

Titre: Méthodologie d'analyse de performance multi-critère pour outiller la prise de décision sur la fabrication additive de pièce en PA (polyamide) renforcé par fibres de carbone
Title:

Auteur: Thibault Le Gentil
Author:

Date: 2023

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Le Gentil, T. (2023). Méthodologie d'analyse de performance multi-critère pour outiller la prise de décision sur la fabrication additive de pièce en PA (polyamide) renforcé par fibres de carbone [Thèse de doctorat, Polytechnique Montréal].
Citation: PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/57090/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/57090/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Daniel Therriault, & Olivier Kerbrat
Advisors:

Programme: Génie mécanique
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

ET

ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE DE RENNES

**Méthodologie d'analyse de performance multi-critère pour outiller
la prise de décision sur la fabrication additive de pièce en PA
(Polyamide) renforcé par fibres de carbone**

THIBAUT LE GENTIL

Département de génie mécanique

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de *Philosophiæ Doctor*

Génie mécanique

Décembre 2023

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

ET

ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE DE RENNES

Cette thèse intitulée :

**Méthodologie d'analyse de performance multi-critère pour outiller
la prise de décision sur la fabrication additive de pièce en PA
(Polyamide) renforcé par fibres de carbone**

présentée par **Thibault LE GENTIL**

en vue de l'obtention du diplôme de *Philosophiæ Doctor*

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

Bruno AGARD, président

Daniel THERRIAULT, membre et directeur de recherche

Olivier KERBRAT, membre et codirecteur de recherche

Samira KEIVANPOUR, membre

Frédéric SEGONDS, membre externe

Frédéric DEMOLY, membre externe

DÉDICACE

*À tous mes amis du LM2 et de l'ENS Rennes, à tous ceux qui m'ont supporté
vous me manquerez...*

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier toutes les personnes qui m'ont aidé et soutenues pendant ce doctorat à Rennes et à Montréal.

Je voudrais tout d'abord remercier les Professeurs Daniel Therriault et Olivier Kerbrat. Au-delà de m'offrir la possibilité d'accomplir les travaux de cette thèse, ils m'ont accompagné durant cette étape si particulière du doctorat. J'ai pu compter sur leur soutien tout au long de ces épreuves, en m'accueillant dans leurs laboratoires respectifs. Leurs professionnalismes, leurs soutiens et toutes les réflexions ou remarques m'ont aidé à avancer durant ces travaux, ainsi que leurs patiences et leurs compréhensions durant ces différents aller-retour entre la France et le Québec, la période de COVID et de manière générale durant tous les moments difficiles de ces 3 années. J'aimerais aussi remercier le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada et la région Bretagne pour le financement des travaux et des équipements de recherche.

Je voudrais aussi remercier tous mes collègues, passés et présents, qui m'ont épaulé et accompagné. Aux membres du LM2 qui m'ont accueilli et créé une des meilleures ambiances de travail, la phamille ! : JF, Juliette, Jean, Dogan, Alessandra, Facundo, Gabriel, Rui, Anamaria, Olivier, Josué, Floriane, Étienne, Mathieu, Paul. J'aimerais également remercier Yanik, Rouhollah et Kambiz de m'avoir accompagné et aidé dans mes différents projets. À l'ENS je souhaiterais tout d'abord remercier mon camarade co-fondateur du bureau de l'humour, le seul, l'unique, le H ! À ceux qui ont maintenu cette superbe ambiance dans le bureau : Briac, Aurélien, Pauline et Eloann. Aux camarades de l'ENS ou de thèse : Guénolé, Lucas, Bastien, Louise, Anas, Alyssia, Damien, Ibrahim, Corentin, Mourah, Antoine, Maria, Vincent. Également les membres de l'ENS Hamid, Gurvan, Roman ainsi que l'équipe de SUNI, particulièrement Yann et Olivier. Un merci tout particulier à Sarah, d'avoir accepté de venir au Québec pour m'aider dans mes travaux de thèse, ta motivation pour la recherche et nos échanges ont fait le plus grand bien.

Aussi, j'aimerais remercier mes proches durant ces années, qui m'ont supporté, m'ont aidé à me changer les idées, à garder le moral et le sourire : Marc bien sûr, Jean, Keelan, Anne, Yoann, Gurvan, Sonny, Jules, Mathieu, Paul, Maud, Emma, Mathys... Au Canada, ceux qui m'ont accueilli et rendu cette expérience inoubliable : Mérika, Joseph, Alexis, Yara, Emma,

Caroline... la liste est longue tellement de personnes sont importantes pour réussir une telle aventure.

J'aimerais remercier ma famille. En premier lieu mes parents, pour leurs sacrifices qui m'ont permis de faire des études et de réaliser cette thèse. Leur support et leur éducation ont permis de développer ma curiosité et d'avoir les éléments pour réussir cette aventure. Mon frère Aurélien et mon cousin Clément tout deux très importants dans ma vie. À tous ceux qui m'ont aidé et m'ont supporté durant cette période, je vous suis éternellement reconnaissant.

Enfin, merci à toi Antoine, sans qui tout ceci n'aurait aucun sens...

RÉSUMÉ

Les technologies de fabrication additive (FA) suscitent un intérêt croissant en raison des nouvelles possibilités et des avantages qu'elles offrent, notamment pour la production de pièces en petites séries. Parmi ces technologies, certaines permettent la mise en forme de composites à matrice polymère thermoplastique, une catégorie de matériaux de plus en plus populaires pour leurs propriétés mécaniques par unité de masse exceptionnelle. Grâce à sa capacité à produire des formes et des conceptions complexes, la fabrication par filament fondu est devenue une méthode de choix pour créer des composites adaptés aux critères industriels. La combinaison de la FA et des matériaux composites est un outil puissant pour alléger les pièces, particulièrement intéressant dans l'industrie du transport. La fabrication par dépôt de fil fondu de matériaux composites est par conséquent une piste d'amélioration afin de réduire la consommation en carburant des véhicules de transport, et donc d'en réduire l'impact énergétique. Afin de poursuivre la production efficace industrielle de pièce allégée par FA composite, une meilleure compréhension des impacts de fabrication est nécessaire, à la fois suivant des aspects traditionnels (mécanique et économique), mais aussi suivant des aspects émergents (énergétique). À ce titre, les paramètres de fabrication sont la pierre angulaire qui lie ces différents aspects.

Cette thèse a pour objectif d'outiller la prise de décision des utilisateurs de la FA de matériaux composites, par la mise en place d'une méthodologie d'analyse de performance multi-critère. Ce travail repose sur des données expérimentales, obtenues en partant du cas spécifique du dépôt de fil fondu de polyamide renforcé par fibres de carbones.

Les résultats permettent de comprendre et d'évaluer l'impact des paramètres de fabrication sur les aspects mécanique, économique et énergétique. De plus, les résultats obtenus donnent lieu à la mise en place d'une méthodologie générale d'évaluation multi-critère de la FA composite. En premier lieu, un état de l'art permet de distinguer les différents matériaux composites ainsi que les procédés de FA permettant la fabrication de matériaux composites. Également, une étude de la littérature est réalisée sur les paramètres de fabrication et leurs impacts sur les performances mécaniques, économiques et énergétiques. Dans un second lieu, trois campagnes d'essais sont réalisées afin d'évaluer l'impact de cinq paramètres de fabrication : l'épaisseur de couche, la vitesse de déposition, les températures de buse et de plateau, ainsi que la stratégie de chauffe du plateau. À l'aide de ces trois campagnes d'essais, une méthodologie d'analyse multi-critère est mise en place. Cette méthodologie en trois grandes étapes, accompagne la prise en main d'un nouveau couple machine/matériau, développe des outils

de modélisation mécanique, économique et énergétique, et enfin, donne un cadre d'analyse multi-critère permettant de sélectionner le jeu de paramètre optimisé.

ABSTRACT

Additive manufacturing (AM) technologies are receiving increasing interest due to the new possibilities and advantages they offer, particularly for the production of parts in small batches. Some of these technologies enable the shaping of thermoplastic polymer matrix composites, a category of materials that is becoming increasingly popular for its exceptional mechanical properties per unit mass. Thanks to its ability to produce complex shapes and designs, fused filament fabrication (FFF) has become a method of choice for creating composites tailored to industrial requirements. Combining additive manufacturing (AM) with composite materials is an effective technique for lightweighting products, particularly attractive for the transportation sector. Therefore, there is room for development in the FFF manufacture of composite materials in order to lower the fuel consumption of transportation vehicles and, consequently, their energy effect. A deeper comprehension of the effects of manufacturing is necessary to pursue the effective industrial production of lightweight parts utilizing composite additive manufacturing. This understanding needs to include both traditional aspects (mechanical and economic) and emerging aspects (energy). In this respect, manufacturing parameters are the cornerstone that links these different aspects.

This thesis applies a multi-criteria performance analysis methodology with the goal of giving composite materials AM users decision-making tools. The work is based on experimental data that was collected specifically for the FFF of polyamide reinforced with carbon fiber.

The results enable us to understand and assess the impact of manufacturing parameters on mechanical, economic and energy aspects. In addition, the results obtained lead to the establishment of a global methodology for the multi-criteria evaluation of composite AM. Firstly, a review of the current state of the art distinguishes the various composite materials and AM processes used to manufacture composite materials. A literature review is also carried out on manufacturing parameters and their impact on mechanical, economic and energy performance. Secondly, three test campaigns are carried out to evaluate the impact of five manufacturing parameters : layer thickness, deposition rate, nozzle and platen temperatures, and heatbed heating strategy. Based on these three experimental campaigns, a multi-criteria analysis methodology was developed. This methodology, in three main stages, supports the handling of a new machine/material pairing, develops mechanical, economic and energy modeling tools, and finally, provides a multi-criteria analysis framework for selecting the optimized set of parameters.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	vi
ABSTRACT	viii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xii
LISTE DES FIGURES	xiv
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Contexte	1
1.1.1 L'accélération des transitions environnementales de l'industrie aéro-	
nautique	1
1.1.2 Fabrication additive	1
1.1.3 Matériaux composites	2
1.1.4 Maîtrise des performances techniques, économiques et environnementales	3
1.2 Structure du manuscrit	3
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	4
2.1 Fabrication additive de matériaux composites	4
2.1.1 Les fibres de carbone comme renfort au matériau composite	4
2.1.2 La fabrication additive par rapport aux procédés conventionnels	6
2.1.3 La fabrication additive de CFRP	7
2.1.4 CFRP à matrice polyamide	17
2.2 Analyse techno-eco efficiente	19
2.2.1 Influence des paramètres de fabrication	19
2.2.2 Sur les performances mécaniques	21
2.2.3 Sur les performances économiques	23
2.2.4 Sur les performances énergétiques	24
2.2.5 Couplages	26

CHAPITRE 3	OBJECTIFS DE RECHERCHE ET COHÉRENCE DES ARTICLES	30
3.1	Identification de la problématique	30
3.2	Objectifs de recherche	30
3.3	Cohérence des articles	31
CHAPITRE 4	ARTICLE 1 : A COMPREHENSIVE METHODOLOGY TO SUPPORT DECISION-MAKING FOR ADDITIVE MANUFACTURING OF SHORT CARBON-FIBER REINFORCED POLYAMIDE 12 FROM ENERGY, COST AND MECHANICAL PERSPECTIVES	34
4.1	Introduction	35
4.2	Relevant literature on energy and cost assessment	36
4.2.1	Energy assessment and specific energy consumption of FFF	36
4.2.2	Cost assessment	37
4.2.3	Coupling aspects	37
4.2.4	Motivation for the present approach	38
4.3	Modelling approach	38
4.3.1	Flows	38
4.3.2	Cost model	38
4.3.3	Energy model	41
4.3.4	Mechanical performance	42
4.4	Experimental methods	42
4.4.1	Materials and equipment	42
4.4.2	Design of experiment	42
4.5	Results	44
4.5.1	Cost data	44
4.5.2	Energy data	44
4.5.3	Tensile test data	44
4.6	Discussion	46
4.7	Conclusion	47
	References	49
CHAPITRE 5	ARTICLE 2 : IDENTIFYING EFFICIENT SOLUTIONS FOR ADDITIVE MANUFACTURING OF SHORT CARBON-FIBER REINFORCED POLYAMIDE 6 FROM ENERGY AND MECHANICAL PERSPECTIVES	55
5.1	Introduction	55
5.2	Materials and method	57
5.3	Results and discussion	58

