturing and their Applications,” *Int J Math, Eng, Manag Sci*, vol. 7, no. 1, pp. 92–114, Jan. 2022, doi: 10.33889/IJMEMS.2022.7.1.007.
- [4ME] H. I. Medellin-Castillo and J. Zaragoza-Siqueiros, “Design and Manufacturing Strategies for Fused Deposition Modelling in Additive Manufacturing: A Review,” *Chin. J. Mech. Eng.*, vol. 32, no. 1, p. 53, Dec. 2019, doi: 10.1186/s10033-019-0368-0.
- [5] “Impression 3D par dépôt de fil fondu - FDM.” <https://www.3dprint.fr/prototypage/impression-3d-par-depot-de-fil-fondu-fdm/> (accessed Aug. 12, 2023).
- [6NY] G. Nyiranzeyimana, J. M. Mutua, B. R. Mose, and T. O. Mbuya, “Optimization of process parameters in fused deposition modelling of thermoplastics: A review,” *Materialwiss. Werkstofftech.*, vol. 52, no. 6, pp. 682–694, Jun. 2021, doi: 10.1002/mawe.202000193.
- [7GE] P. Geng *et al.*, “Effects of extrusion speed and printing speed on the 3D printing stability of extruded PEEK filament,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 37, pp. 266–273, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2018.11.023.
- [8KA] M. S. Kamer, Ş. TemiZ, H. Yaykaşli, A. Kaya, and O. Akay, “EFFECT OF PRINTING SPEED ON FDM 3D-PRINTED PLA SAMPLES PRODUCED USING DIFFERENT TWO PRINTERS,” *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, vol. 6, no. 3, pp. 438–448, Dec. 2022, doi: 10.46519/ij3dptdi.1088805.

- [9MA] V. Mazzanti, L. Malagutti, and F. Mollica, "FDM 3D Printing of Polymers Containing Natural Fillers: A Review of their Mechanical Properties," *Polymers*, vol. 11, no. 7, p. 1094, Jun. 2019, doi: 10.3390/polym11071094.
- [10TA] Md. Q. Tanveer, A. Haleem, and M. Suhaib, "Effect of variable infill density on mechanical behaviour of 3-D printed PLA specimen: an experimental investigation," *SN Appl. Sci.*, vol. 1, no. 12, p. 1701, Dec. 2019, doi: 10.1007/s42452-019-1744-1.
- [11DO] T. D. Do, M. C. Le, T. A. Nguyen, and T. H. Le, "Effect of Infill Density and Printing Patterns on Compressive Strength of ABS, PLA, PLA-CF Materials for FDM 3D Printing," *MSF*, vol. 1068, pp. 19–27, Aug. 2022, doi: 10.4028/p-zhm1ra.
- [12VY] S. Vyavahare, S. Kumar, and D. Panghal, "Experimental study of surface roughness, dimensional accuracy and time of fabrication of parts produced by fused deposition modelling," *RPJ*, vol. 26, no. 9, pp. 1535–1554, Jul. 2020, doi: 10.1108/RPJ-12-2019-0315.
- [13CA] V. Cabreira and R. M. C. Santana, "Effect of infill pattern in Fused Filament Fabrication (FFF) 3D Printing on materials performance," *Matéria (Rio J.)*, vol. 25, no. 3, p. e-12826, 2020, doi: 10.1590/s1517-707620200003.1126.
- [14QA] Md. Qamar Tanveer, G. Mishra, S. Mishra, and R. Sharma, "Effect of infill pattern and infill density on mechanical behaviour of FDM 3D printed Parts- a current review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 62, pp. 100–108, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.02.310.
- [15MI] S. B. Mishra and S. S. Mahapatra, "An experimental investigation on strain controlled fatigue behaviour of FDM build parts".
- [16OU] A. Oubalouch, R. El Alaiji, S. Ettaqi, A. Bouayad, M. Sallaou, and L. Lasri, "Evaluation of dimensional accuracy and mechanical behavior of 3D printed reinforced polyamide parts," *Procedia Structural Integrity*, vol. 19, pp. 433–441, 2019, doi: 10.1016/j.prostr.2019.12.047.