5.3.1	Energy consumption	58
5.3.2	Tensile test	59
5.3.3	Decision-making	61
5.4	Conclusion	63
	References	65
CHAPITRE 6 ARTICLE 3 : FRAMEWORK TO ASSESS EFFECTS OF PROCESS PARAMETERS FOR FFF COMPOSITE PARTS REGARDING ENERGY CON- SUMPTION, COST AND MECHANICAL PERFORMANCE		68
6.1	Introduction	68
6.2	Material and methods	72
6.2.1	Methodology	72
6.2.2	Case study	74
6.2.3	Materials and testing	76
6.3	Results	76
6.3.1	Energy consumption and cost	76
6.3.2	Surface roughness	77
6.4	Discussion	77
6.5	Conclusion	78
	References	79
CHAPITRE 7 DISCUSSION GÉNÉRALE		86
CHAPITRE 8 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		92
8.1	Conclusion	92
8.2	Recommandations	92
RÉFÉRENCES		95

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Propriétés physiques et mécaniques de fibres naturelles et synthétiques [20].	5
Tableau 2.2	Compilation de données disponibles pour des matériaux PA6, PA6-CF, PA12 et PA12-CF dans le commerce. <i>Note : NA pour Non Applicable ; %m pour pourcentage massique ; et, " ? " lorsque l'information n'est pas connu</i>	18
Tableau 2.3	Nomenclature des différentes variables avec les définitions et les unités associées.	25
Tableau 2.4	Tableau de compilation des valeurs de SEC et de puissance moyenne présentent dans la littérature, pour différentes machines d'impression FFF. <i>Note : les valeurs indiquées par un " * " ont été adaptées, afin d'établir le ratio entre l'énergie consommée et la masse déposée.</i> . . .	27
Tableau 2.5	Influence des paramètres de fabrication sur les performances énergétique, économique et technique (UTS et Ra).	29
Table 4.1	Compilation of available data on mechanical properties of virgin PA12, PA12 by SLS and FFF, and PA12-CF by SLS and FFF. <i>Note : NA for Non Applicable.</i>	36
Table 4.2	Nomenclature of the different variables with associated definitions and unit.	40
Table 4.3	Printing parameters held constant throughout the experiment.	43
Table 4.4	Variables and design of experiment.	43
Table 4.5	Cost parameters held constant throughout the experiment. <i>Note : prices were converted into Euros according to the exchange rate on March 9 2022.</i>	44
Table 5.1	Printing parameters held constant throughout the experiment.	58
Table 5.2	Design of experiment following L ₂₇ Taguchi orthogonal array.	59
Table 6.1	Compilation of available data on mechanical properties of virgin and FFF PA6 and PA6-CF. <i>Note : NA for Non Applicable.</i>	69
Table 6.2	Sets of parameters extracted from previous work [34]	72
Table 6.3	Printing parameters held constant throughout the experiment.	72
Table 6.4	Nomenclature of the different variables with associated definitions and unit.	74

Table 6.5	Cost parameters held constant throughout the experiment. <i>Note : prices were converted into Euros according to the exchange rate on August 28 2023.</i>	75
Table 6.6	Comparison between predicted and measured mean power, mass, SPE and total cost. <i>Note: mean power correspond to the mean power between two-teeth parts and workholding parts.</i>	77
Table 6.7	Maximum and mean surface roughness comparison between two teeth parts and workholding parts, for the three sets of parameters.	78

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Propriétés mécaniques de différentes gammes de fibres de carbone, d'après [21].	5
Figure 2.2	Zone idéale de compromis entre performance et mise en œuvres en fonction de la longueur et de l'alignement des fibres, traduit depuis [23].	6
Figure 2.3	Représentation schématique des procédés par extrusion de matière. .	9
Figure 2.4	Représentation schématique de trois procédés par transformation de l'espace de construction.	11
Figure 2.5	Représentation schématique des procédés par addition de lame de matière.	14
Figure 2.6	Poster résumé des performances, matériaux compatibles et des avantages / inconvénients des procédés de fabrication par apport de matière localisé, par transformation de l'espace de construction et par addition de lame de matière.	16
Figure 2.7	Pyramide des matériaux polymères en fonction de leurs disponibilités sur le marché pour le procédé FFF, leurs structures internes et leurs fonctionnalités par rapport à leurs propriétés mécaniques (standard, ingénierie et haute performance), inspiré de [66].	17
Figure 2.8	Influence de l'allongement des fibres (les fibres de carbone ont généralement un diamètre de 7 μ m) sur la résistance à la traction du composite par FA pour deux longueurs critiques (à gauche) et sur la résistance à la traction ($l_c = 3$ mm) et le module d'Young (à droite). Les fibres sont supposées principalement alignées, comme indiqué dans la source d'origine [82].	19
Figure 2.9	Présentation des paramètres de fabrication. (a) Schématisation des paramètres de fabrication de vitesse de déposition, épaisseur de couche, température de buse et de plateau ; (b) Schématisation des paramètres d'angle de trame (à gauche) et d'orientation de déposition (à droite) ; (c) Diagramme en arêtes de poisson des paramètres de fabrication du procédé FFF.	22
Figure 3.1	Articulation des contributions scientifiques de ce manuscrit.	32
Figure 4.1	Production line of FFF printing with flow representations (energy flows in orange, resources flows in blue, and consumables flows in purple). .	39

Figure 4.2	Power profile and identification of main printing phases. This profile corresponds to the printing of a specimen A1, PA12-CF at 260 °C printhead and 100% heating at 80 °C for the heatbed. Steps 1-3, 5 and 6 are preparation steps (green periods). Step 4 is fabrication (red period).	41
Figure 4.3	The estimated manufacturing cost and cost distribution for each condition. <i>Note : Condition #1 is not represented.</i>	45
Figure 4.4	Mean data for SEC and SPE for each experiment. Error bars correspond to 95% confidence interval. <i>Note : Condition #1 is not represented.</i>	45
Figure 4.5	Comparison of tensile modulus and UTS for each conditions. Error bars correspond to 95% confidence interval. <i>Note : Condition #1 is not represented.</i>	46
Figure 4.6	Radar charts for Conditions 2-9. Values are normalized, 100% being the optimum value (maximum for ultimate tensile strength and minimum for total cost and SEC).	48
Figure 5.1	Impact of the different printing parameters on energy consumption during printing phase.	60
Figure 5.2	Sorted energy consumption values for the twenty-seven conditions. In green, bed heating strategy of 0 %; in blue, heating for 50 % of the layers; in red, 100 %. Black dotted line represents mean value. Error bars represent 95 % confidence interval.	60
Figure 5.3	Impact of the different printing parameters on UTS during printing phase.	61
Figure 5.4	Sorted UTS values for each condition. bed heating strategy of 0 %; in blue, heating for 50 % of the layers; in red, 100 % of the layers. Black dotted line represents mean value. Error bars represent 95 % confidence interval.	62
Figure 5.5	Plot of energy consumption with respect to 1/UTS for each condition. In green, bed heating stopped after 3 layers; in blue, heating for 50 %; in red, 100 %. Black dotted line represent the Pareto front.	63
Figure 5.6	Plot of energy consumption with respect to 1/UTS for each condition, with Pareto front, and value function with: a) slope = 1 (no preference between energy consumption and UTS); b) slope = 0.1 (low energy consumption is preferred); and c) slope = 10 (UTS is favored). The black circle correspond to optimized condition for each slope.	64

Figure 6.1	Graphical summary of the two-step methodology. Details on the first step can be found on prior work [34].	73
Figure 6.2	Geometry of the case study, dimension are based on reference ISO606 06B: chain pitch is 9.52 mm; cylinder diameter is 5.72mm; thickness is 5.20 mm and 48 tooth. (a) Workholding gear; (b) Two-teeth part, surface in green correspond to the measured surface.	75
Figure 7.1	Schéma récapitulatif de la méthodologie développée durant ces travaux. P_{fi} : paramètre de fabrication i ; N_i : Niveau i du paramètres de fabrication; C_T : coût total; C_f : coût de fabrication; T : indicateur technique; T' : indicateur technique sur les pièces tests; E : indicateur énergétique; C : indicateur économique.	87

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

1.1.1 L'accélération des transitions environnementales de l'industrie aéronautique

L'objectif 9 des dix-sept objectifs de développement durable de l'ONU encourage la transition vers des modes de transports durables, permettant d'atténuer les externalités négatives du transport, tels que les émissions de gaz à effets de serre [1]. Pour ce faire, les différents secteurs du transport sont à la recherche de nouvelles solutions et méthodes permettant de réduire la consommation de leurs engins. Dans le secteur aéronautique, l'Association du transport aérien international (IATA) a déclaré vouloir réduire de 50 % les émissions du secteur d'ici 2050 [2]. Un moyen efficace d'accroître l'efficacité énergétique et de réduire la consommation de carburant consiste à réduire la masse des avions, une masse plus faible nécessite moins de force de portée et donc moins de carburant [3]. À titre d'exemple, une réduction de 20 % de la masse d'un Boeing 787 diminue de 10 à 12 % la consommation de carburant [4]. L'allègement des pièces est donc un axe crucial de développement afin de limiter l'impact des engins pendant leur phase d'utilisation. La mise en service de nouveaux avions performants durant les années 2000 (Boeing 787 Dreamliner et Airbus A380) a permis d'améliorer l'efficacité opérationnelle grâce à l'utilisation intensive de nouveaux matériaux appliqués à diverses parties de la structure de l'avion. L'introduction de la fibre carbone et des matériaux composites a permis d'alléger les structures des avions tout en améliorant leur résistance, leur durée de vie et les exigences en matière de sécurité [4]. En parallèle, l'utilisation de plus en plus répandue des procédés de fabrication additive, pour l'instant principalement métallique, permet également un allègement de certaines pièces dans l'aéronautique ou dans le transport [3].

1.1.2 Fabrication additive

La fabrication additive (FA), également connue sous le nom d'impression 3D, est une technologie émergente qui propose un nouveau paradigme pour la conception et la fabrication en ingénierie, qui a de profondes implications économiques, environnementales et sécuritaires [5]. Cette famille de procédé consiste en l'assemblage, couche par couche, de matières premières (sous forme de poudre, de liquide, de filament ou encore de feuille) de pièces tridimensionnelles. Généralement opposée aux procédés de fabrication soustractifs ou basés sur la déformation (dit conventionnels), la FA ne nécessite aucun moule, ni d'outils ou de ma-

trices pour la fabrication de ces pièces. Par l'ajout de matière couche par couche, la FA offre ainsi une liberté de conception et une capacité à imprimer localement presque tous les objets imaginables. En effet, par la FA il est possible de réaliser une optimisation des pièces à l'échelle macroscopique, via une optimisation topologique (modification de la géométrie de la pièce), et à l'échelle mésoscopique, via une optimisation de la structure lattice (modification de la composition interne de la structure). Ces possibilités de conceptions permettent ainsi la fabrication de pièces allégées, plus simplement et potentiellement à moindre coût que les procédés de fabrication conventionnels [6]. Malgré ces avantages, les valeurs rapportées dans la littérature de consommation énergétique de la FA sont supérieures de 1 à 2 ordres de grandeur par rapport aux procédés conventionnels [7]. Aussi, la construction couche par couche en FA peut entraîner des points faibles et une résistance réduite, ce qui rend les pièces fabriquées par FA limitée en termes de performance mécanique en comparaison des procédés soustractifs [8]. Enfin, les coûts unitaires de fabrication par FA sont constants et ne bénéficient pas ou peu d'économie d'échelle. La FA est donc généralement réduite aux petites séries [9].

1.1.3 Matériaux composites

Les composites sont des matériaux multiphasés, composés d'un minimum de deux matériaux : une matrice et un renfort. La matrice (généralement polymère) est l'enveloppe du matériau qui a pour but de transmettre les efforts au renfort, de protéger contre les conditions extérieures et de manière générale, de donner la forme souhaitée à la pièce. Le renfort est l'armature du matériau qui vient améliorer les propriétés de la matrice, que ce soit des propriétés mécaniques, électriques, thermiques, chimiques, etc. [10]. La combinaison de deux matériaux ou plus résulte en un matériau dont les propriétés sont supérieures à celles des matériaux individuels. En outre, les composites peuvent être conçus pour avoir des propriétés spécifiques, telles qu'une grande résistance, un faible poids ou une grande rigidité, en fonction de l'application [10]. Il existe une grande variété de procédés de fabrication des composites, qui peuvent être répartis en 3 catégories : conventionnel (par exemple stratification manuelle, moulage, pulvérisation) ; automatisé (par exemple pose automatisée de bandes ou placement automatisé des fibres) ; et, fabrication additive (par exemple dépôt de fil fondu, stéréolithographie) [11]. Parmi ces procédés, la flexibilité et la liberté géométrique offertes par la FA permettent d'obtenir des propriétés personnalisées adaptées à des besoins spécifiques. Cela signifie que les produits peuvent être conçus et fabriqués avec des spécifications et des caractéristiques uniques qui ne sont pas possibles avec les méthodes de fabrication soustractive [11].

1.1.4 Maîtrise des performances techniques, économiques et environnementales

Ce faisant, les matériaux composites et la FA sont de plus en plus étudiés et appliqués aux différents secteurs du transport dans l'objectif de réduire la masse des engins, donc la quantité de carburant nécessaire, et ainsi réduire les impacts environnementaux du transport. Toutefois, l'examen seul de la ou des pièces durant leurs phase d'utilisation est limité, en effet, le report des externalités négatives sur d'autres phases du cycle de vie de la pièce (extraction des matières premières, fabrication, transport, distribution, fin de vie) pourraient neutraliser les gains obtenues sur la phase d'utilisation, voire les empirer [5]. C'est pourquoi la FA de pièces en matériaux composites soulève plusieurs questions quant à sa viabilité économique, technique et énergétique. Bien que cette technologie ait le potentiel de révolutionner l'industrie manufacturière, il est crucial d'examiner son impact sur ces trois aspects avant de l'adopter pleinement. Ce manuscrit présente une méthodologie permettant d'évaluer les aspects économiques, énergétiques et techniques afin d'orienter la prise de décision des acteurs de la chaîne de fabrication.

1.2 Structure du manuscrit

Ce manuscrit de thèse par articles comprend huit chapitres. Le présent chapitre introduit le contexte de la thèse et la structure du manuscrit. Le chapitre 2 présente la revue de la littérature sur la fabrication additive de matériaux polymères renforcés par fibres de carbone, les analyses sur les impacts mécaniques, économiques et environnementales ainsi que les études multi-objectifs combinant les impacts. Le chapitre 3 expose la problématique, les objectifs de recherche et la cohérence des articles. Les principaux résultats de cette thèse sont présentés sous la forme de trois articles publiés ou soumis à des revues scientifiques à comité de lecture dans les chapitres 4 à 6. Le chapitre 4 introduit une évaluation multi-objectifs technico-économico-énergétique de la FA d'un matériau composite, le polyamide renforcé par fibres de carbone. Le chapitre 5 met en place un plan d'expériences afin d'évaluer l'impact des paramètres de fabrication pour prolonger l'étude réalisée dans l'article du chapitre 4, en allant plus loin sur la mise en place d'outils graphique de prise de décision multi-objectifs (technique et environnemental). Puis, le chapitre 6 applique ces outils et effectue une transition vers l'exploitation des concepts et outils développés dans les articles du chapitres 4 et 5 dans le cas de pièces réelles. Le chapitre 7 est consacré à une discussion générale des travaux de recherche. Enfin, le chapitre 8 résume les conclusions de la recherche et formule des recommandations pour les travaux futurs.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

La revue de la littérature contient deux grandes parties. La première partie présente la fabrication additive de matériaux composites renforcés par fibres de carbone, ainsi que les différents procédés de FA composites. La seconde partie présente les différentes analyses économique, environnementale et technique de ces procédés.

2.1 Fabrication additive de matériaux composites

Les polymères ont toujours attiré l'attention des fabricants en raison de leurs caractéristiques uniques telles que la facilité de production, la disponibilité, la légèreté, le faible coût et la ductilité [12]. Ces propriétés ont fait des polymères un choix populaire pour un large éventail d'applications, notamment les emballages, les textiles, les pièces automobiles et les matériaux de construction. Toutefois, malgré leurs nombreux avantages, les pièces fabriquées à partir de polymères purs présentent des limites en termes de propriétés mécaniques et de fonctionnalité. Par conséquent, elles ne sont pas largement utilisées comme des pièces entièrement fonctionnelles et/ou structurelles [12]. Les matériaux composites à matrice de polymère (PMC) ou composite renforcé par fibre (FRC) sont alors apparus comme l'une des solutions les plus intéressantes afin de surmonter à ces limites, pouvant dans certaines situations remplacer les pièces métalliques [13, 14].

2.1.1 Les fibres de carbone comme renfort au matériau composite

Parmi les différents renforts des matériaux composites (aramide, verre, carbone, bois, etc.), les fibres de carbone ont reçu une attention particulière du fait de leurs excellentes propriétés. Les fibres de carbone offrent le module spécifique le plus élevé et la résistance spécifique la plus élevée de toutes les fibres de renforcement [15]. Le Tableau 2.1 compare les propriétés techniques de différentes fibres répandues. De plus, les fibres de carbone ne souffrent pas de corrosion sous contrainte ou de rupture sous contrainte à température ambiante, comme cela peut être le cas pour les fibres de verre et de polymère organique. En particulier à haute température, la résistance et le module sont supérieurs par rapport à d'autres matériaux [15, 16]. Ainsi, les composites à base de fibres de carbone conviennent parfaitement aux applications nécessitant résistance, rigidité avec une masse réduite, comme les secteurs du transport. Alternativement, les fibres de carbone présentent également une bonne conductivité électrique, thermique et un faible coefficient de dilatation linéaire [17]. Bien qu'il existe

différentes gammes de fibre de carbone, tel qu'indiqué sur la Figure 2.1, en fabrication additive on retrouve principalement des fibres haute résistance (HS), aussi appelées à module standard [18, 19].

TABLEAU 2.1 Propriétés physiques et mécaniques de fibres naturelles et synthétiques [20].

Fibre	HS Carbone	Aramide	Verre (E)	Verre (S)	Bois
Densité [g/cm ³]	1.82	1.44	2.55	2.5	1.5
Diamètre [μm]	8.2	11.9	<17	-	-
Résistance à la traction [MPa]	2 550	3 000	3 400	4 580	1 000
Résistance spécifique [S/rho]	1 401	1 916	1 333	1 832	667
Module de Young [GPa]	200	124	73	85	40
Module spécifique [E/rho]	109.9	86.11	28.63	34	26.67
Déformation à la rupture [%]	1.3	2.5	3.4	4.6	4.4

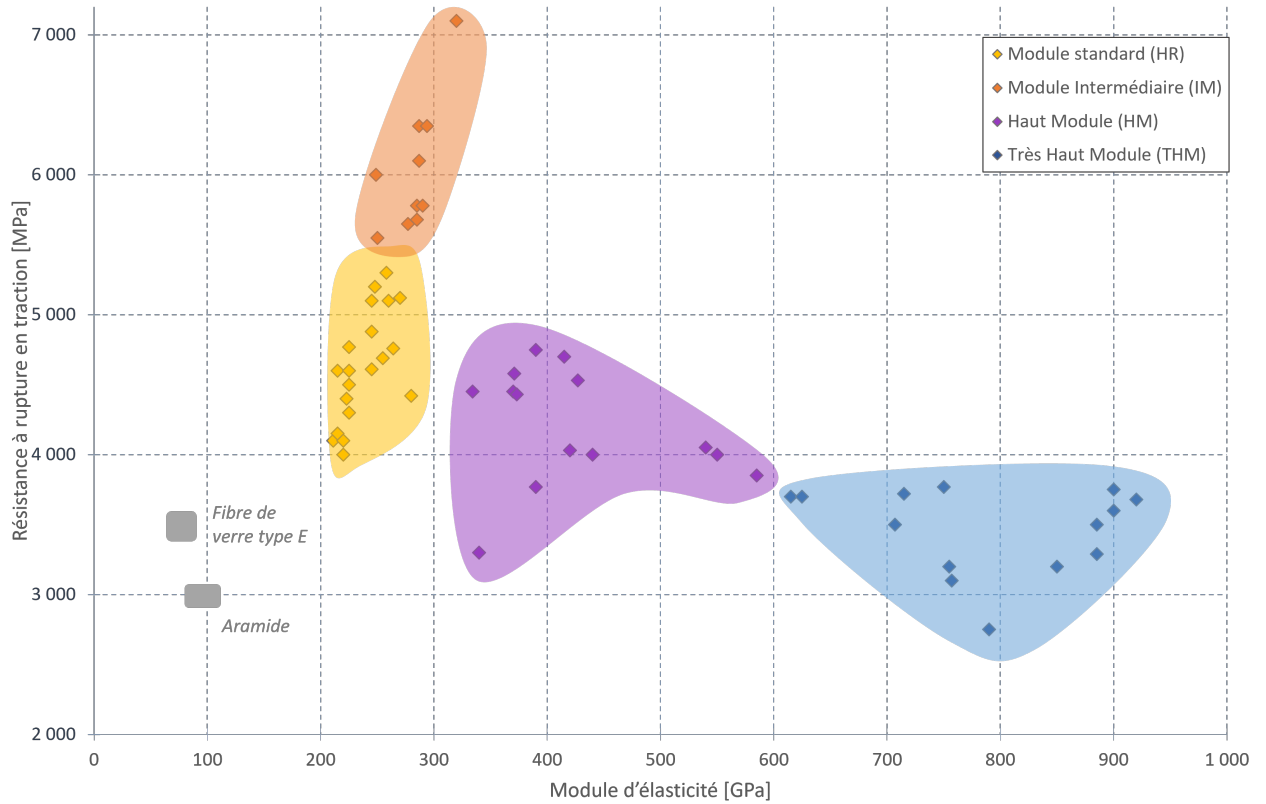


FIGURE 2.1 Propriétés mécaniques de différentes gammes de fibres de carbone, d'après [21].

Dans la fabrication additive, on distingue les fibres de carbone discontinues et continues. Les fibres discontinues sont différenciées en fonction de leurs longueurs ou de leurs diamètres,

en trois groupes : (1) les nanofibres avec des diamètres inférieurs aux micromètres ; (2) les microfibres, avec des longueurs compris entre 50 et 400 μm ; (3) les milli-fibres, au-delà de 400 μm [17]. Les composites renforcés par des fibres courtes peuvent être fabriqués à l'aide d'un large groupe de procédés de fabrication additive (comme nous le verrons dans la section 2.1.3), les fibres continues étant limitées, quasi exclusivement, aux procédés par extrusion de matière [14, 22]. Enfin, l'alignement des fibres dans la fabrication de composites renforcés par fibres courtes est un paramètre crucial. Les fibres courtes non alignées peuvent offrir une grande facilité de traitement en termes de volume et de complexité des pièces, mais manquent de performance, tandis que les formes de matériaux continus n'utilisent pas 100 % de leurs propriétés lorsqu'elles sont employées dans des géométries complexes en raison des défauts associés, de la variabilité des matériaux et des possibilités de conception [14, 23]. Comme indiqué sur la Figure 2.2, il existe un "point idéal" dans lequel la perte de performance est acceptable pour des gains de processabilité en utilisant des fibres courtes très alignées.