- [17PU] J. M. Puigoriol-Forcada, A. Alsina, A. G. Salazar-Martín, G. Gomez-Gras, and M. A. Pérez, "Flexural fatigue properties of polycarbonate fused-deposition modelling specimens," *Materials and Design*, vol. 155, pp. 414–421, 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2018.06.018.
- [18MU] M. Müller, V. Šleger, V. Kolář, M. Hromasová, D. Piš, and R. K. Mishra, "Low-Cycle Fatigue Behavior of 3D-Printed PLA Reinforced with Natural Filler," *Polymers*, vol. 14, no. 7, 2022, doi: 10.3390/polym14071301.
- [19ZI] C. W. Ziemian and R. D. Ziemian, "Residual strength of additive manufactured ABS parts subjected to fatigue loading," *International Journal of Fatigue*, vol. 134, no. November 2019, p. 105455, 2020, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2019.105455.
- [20DO] M. Domingo-Espin, J. A. Travieso-Rodriguez, R. Jerez-Mesa, and J. Lluma-Fuentes, "Fatigue performance of ABS specimens obtained by fused filament fabrication," *Materials*, vol. 10, no. 12, pp. 1–16, 2018, doi: 10.3390/ma11122521.
- [21AZ] M. Azadi, A. Dadashi, S. Dezhianian, M. Kianifar, S. Torkaman, and M. Chiyani, "High-cycle bending fatigue properties of additive-manufactured ABS and PLA polymers fabricated by fused deposition modeling 3D-printing," *Forces in Mechanics*, vol. 3, no. January, p. 100016, 2021, doi: 10.1016/j.finmec.2021.100016.
- [22JE] R. Jerez-Mesa, J. A. Travieso-Rodriguez, J. Llumà-Fuentes, G. Gomez-Gras, and D. Puig, "Fatigue lifespan study of PLA parts obtained by additive manufacturing," *Procedia Manufacturing*, vol. 13, pp. 872–879, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.146.
- [23TR] J. A. Travieso-Rodriguez, R. Jerez-Mesa, J. Llumà, O. Traver-Ramos, G. Gomez-Gras, and J. J. Roa Rovira, "Mechanical Properties of 3D-Printing Polylactic Acid Parts subjected to Bending Stress and Fatigue Testing," *Materials*, vol. 12, no. 23, p. 3859, 2019, doi: 10.3390/ma12233859.
- [24AR] F. Arbeiter *et al.*, "Damage tolerance-based methodology for fatigue lifetime estimation of a structural component produced by material extrusion-based additive manufacturing," *Additive Manufacturing*, vol. 36, no. November, 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101730.
- [25CA] J. C. Camargo, Á. R. Machado, E. C. Almeida, and E. F. M. S. Silva, "Mechanical properties of PLA-graphene filament for FDM 3D printing," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 103, no. 5–8, pp. 2423–2443, 2019, doi: 10.1007/s00170-019-03532-5.
- [26KL] J. Kluczyński *et al.*, "Fatigue and fracture of additively manufactured polyethylene terephthalate glycol and acrylonitrile butadiene styrene polymers," *International Journal of Fatigue*, vol. 165, no. March, 2022, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2022.107212.

- [27PA] P. Patil, D. Singh, S. J. Raykar, and J. Bhamu, “Multi-objective optimization of process parameters of Fused Deposition Modeling (FDM) for printing Polylactic Acid (PLA) polymer components,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, pp. 4880–4885, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.353.
- [28GH] Ghais Kharmanda. “Fabrication additive de matériau à base d’acide polylactique (PLA) en tenant compte de l’effet d’incertitude du préchauffage.” *Incertitudes et fiabilité des systèmes multiphysiques* 6, no. Numéro 1 (June 14, 2022). <https://doi.org/10.21494/ISTE.OP.2022.0852>.
- [29LK] Lkadi, Omar, Mohammed Nassraoui, and Otmane Bouksour. “Aperçu sur la fabrication additive : technologies, matériaux, applications.” *Incertitudes et fiabilité des systèmes multiphysiques* 6, no. 2 (2022). <https://doi.org/10.21494/ISTE.OP.2022.0881>.