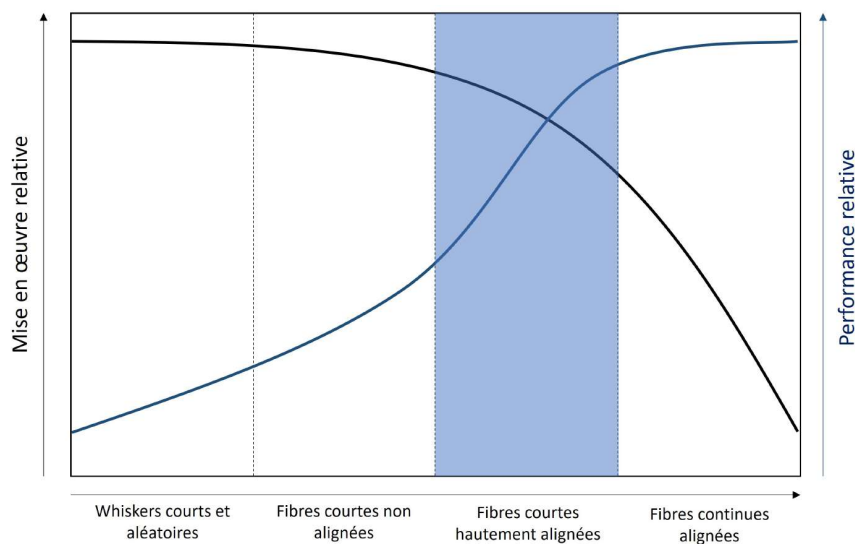


FIGURE 2.2 Zone idéale de compromis entre performance et mise en œuvres en fonction de la longueur et de l'alignement des fibres, traduit depuis [23].

2.1.2 La fabrication additive par rapport aux procédés conventionnels

Historiquement, les matériaux composites ont principalement été fabriqués à partir de procédés dits conventionnels. Des procédés comme la stratification manuelle, le moulage par transfert de résine, le moulage par autoclave ou encore le moulage par compression sont parmi les plus répandus [11]. Développée plus récemment, la FA a permis une approche fondamentalement différente. Initialement prévue pour du prototypage rapide, aujourd'hui la

FA est une alternative pratique et réduisant les longs délais de production. Les procédés de FA fonctionnent sans outillages (tels que moules ou matrices) et sont particulièrement adaptés pour fabriquer directement un petit lot de pièces ou des géométries complexes, dont la production serait coûteuse et fastidieuse en utilisant des méthodes de fabrication conventionnelles [24]. En outre, la géométrie d'une pièce peut être facilement modifiée par FA afin d'obtenir une structure optimale qui possède les propriétés mécaniques souhaitées avec une masse minimale [17]. En réduisant le circuit entre l'utilisateur et l'étape de fabrication, la FA facilite la fabrication de pièces personnalisées les rendant compétitives dans les domaines où il existe un besoin inhérent de produits sur mesure ou à faible volume, comme les secteurs du transport [25]. Néanmoins, la FA englobe une variété de processus de fabrication différents, et à ce titre, les performances et la compatibilité des matériaux peuvent varier considérablement en fonction du processus de FA choisi. Chaque procédé présente des avantages et des limites qui lui sont propres et qui doivent être pris en compte lors de la sélection de la méthode appropriée pour une application spécifique. Certains procédés peuvent être mieux adaptés à la production de géométries complexes, tandis que d'autres peuvent offrir une finition de surface ou des propriétés mécaniques supérieures. La section suivante présentera les différents procédés de FA permettant la fabrication de matériau composite à matrice polymère et leurs caractéristiques.

2.1.3 La fabrication additive de CFRP

Les procédés de FA peuvent être regroupés en trois catégories :

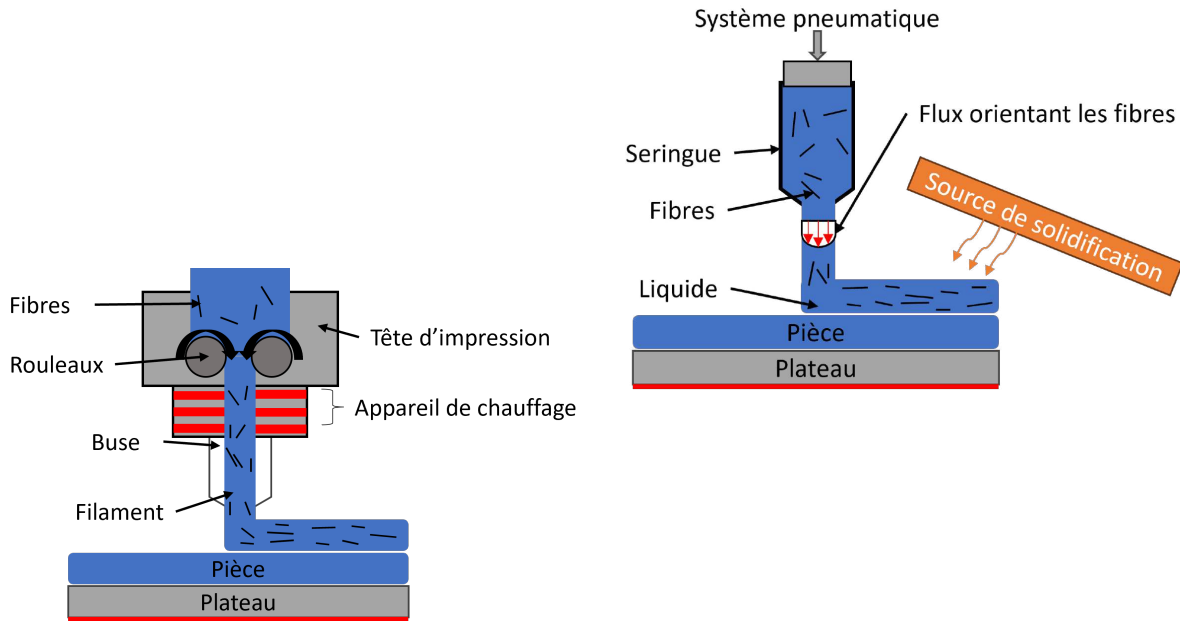
- Par extrusion de matière : le composite pré-préparé sous forme de filament, de liquide ou d'encres est déposé sur un plateau de fabrication.
Exemples : Fused Filament Fabrication (FFF) ; Liquid Deposition Modeling (LDM) ; Direct Ink Writing (DIW).
- Par transformation de l'espace de construction : la matière présente dans un espace de fabrication est transformée par un apport extérieur d'énergie (laser, solvant, chaleur, etc.) ;
Exemples : Selective Laser Sintering (SLS) ; Stereolithography (SLA) ; Powder Bed Jetting.
- Par addition de lame de matière : des lames de matières sont déposés les unes sur les autres et découpés afin de former la géométrie souhaitée.
Exemples : Laminated Object Manufacturing (LOM) ; Automated Tape/Fiber Placement (ATP/AFP).

Extrusion de matière

Le processus d'extrusion du matériau dépose sélectivement le matériau composite sous forme de filament solide (Fused Filament Fabrication), de pâte (Liquid Deposition Modeling) ou d'encre (Direct Ink Writing), à travers une buse sur un plateau, chauffant ou non. Les trois procédés fonctionnent sur le même principe d'extrusion de matière, comme présenté sur la Figure 2.3. Aucune modification n'est nécessaire pour extruder des matériaux composites renforcés par des fibres courtes, tandis que pour les fibres continues, plusieurs solutions existent, certaines ne nécessitent qu'une petite modification de la tête d'impression (filament pré-imprégné), d'autres nécessitent des modifications plus conséquentes (utilisation de deux têtes d'impressions ou imprégnations in-situ) [22, 26]. Les procédés basés sur l'extrusion sont peu coûteux et relativement simples, de plus, peuvent être facilement étendus à l'impression multi-matériaux grâce à l'utilisation de buses multiples. L'inconvénient de ces procédés, cependant, est l'effet de stratification dans les pièces fabriquées. De par la nature des procédés d'extrusion de matière, une force de cisaillement est générée à l'intérieur de la buse d'extrusion, ce qui entraîne un alignement des fibres courtes [27, 28].

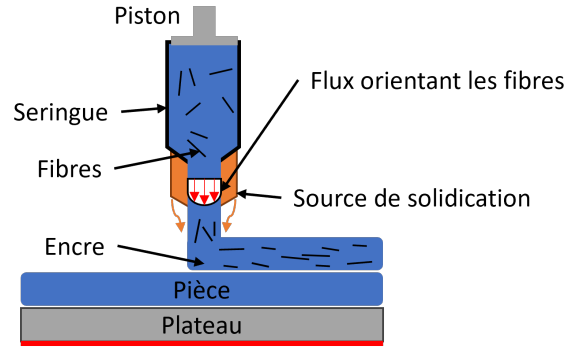
Le principe de fonctionnement du FFF est l'extrusion d'un filament de matière polymère thermoplastique, fondu à l'intérieur d'une tête d'impression et extrudé sur un lit d'impression, comme présenté sur la Figure 2.3a. Les matériaux thermoplastiques compatibles comprennent l'acide polylactique (PLA), l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS), l'acrylonitrile styrène acrylate, le polycarbonate (PC), le polyamide (PA) ou encore le polyéthylène téréphtalate modifié par le glycol (PETG) [30, 6]. Les thermoplastiques haute performance tels que le polyétherimide (PEI), le sulfure de polyphénylène (PPS), le polyphénylsulfone (PPSU) et la famille des polyaryléthercétones (PAEK) peuvent également être imprimés à l'aide de la FFF ; cependant, ils sont relativement chers et difficiles à imprimer, car nécessitant des températures plus élevées et requérant ainsi un plateau chauffant voire une enceinte chauffante [26, 14]. Si le procédé Fused Filament Fabrication (FFF) n'est peut-être pas le premier procédé FA inventé, il s'agit sans aucun doute de l'une des techniques les plus répandues et les plus développées en raison de sa simplicité et de sa rentabilité [10].

Pour les matériaux composites sous forme de pâte ou de fluide, on parle alors de Liquid Deposition Modeling (LDM). Le principe de fonctionnement du LDM est présenté Figure 2.3b. Les matériaux sont déposés sélectivement à partir d'une seringue fixée à la machine à commande numérique informatisée. Les thermoplastiques comme le PLA [31] ou des thermodurcissables à bases acrylique ou époxy sont principalement utilisés comme matrice [32]. Le liquide étant à température ambiante, l'extrusion de thermodurcissables est plus aisée. Le risque d'une obstruction de la buse est cependant élevé de par la viscosité des matériaux [6].



(a) Principe de fonctionnement du procédé *Fused Filament Fabrication*, inspiré de [29, 6].

(b) Principe de fonctionnement du procédé *Liquid Deposition Modeling*, inspiré de [6].



(c) Principe de fonctionnement du procédé *Direct Ink Writing*, inspiré de [29].

FIGURE 2.3 Représentation schématique des procédés par extrusion de matière.

À ce jour, les renforts n'existent que sous la forme de fibres discontinues [13]. De plus, l'alignement des fibres est plus aléatoire, toutefois des améliorations sont possibles en contrôlant l'allongement des fibres et le diamètre de la buse [6]. Enfin, bien que très similaire au pro-

cédé FFF, le LDM est généralement plus coûteux, les matériaux et les machines étant moins développés, leurs coûts peuvent être supérieurs au FFF. Aussi, les adaptations nécessaires aux systèmes en termes de ventilations et de solidification des couches déposées rajoutent des coûts supplémentaires [33].

Similaire au LDM dans le fonctionnement, le Direct Ink Writing (DIW) utilise des matériaux sous forme d'encre, comme présenté à la Figure 2.3c. Ce procédé a été utilisé pour la fabrication de biomatériaux, d'encres conductrices et composites [34]. La matrice polymère thermodurcissable peut être photopolymérisable (auquel cas la polymérisation se fait sous UV ou laser pendant l'extrusion [35]) ou bien, par ajout d'additifs, la résine peut conserver sa structure pendant l'extrusion et polymériser ensuite [36]. Contrairement au FFF et au LDM, le procédé DIW ne permet pas d'imprimer des matériaux de support. Cela peut limiter les géométries des pièces qui peuvent être fabriquées à l'aide de cette technique [37]. Enfin, tout comme le LDM, l'orientation des fibres peut être plus aléatoire, limitant les propriétés mécaniques des pièces fabriquées. Aussi, pour les mêmes raisons que pour le procédé LDM, le DIW est généralement légèrement plus coûteux que le procédé FFF [37].

Transformation de l'espace de construction

Les procédés par transformation de l'espace de construction modifie la matière sous forme liquide par laser (Stereolithography), ou de poudre par laser (Selective Laser Sintering) ou solvant (Powder Bed Binder Jetting). Ces procédés sont généralement plus onéreux et plus lents que les procédés par extrusion de matière, mais chacun de ces procédés offre soit une précision de fabrication, soit des propriétés mécaniques supérieures, soit une facilité de fabrication multi-matériaux ou grand volume [38, 39, 40]. Pour une fabrication de composites à fibres courtes, les fibres doivent être mixées à la matrice en amont [39, 6]. Enfin, ces procédés nécessitent une ou plusieurs étapes de post-process afin de consolider la pièce ou de retirer les adjuvants [6, 41].

Le Selective Laser Sintering (SLS) est un procédé de fabrication par ajout de couches à base de poudre, dont le fonctionnement est illustré à la Figure 2.4a. Des faisceaux laser en mode continu ou pulsé sont utilisés comme source de chaleur pour scanner et assembler des poudres en couches de tailles et de formes prédéterminées [45]. Bien que la SLS soit l'une des technologies de FA les plus matures et à la croissance la plus rapide, elle a attiré peu d'attention de la part de la communauté de recherche sur la FA composites [6]. Pour l'impression des composites par SLS, les fibres sont introduites dans le polymère, puis pulvérisées pour créer une poudre. Ce procédé permet d'obtenir des longueurs de fibres très courtes de l'ordre de quelques dizaines de microns, de plus, la mauvaise dispersion des fibres de renforcement dans

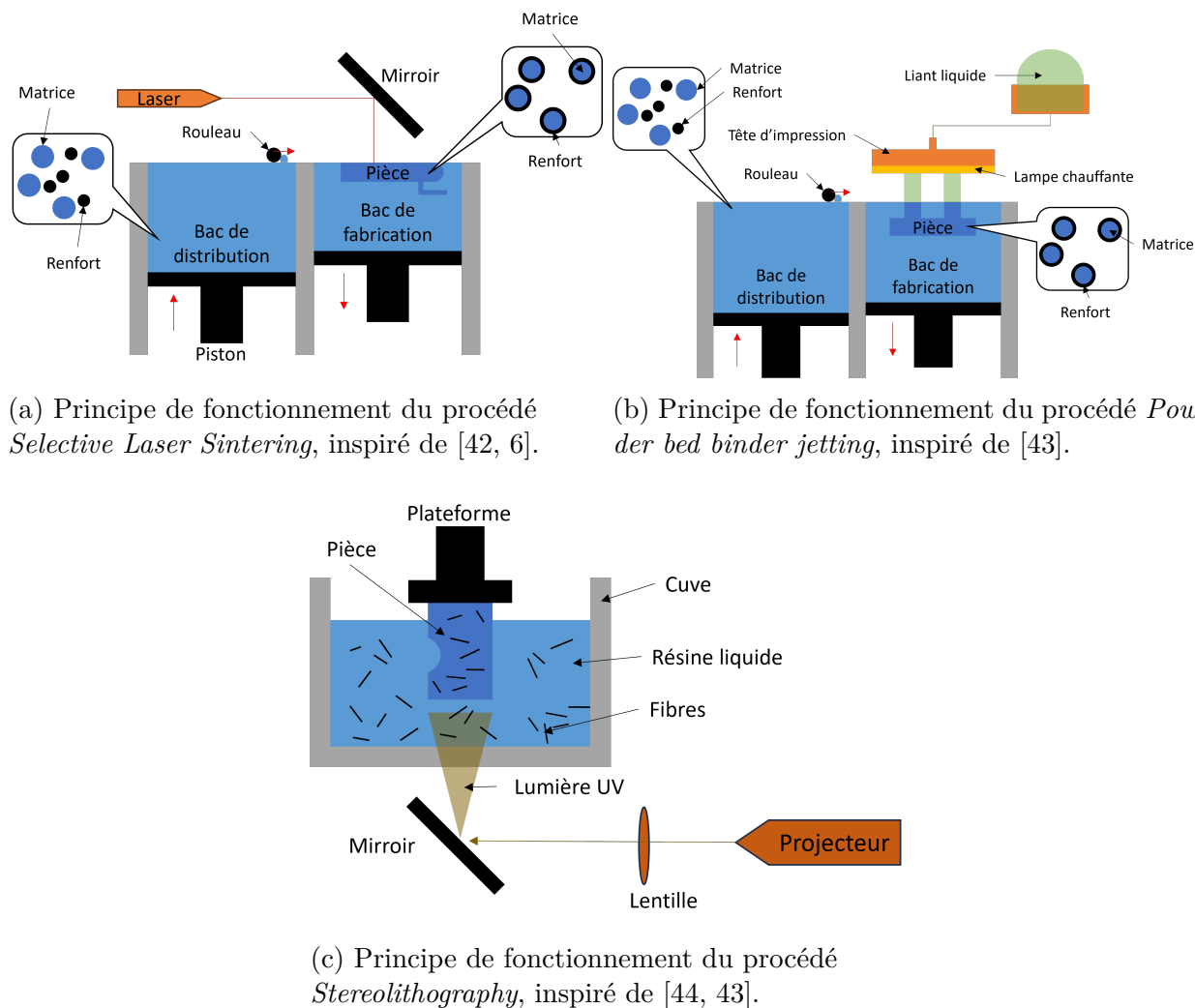


FIGURE 2.4 Représentation schématique de trois procédés par transformation de l'espace de construction.

le matériau en poudre, entraîne des zones faibles et des incohérences dans la pièce finie [46]. De nombreuses tentatives ont été faites pour améliorer les propriétés mécaniques et physiques en renforçant la poudre brute avec des fibres telles que des nanotubes de carbones [47], du noir de carbone [48], des nanofibres de carbone [49] et quelques autres renforts micro ou nanométriques [50, 51, 52].

Des progrès significatifs dans le développement d'un composite thermodurcissable renforcé par des fibres de carbone courtes ont été réalisés en 2016 par l'équipe de Zhu [53]. Ce composite est créé par l'infiltration sous pression de PA-12/CF poreux avec de la résine époxy à haute température (150 °C). Le matériau obtenu présente d'excellentes propriétés mécaniques, notamment une résistance, une rigidité et une ténacité élevées. Toutefois, il est à

noter que le processus de préparation de la poudre nécessaire à ce composite est long et fastidieux. Cela signifie que le processus actuel en est encore à la phase de recherche et qu'il doit encore être optimisé avant de pouvoir être utilisé à plus grande échelle [54]. L'un des principaux avantages de la SLS est que les pièces produites à l'aide de ce procédé présentent généralement des propriétés mécaniques supérieures à celles d'autres procédés de fabrication additive, tels que les méthodes basées sur l'extrusion. En effet, la fusion au laser permet d'obtenir une structure du matériau plus uniforme et plus dense, ce qui se traduit par une meilleure résistance, une plus grande rigidité et une plus grande durabilité [55].

La stéréolithographie (SLA) est le plus ancien procédé de fabrication additive, développée pour la première fois par le Dr Hideo Kodama en 1981 [56]. La SLA est une méthode de polymérisation en cuve, dans laquelle les couches d'une résine précurseur sont exposées séquentiellement à la lumière ultraviolette (UV) et ainsi solidifiées de manière sélective. Une molécule photo-initiatrice (PI) présente dans la résine réagit à la lumière entrante et, sous l'effet de l'irradiation, active localement la réaction chimique de polymérisation, ce qui conduit à un durcissement uniquement dans les zones exposées [39], tel que présenté sur la Figure 2.4c. De nombreux types de renforts ont été imprimés avec succès (fibres de verre, fibres de carbone, ou encore fibres paraamide [57]), toutefois, le choix de résine est limité [6]. Parmi les procédés FA par transformation de l'espace de construction, le SLA est le seul procédé permettant la fabrication de fibres continues [44]. Cette modification entraîne l'ajout d'un système d'alimentation et de positionnement des fibres continues, ainsi que d'un laser qui polymérise sélectivement la résine autour des fibres. Cependant, le processus est limité par la faible adhésion entre la résine et les fibres, tout défaut d'alignement ou toute répartition inégale des fibres peut compromettre l'intégrité de la pièce [57]. À ce titre, la SLA avec des fibres continues reste une technologie de pointe qui est encore en cours de développement et de perfectionnement [14]. Dans des conditions idéales, cette technologie permet d'obtenir des hauteurs de couche bien inférieures à $50\ \mu\text{m}$ [58], permettant ainsi une précision et un état de surface excellent en comparaison d'autres procédés de FA. Malgré les nombreux avantages des résines photopolymérisables, leur utilisation présente un inconvénient important, car toute résine non utilisée est entièrement gaspillée et ne peut être réutilisée. À ce jour, il n'existe actuellement aucun système de recyclage permettant de résoudre ce problème [59].

Contrairement au SLS, le procédé Powder Bed Jetting (parfois appelé Inkjet) est basé sur un jet d'encre pour projeter un liant liquide sur la couche de poudre, afin de les coller ensemble. Enfin, l'agent de liaison liquide est partiellement durci à l'aide d'une lumière UV. Son principe de fonctionnement est précisé sur la Figure 2.4b. Théoriquement, tous les matériaux polymériques sont compatibles avec ce procédé, qui est pour l'instant peu étudié [43]. De plus, le procédé peut fonctionner à température ambiante, est compatible en multi-matériaux et

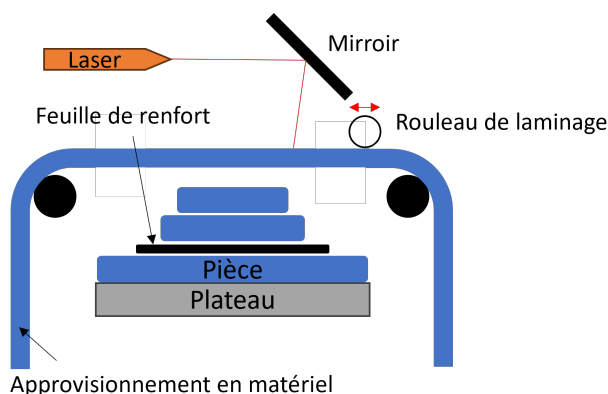
est capable de fabriquer des pièces de grandes dimensions à des coûts réduits [60]. Cependant le procédé est limité en termes de résolution et il est difficile d'obtenir des pièces entièrement denses directement à l'aide de cette technique [61, 43].

Addition de lame de matière

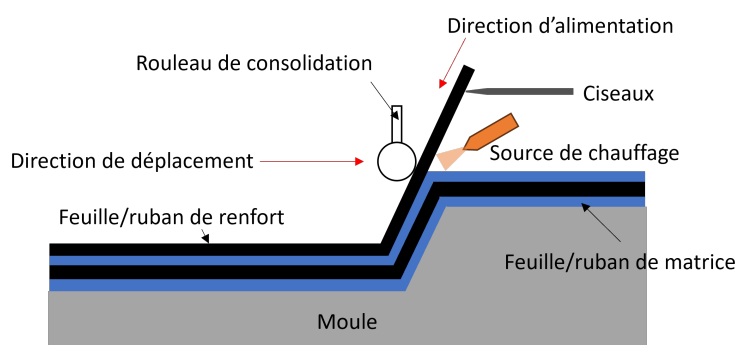
Les procédés par addition de lame de matière sont basés sur la dépose de feuilles de matériau, qui sont ensuite découpées puis collées pour former un objet. Contrairement aux deux précédentes catégories, les procédés par addition de lame de matière profitent de l'économie d'échelle, ce qui les rend économiques plus viables pour de grandes séries, et sont très répétables. Aussi, ces procédés peuvent aisément fabriquer des pièces de plus grandes dimensions [43, 29]. Toutefois, ces procédés produisent une grande quantité de déchets, ont une précision et une qualité de surface limitées [62]. Ces procédés sont parfois appelés semi-additifs, à cause de la phase de découpe qui génère une surconsommation de matière [63, 6].

Le procédé Laminated Object Manufacturing (LOM) est un procédé qui combine des techniques additives et soustractives. Les feuilles sont empilées couche par couche et collées à l'aide d'un solvant. À chaque couche, le contour des motifs définis par le parcours de l'outil est découpé au laser, un rouleau chauffé (parfois des ultrasons et le laser sont utilisés à la place) est ensuite utilisé pour améliorer la liaison entre les feuilles par thermocompression. Les zones non désirées sont découpées de manière à faciliter l'élimination des matériaux supplémentaires, après le processus d'impression, les zones non désirées sont enlevées, laissant apparaître la partie centrale. Son principe de fonctionnement est présenté sur la Figure 2.5a. Le papier, les métaux, les plastiques, les céramiques, les tissus, les matériaux synthétiques et les composites font partie des matériaux compatibles avec ce procédé [62]. Les matériaux composites se présentent sous la forme de feuilles pré-imprégnées commerciales ou n'importe quelle préforme de fibre, ce faisant, tout type de longueur de fibre sont disponibles [43, 6]. La fabrication d'objets stratifiés présente plusieurs avantages, tels qu'un taux de fabrication volumétrique élevé et une finition de surface élevée [29, 64]. Cependant, cette technologie présente certains inconvénients tels que l'utilisation nécessaire de fines feuilles de matériau, nécessite différents processus de collage pour différents types de matériaux, une résolution assez faible des pièces complexes et le rejet des zones non désirées [6, 43].

Deux procédés principaux ont été développés pour automatiser le processus de pose des fibres, à savoir, Automated Fiber Placement (AFP) et Automated Tape Placement (ATP). Leurs principes de fonctionnement sont similaires, ils sont présentés sur la Figure 2.5b. Dans les procédés ATP, un ruban (jusqu'à 300 mm de largeur) est placé et progressivement collé au substrat constitué de rubans précédemment posés. Le procédé AFP utilise un ruban pré-



(a) Principe de fonctionnement du procédé *Laminated Object Manufacturing*, inspiré de [29, 43].



(b) Principe de fonctionnement du procédé *Automated Fiber Placement* et *Automated Tape Placement*. Le moule peut prendre différentes géométries, inspiré de [43].

FIGURE 2.5 Représentation schématique des procédés par addition de lame de matière.

imprégné plus étroit de quelques millimètres de largeur et peut traiter des pièces de forme plus complexe que l'ATP, mais à des taux de pose de matériau beaucoup plus lentes en raison des largeurs de ruban utilisées [43]. Les procédés permettent le contrôle de chaque couche déposée, la capacité d'arrêter, de couper et de redémarrer pendant la mise en place, la largeur des rubans peut également être contrôlée s'adaptant ainsi à la forme géométrique souhaitée [65]. Tout comme le procédé LOM, les rubans étant préparés en amont, théoriquement tous les matériaux sont disponibles pour les procédés ATP et AFP. Enfin, l'une des principales limites est le coût élevé d'acquisition de l'équipement nécessaire [65].

Synthèse

Afin de bien comprendre les avantages, inconvénients et les principaux matériaux compatibles, la Figure 2.6 résume de façon synthétique l'ensemble des caractéristiques technico-économiques des procédés. Par rapport à l'ensemble des procédés de fabrication additives de matériaux composites, le procédé FFF est le plus répandu [27]. En effet, bien que peu précis et avec un état de surface limité, des coûts d'installations peu élevés, une relative faible consommation d'énergie et de matériaux, des quantités réduites de déchets et sa facilité d'utilisation rendent ce procédé polyvalent et lui permettent de s'adapter à de nombreuses situations et à de nombreux besoins. De plus, dans le cas de la fabrication de matériau composite à fibres courtes, le FFF ne nécessite aucune modification importante de machine, bien qu'une buse avec une plus grande dureté est généralement nécessaire [66].

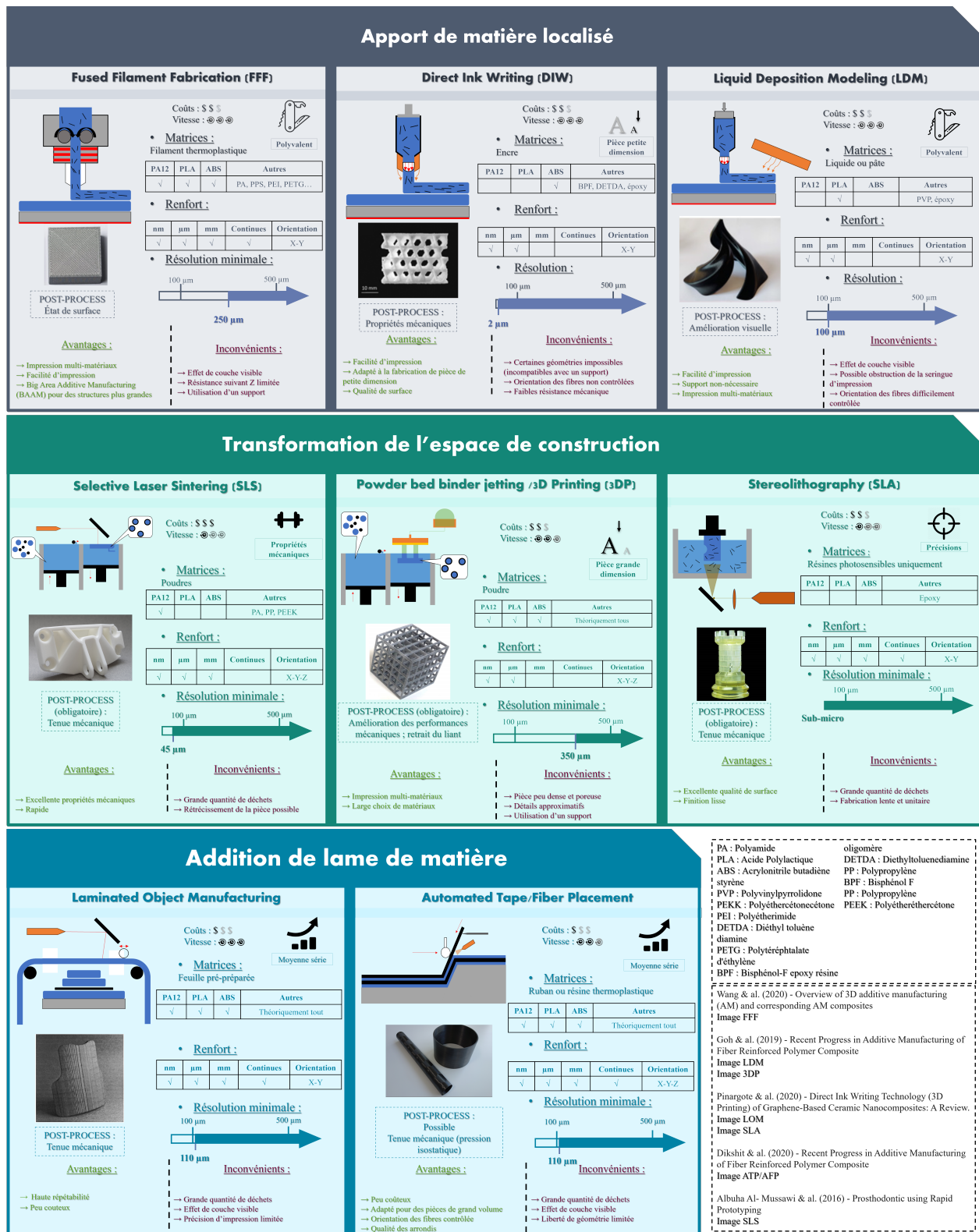


FIGURE 2.6 Poster résumé des performances, matériaux compatibles et des avantages / inconvénients des procédés de fabrication par apport de matière localisé, par transformation de l'espace de construction et par addition de lame de matière.

2.1.4 CFRP à matrice polyamide

Les composites polymères renforcés de fibres de carbone (CFRP) présentent des avantages significatifs par rapport aux métaux et aux polymères purs. Deux types de matrices existent : thermodurcissables ou thermoplastiques. Les premières ont l'avantage d'avoir une très forte adhésion avec les fibres de carbone, améliorant ainsi les propriétés mécaniques [14]. Les secondes ne forment pas facilement de fortes liaisons avec la surface de la fibre de carbone, ont une viscosité à l'état fondu relativement élevée et sont comparativement coûteux [14], elles offrent cependant quelques avantages notables dans la fabrication des CFRP. L'un d'entre eux est leur capacité à être transformées à l'état fondu. Cela se traduit par une fabrication rapide des pièces composites, ce qui réduit considérablement les coûts de fabrication en éliminant la nécessité de cycles de durcissement prolongés ou de chimie de durcissement sophistiquées. Les thermoplastiques peuvent donc être fabriqués à l'aide de techniques de FA des polymères largement développées et facilement accessibles [55]. La Figure 2.7 présente plusieurs polymères thermoplastiques, et indique leurs compatibilités ou non avec les procédés par extrusion de matière, ainsi que leurs classifications en fonction de leurs propriétés mécaniques.

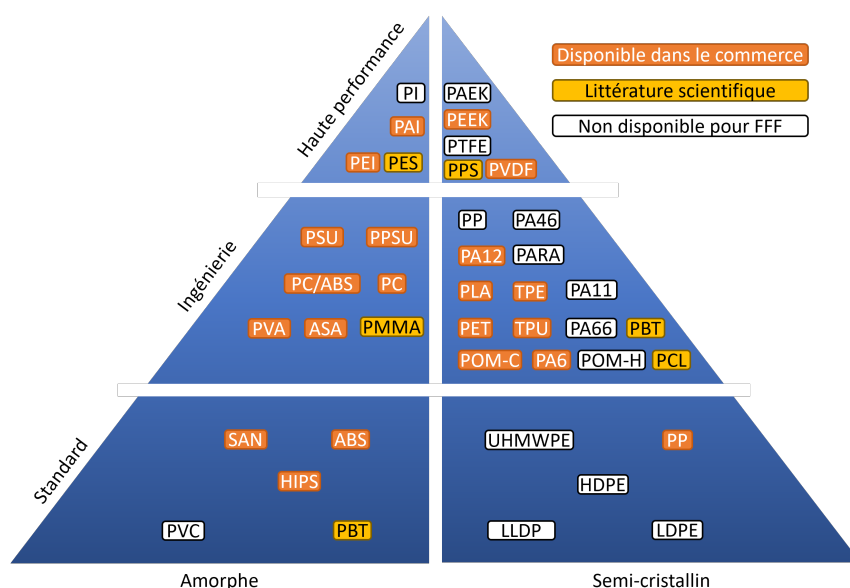


FIGURE 2.7 Pyramide des matériaux polymères en fonction de leurs disponibilités sur le marché pour le procédé FFF, leurs structures internes et leurs fonctionnalités par rapport à leurs propriétés mécaniques (standard, ingénierie et haute performance), inspiré de [66].

Les polyamides 6 et 12 sont les deux polymères de la famille des polyamides les plus courants dans la fabrication additive, et plus particulièrement pour le procédé FFF [67, 24]. Le Tableau 2.2 présente une compilation des propriétés mécaniques du PA6, PA12, PA6-Cf et PA12-CF

pour les matériaux brut et par FFF respectivement. Très présents dans l'industrie, il est à noter que les performances de ces matériaux en FFF sont inférieures aux procédés conventionnels. Par exemple, le PA12 (48 MPa) par FFF peut présenter des propriétés seulement 60 % du matériau brut (80 MPa) [24]. Bien que, les polyamides et les polyamides renforcés par fibres de carbones fabriqués par FFF présentent des propriétés mécaniques inférieures à ceux fabriqués par procédés conventionnels (tel que l'injection), ces matériaux sont toujours largement répandus dans l'aéronautique, l'aérospatiale et l'automobile de par leurs faibles densités, une résistance relativement élevée et une stabilité à la chaleur [67, 68]. Tout particulièrement dans le cas du FFF, les propriétés physiques des composites polyamide/fibres de carbone peuvent être modifiées en changeant les paramètres de la teneur en fibres, de la longueur des fibres, de l'orientation des fibres et de l'adhésion entre le polyamide et les fibres. Par exemple, la longueur critique (longueur minimale requise pour que la force de la fibre soit effectivement transmise au composite) d'une fibre de carbone dans une matrice polymère a été calculée comme étant d'environ 640 μm , alors que la grande majorité des fibres utilisées dans les composites mis en forme par FA sont broyées ; leur longueur est donc inférieure à 150 μm [69]. De plus, il est communément observé que l'ajout de fibres peut modifier la rhéologie du polymère et donc augmenter la fraction de vide dans le composite [70]. Il convient de noter que la longueur critique des fibres n'a pas d'incidence sur les valeurs du module, mais que l'allongement des fibres en a une. Comme indiqué sur la Figure 2.8, la résistance maximale est sensiblement identique pour des longueurs critiques de 0,3 et 3,0 mm dans le cas d'un allongement élevé d'environ 2000.

TABLEAU 2.2 Compilation de données disponibles pour des matériaux PA6, PA6-CF, PA12 et PA12-CF dans le commerce.

Note : NA pour Non Applicable ; %m pour pourcentage massique ; et, " ? " lorsque l'information n'est pas connu

Matériau	Procédé	Renfort [%m]	Propriétés mécaniques					Source
			Résistance à la traction [MPa]	Module de Young [GPa]	Résistance à la flexion [MPa]	Module de flexion [GPa]	Élongation à la rupture [%]	
PA6	Brut	NA	79	3.3	100	2.9	130	[71]
			80	3.3			50	[72]
	FFF		56	2.1	65	2.0	4	[73]
			51	2.1	85	1.6	>50	[74]
PA6-CF	FFF	<20	63	3.8	84	3.7	3	[75]
		?	74	5.5			2.9	[76]
PA12	Brut	NA	53	1.8	68	1.7	200	[77]
			83	1.6		1.7		[78]
	FFF		45	1.4		1.1	>200	[79]
PA12-CF	FFF	?	71	3.3	109	3.6	3.5	[80]
		<20	72	8	90	7.9	2	[81]

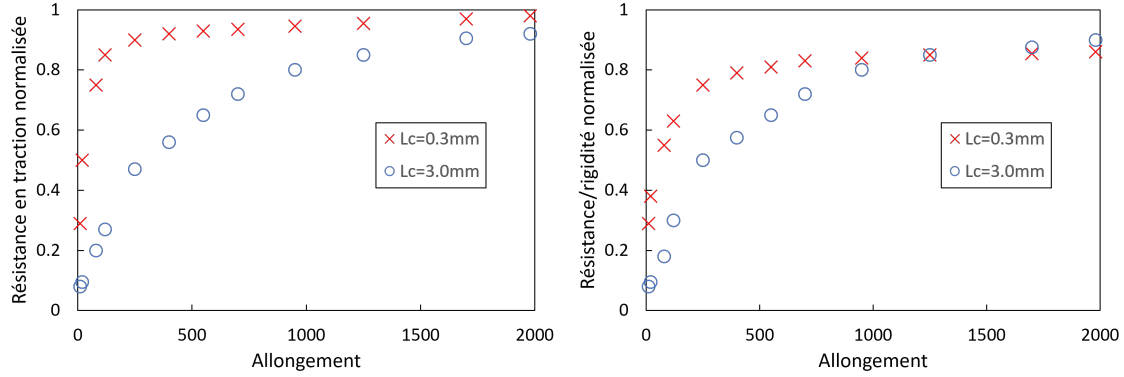


FIGURE 2.8 Influence de l'allongement des fibres (les fibres de carbone ont généralement un diamètre de $7\mu\text{m}$) sur la résistance à la traction du composite par FA pour deux longueurs critiques (à gauche) et sur la résistance à la traction ($l_c = 3\text{ mm}$) et le module d'Young (à droite). Les fibres sont supposées principalement alignées, comme indiqué dans la source d'origine [82].

2.2 Analyse techno-eco efficiente

2.2.1 Influence des paramètres de fabrication

Du point de vue de la fabrication, les paramètres d'impression FFF sont la pierre angulaire entre les propriétés des pièces, le coût de fabrication et la consommation d'énergie. C'est pourquoi diverses études se sont intéressées à l'impact de ces paramètres d'impression. De nombreux paramètres de fabrication existent et peuvent être modifiés, cependant, huit d'entre eux ont reçu une attention particulière de la communauté scientifique, que l'on peut regrouper en trois catégories, en fonction de si le paramètre influence : le filament (épaisseur de couche, vitesse de déposition) ; la chauffe (température de buse, température du plateau) ; ou, la déposition du filament (taux de remplissage, motif de remplissage, orientation de déposition, angle de trame). Les différents paramètres de fabrication sont présentés sur la Figure 2.9.

La vitesse de déposition est la vitesse de la buse dans le plan XY pour remplir la couche. L'épaisseur de la couche est la hauteur verticale de chaque couche, cette hauteur peut être contrôlée sur le logiciel d'impression, mais est limitée par le diamètre du filament initial et le diamètre d'ouverture de la buse. Ces deux paramètres influencent la structure interne de la pièce imprimée, c'est-à-dire la porosité interne et la qualité d'adhésion intercouches, et vont donc affecter la résistance de la pièce, le temps de fabrication et l'aspect de la pièce [83, 84].

La température de la buse est la température à laquelle le filament est chauffé, modifiant son comportement rhéologique, est permettant ainsi l'extrusion de la matière. Elle est géné-

ralement réglée au-dessus de la température de transition vitreuse (T_g) pour permettre au matériau de fondre et de fusionner avec les couches déposées, mais en dessous de la température de dégradation ($T_5\%$) afin d'éviter que les matériaux ne se détériorent [83, 85]. Certaines machines FFF permettent de contrôler la température du plateau sur lequel les couches sont déposées, améliorant grandement les performances de la pièce imprimée [83]. La température du plateau est généralement inférieure à la température de T_g [83, 86]. Cette température permet le maintien en température des couches déjà déposées, améliorant ainsi la liaison intercouche, et peut parfois, réduire le vide présent entre les couches [87]. Il est à noter que par la distance entre le plateau et les couches, l'influence de la température du plateau s'applique principalement sur les premières couches déposées, améliorant l'adhésion sur le plateau et limitant le gauchissement de la pièce durant la fabrication [88, 83].

Le taux de remplissage fait référence à la quantité de matériau utilisé pour remplir l'espace à l'intérieur des contours de la pièce selon différents motifs de remplissage. Ces motifs peuvent être très variés et présentent chacun leurs avantages et inconvénients. Les motifs triangulaire et rectangulaire sont parmi les plus répandus lorsque le taux de remplissage est élevé voir de 100 % [89]. Le motif en nid-d'abeilles a également attiré l'attention car il présente une solidité de la structure et une résistance mécanique relativement élevées dans le cas de taux de remplissage plus faible [90, 89]. Il est communément admis que les pièces les plus denses (taux de remplissage de 100 %) auront toujours des propriétés de résistance mécaniques plus élevées [27, 91, 92]. Toutefois, un taux de remplissage élevé influencera négativement la quantité de matière consommée et la durée de fabrication [25, 83]. L'orientation de déposition est la manière dont la pièce est orientée par rapport aux trois axes principaux X, Y et Z du plateau. Généralement, les pièces sont fabriquées dans une des directions du plateau (X : à plat ; Y : sur le flanc ; Z : montant) [93, 83]. La Figure 2.9b présente les orientations de déposition en fonction des axes du plateau de fabrication. Lors d'une fabrication à plat ou sur le flanc, la structure de la pièce fabriquée dépendra principalement des propriétés du matériau, tandis qu'une fabrication montante dépendra de la force de liaison entre les couches. Ainsi, les pièces fabriquées suivant l'axe Z seront toujours moins résistantes et plus lentes à la fabrication que les pièces fabriquées suivant l'axe X ou Y [83, 94]. Enfin, l'angle de trame indique la direction de déposition du filament le long de la zone de construction dans l'axe X de la machine FFF utilisée. Par convention, un angle de trame est caractérisé par rapport à l'angle de la charge de traction, compris entre 0° (parallèle) et 90° (perpendiculaire). Tandis qu'un angle de 0° permettra d'obtenir la résistance en traction maximale, un angle de 45° permettra un compromis entre les deux directions [95, 85]. Bien que certaines études analysent les paramètres sans distinction, les études sur les paramètres influençant la déposition du filament peuvent être effectuées séparément des autres paramètres. En effet, les différences

en termes de performance mécanique entre différents taux de remplissage, différents angles de déposition ou de trame sont drastiques [27, 96, 97, 94].

Les états de l'art publiés par Gao & al. [98] ainsi que Rajan & al. [86], concluent tout deux que le mécanisme de formation de la liaison intercouche n'est pas encore bien établi. Cela entrave la fabrication de pièces en polymères de haute performance, mais surtout cela conduit à une évaluation empirique des paramètres de fabrication. Ces évaluations sont d'autant plus mal maîtrisées par la faible reproductibilité du procédé FFF [99].

2.2.2 Sur les performances mécaniques

De nombreuses études font état de l'impact des paramètres de fabrication sur les performances mécaniques. Sanei & al. [100] ont effectué en 2020 une analyse des différentes études réalisées sur les matériaux CFRP et ont montré que les analyses sont principalement réalisées sur des essais en traction, à l'aide d'éprouvettes de traction standardisées. Afin d'évaluer l'impact de chaque paramètre, des plans d'expériences factoriels sont couramment employés, complets ou fractionnaires. Belei & al. [101] ont effectués un plan d'expériences complet à deux niveaux afin d'évaluer l'impact de l'épaisseur de couche, de la vitesse de déposition, de la température de buse et du plateau. Deux modèles de prédiction de la résistance mécanique des éprouvettes de traction sont proposés : l'une basée sur un plan d'expériences factoriel complet à 2k et l'autre basée sur une régression polynomiale multiple adoptant les principes de l'apprentissage machine. L'épaisseur de couche et la température du plateau sont considérées comme les paramètres les plus impactant. La conclusion est que lorsqu'il était soumis à de nouvelles observations, le modèle basé sur l'apprentissage machine prédisait la réponse avec une plus grande précision. Toutefois, le modèle plan d'expérience s'est légèrement mieux comporté pour prédire les observations pour lesquelles des valeurs de réponse plus élevées étaient attendues, comme la solution optimale. L'équipe de Elkaseer [102] a évalué l'impact des paramètres à l'aide d'un plan d'expériences orthogonal de Taguchi (L50), ils ont présenté les résultats à l'aide de l'analyse statistique de la variance (ANOVA), et identifié les paramètres permettant d'obtenir des réponses optimales. Des modèles de régression ont été développés pour prédire les différentes réponses du processus en fonction des cinq paramètres du processus examinés expérimentalement dans cette étude (taux de remplissage, vitesse de déposition, épaisseur de couche, température de la buse et orientation de déposition). De plus, une évaluation de l'interaction entre les paramètres est effectuée. L'épaisseur de couche et la vitesse de déposition se montrent comme dominant par rapport aux autres paramètres, et qu'entre eux, un compromis est à trouver.

Parmi les différents paramètres de fabrication, la hauteur de couche se révèle la plus impac-

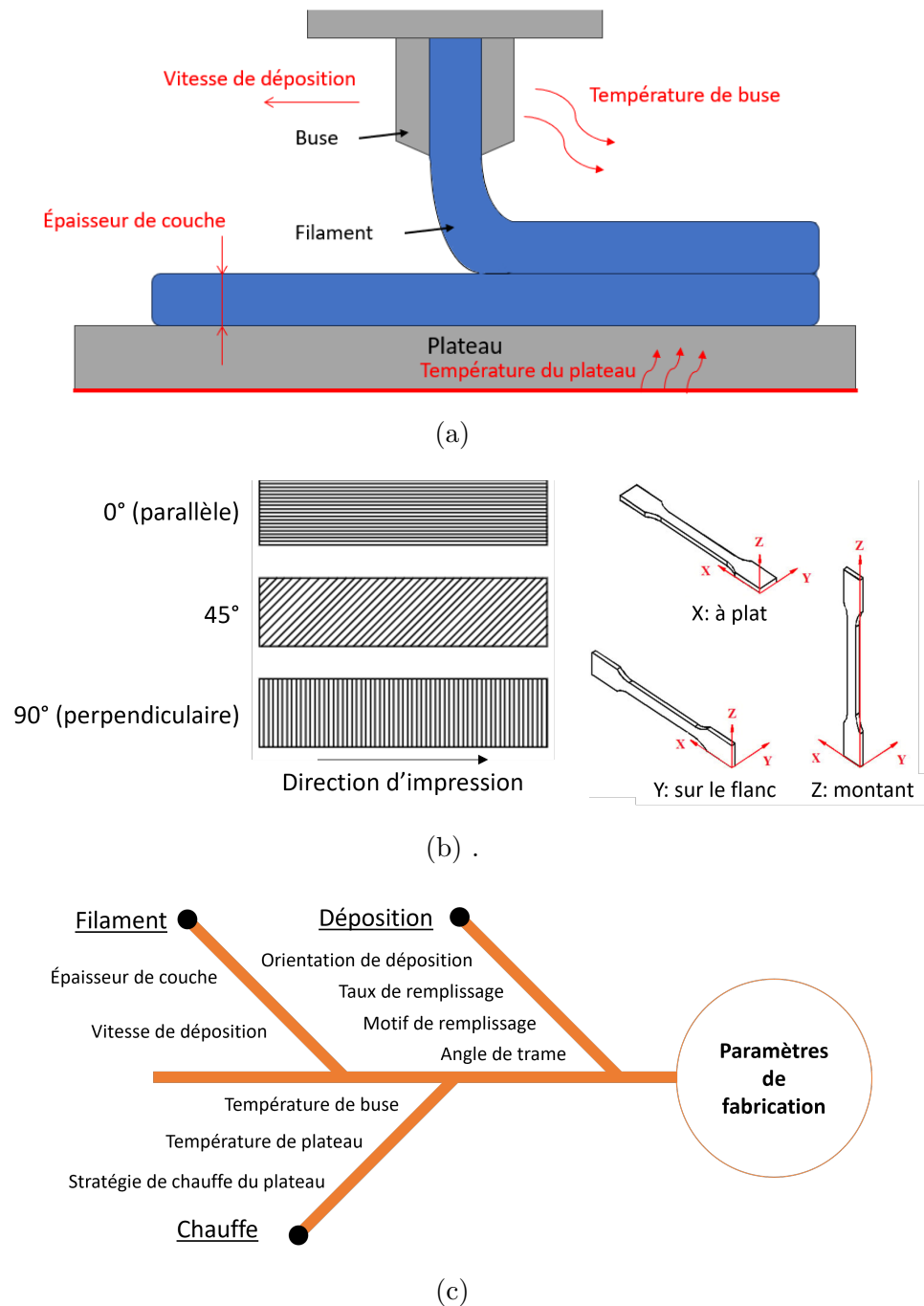


FIGURE 2.9 Présentation des paramètres de fabrication. (a) Schématisation des paramètres de fabrication de vitesse de déposition, épaisseur de couche, température de buse et de plateau; (b) Schématisation des paramètres d'angle de trame (à gauche) et d'orientation de déposition (à droite); (c) Diagramme en arêtes de poisson des paramètres de fabrication du procédé FFF.

tante sur les performances en traction, ce qui est confirmé par de nombreuses études [101, 103, 104, 102, 105] et la rugosité [106, 107, 102]. Ding & al. [108] rapporte par ailleurs que l'effet sur la résistance en traction est encore plus significatif lorsque l'orientation est suivant l'axe Y par rapport aux axes X et Z. En effet la résistance en traction dépend principalement de l'adhésion entre les couches. Or, lors de la fabrication suivant l'axe Y (avec une orientation de trame perpendiculaire), la différence de température entre les couches inférieures et supérieures est bien plus élevée que lors de la fabrication en X, réduisant les propriétés mécaniques en traction des éprouvettes fabriquées suivant l'axe Y. Lors d'une fabrication suivant l'axe Z, le mécanisme est similaire à l'axe Y réduisant les propriétés. Toutefois, suivant l'axe Z la pression exercée par les couches supérieures ainsi que la gravité vont entraîner une plus grande surface de contact entre les couches ce qui améliorera l'adhésion. Ces mécanismes expliquent les résultats de l'équipe de Ding & al. La vitesse de déposition influence négativement les performances en traction, limitant l'adhésion entre les couches [109]. Toutefois, Wang & al. [104] mettent en garde contre une vitesse de déposition trop faible qui peut modifier la stabilité durant la fabrication. Parmi la gamme de température de buse compatible (entre T_g et $T_5\%$), une température la plus élevée possible est préférable, car elle permet d'améliorer la fluidité de la fusion et la fabricabilité des matériaux imprimés [104, 101]. De même, une élévation de la température du plateau améliore les propriétés mécaniques des pièces fabriquées [104, 110]. De plus, dans le cas du PA-CF, la fabricabilité de la pièce dépendra, en partie, de la température du plateau (≥ 80 °C pour du PA6-CF [111, 26] et ≥ 100 °C [83, 26]). L'influence des paramètres de fabrication sur les performances mécaniques des pièces sera étudiée en détail lors d'expérimentations détaillées dans l'article du Chapitre 5.

2.2.3 Sur les performances économiques

Bien que certains modèles économiques sont spécifiques à un procédé de fabrication (e.g., FA métallique [112], SLS [113]), la plupart des équations économiques modélisant des procédés FA sont applicables sans distinction particulière entre les différents procédés. En d'autres termes, la plupart des modèles économiques utilisés pour évaluer la faisabilité et la rentabilité tiennent compte des nuances et des spécificités de chaque procédé directement dans la valeur des variables des équations, et non dans l'équation au global [114, 115]. Ceci facilite ainsi la comparaison économique entre différents procédés de fabrication additive [113]. De très nombreux modèles et équations de coûts existent toutefois dans la littérature, chacune ayant leurs champs d'application propre. Par exemple, certaines équations ou études évoquent spécifiquement la question de la taille de série. Sur cet aspect, le consensus général est que la FA est plus économique sur des pièces uniques ou sur de petites séries, mais que passé une taille de série, les procédés conventionnels sont plus adaptés [114, 40, 116]. En effet,

contrairement aux méthodes de fabrication conventionnelles, où le coût unitaire diminue à mesure que la taille de la série augmente, le coût de production unitaire de la fabrication additive reste constant, quelle que soit la taille de la série [115, 117].

Ainsi, la plupart des équations se concentrent sur le coût unitaire de fabrication [40, 118, 9, 119]. Parmi ces équations, six groupes de coût peuvent être identifiés : (1) matière (support inclus); (2) l'électricité; (3) la main d'œuvres; (4) le ou les pré-/post-process; (5) les coûts indirects (e.g., maintenance, d'achat); (6) les consommables. À notre connaissance, il n'existe actuellement aucune étude complète sur l'analyse paramétrique des coûts unitaires de fabrication. L'absence de telles recherches peut être attribuée à la variabilité et à l'incertitude des données d'entrée (dimensions de la pièce, nombre de pièces, matériau, machine, coût de la main d'œuvres, coût de l'électricité, etc.), qui peuvent conduire à des conclusions sensiblement différentes et spécifiques à chaque cas particulier [120]. En ce qui concerne les paramètres de fabrication, les coûts des matériaux, de l'électricité et des consommables sont les seules variables, car ces paramètres de fabrication influencent la consommation d'énergie et le temps de fabrication [121, 122]. Intuitivement, une température élevée de buse et du plateau augmente la consommation d'énergie, tandis qu'une vitesse de dépôt et une épaisseur de couche faibles augmentent la durée de production (et donc l'usure des consommables). Afin d'évaluer le coût d'une fabrication, en agglomérant les modélisations disponibles dans la littérature, le coût total peut être défini comme suit :

$$C_{\text{tot}} = C_{\text{matériau}} + C_{\text{électricité}} + C_{\text{main d'œuvres}} + C_{\text{pre/post process}} + C_{\text{indirect}} + C_{\text{consommables}} \quad (2.1)$$

Qui une fois développée, nous permet d'obtenir l'équation 2.2, avec les termes définis dans la Table 2.3. Ce modèle sera défini et utilisé plus précisément dans l'article du Chapitre 4 :

$$C_{\text{tot}} = C_{\text{mat}} \times M_{\text{mat}} + C_{\text{sup}} \times M_{\text{sup}} + C_{\text{elec}} \times (P_p \times t_p + P_f \times t_f) + C_{\text{op,machine}} \times (t_f + t_{\text{post}}) + C_{\text{op,logiciel}} \times t_{\text{logiciel}} + \frac{C_{\text{logiciel}}}{t_{\text{logiciel}}} + \frac{\frac{C_m}{\alpha} + M}{t_h \times \beta} \times \frac{1}{t_f + t_p} + \sum_1^N C_{\text{cons}} \frac{t_{\text{cons}}}{T_{\text{cons}}} \quad (2.2)$$

2.2.4 Sur les performances énergétiques

L'évaluation environnementale ou de durabilité de la FA s'effectue, jusqu'à présent, principalement à travers le prisme de la consommation énergétique durant la phase de fabrication [5, 123]. À matériau et géométrie constants, les paramètres de fabrication jouant un rôle central dans cette consommation, de nombreuses études se sont penchées sur l'impact des différents paramètres sur la consommation énergétique, soit sur la durée de fabrication (e.g.,

TABLEAU 2.3 Nomenclature des différentes variables avec les définitions et les unités associées.

Variables	Définitions [Unité]	Variables	Définitions [Unité]
C_{tot}	Coût total [€]	C_{mat}	Coût massique du matériau [€/kg]
M_{mat}	Masse du matériau [kg]	M_{sup}	Masse du support [kg]
C_{sup}	Coût massique du support [€/kg]	C_{elec}	Coût de référence de l'électricité [€/Wh]
t_p	Durée de préparation [h]	t_f	Durée de fabrication [h]
P_p	Puissance de préparation [W]	P_f	Puissance de fabrication [W]
$C_{\text{op,machine}}$	Coût de l'opérateur matériel [€/h]	t_{post}	Durée de post-process [h]
$C_{\text{op,logiciel}}$	Coût de l'opérateur logiciel [€/h]	t_{logiciel}	Durée d'utilisation des logiciels [h]
C_m	Coût de la machine [€]	α	Durée de vie de la machine [h]
M	Coût de la machine [€]	β	Taux d'utilisation de la machine [%]
t_h	Heures de travail annuelles [h]	N	Nombre total de consommables
C_{cons}	Coût des consommables [€]	T_{cons}	Durée de vie des consommables [h]
t_{cons}	Taux d'utilisation des consommables [h]		

vitesse de déposition, épaisseur de couche) soit sur la puissance consommée (la vitesse de déposition, l'épaisseur de couche, l'orientation de déposition et le taux de remplissage) [123, 124]. Les paramètres influençant la puissance consommée étant limitée à une plage de valeurs dépendant du matériau utilisé, la variation de cette puissance moyenne, n'auront qu'un impact limité sur l'énergie totale consommée par la machine. En effet, lorsqu'ils sont comparés aux paramètres influençant la puissance moyenne consommée, les équipes de Elkaseer [102], de Lunetto [125], de Vidakis [110] ou encore de Camposeco-Negrete [126] montrent que les paramètres liés à la durée de fabrication ont un impact beaucoup plus significatif. Le motif choisi et l'angle de la trame n'ont qu'un impact marginal sur la durée de fabrication [126, 89]. Enfin, le taux de remplissage est généralement défini et fixe par rapport à la fonction souhaitée de la pièce [124].

Initialement introduit par Kara et Li [127] aux procédés soustractifs, le Specific Energy Consumption (SEC), à été appliqué avec succès aux procédés de FA afin de quantifier et

de comparer les performances énergétiques des procédés [125]. Le SEC est défini comme le ratio entre la quantité d'énergie consommation totale et la masse déposée. Lunetto & al. [125] ont introduit un second indicateur basé sur le SEC : le Specific Printing Energy (SPE). À la différence du SEC, le SPE ne prend en compte que l'énergie consommée durant la déposition de la matière. L'intérêt de ces deux indicateurs est double. Tout d'abord, cela permet de distinguer la phase de plus-value (de déposition de la matière) et les phases de fonctionnement de la machine (e.g., mise en route, mise en chauffe, mise en veille, calibration). Le SPE correspond donc à l'énergie de fabrication d'une pièce unique, tandis que le SEC sera plus pertinent pour évaluer une série de pièces fabriquée à la suite [125, 110]. Ensuite, en ramenant la consommation énergétique à la masse déposée, le SEC et le SPE incluent directement l'un des avantages de la FA qu'est le contrôle sur la matière consommée et la faible quantité de déchets, en comparaison des procédés soustractifs [125, 128]. Le Tableau 2.4 présente une compilation non exhaustive des données de SEC disponibles dans la littérature, pour différentes machines de fabrication FFF. Les grandes variations observées peuvent être attribuées aux grandes variations d'architecture de machine (année de fabrication ; qualité industrielle ou grand public ; enceinte fermée ou ouverte), de matériaux, de paramètres de fabrication et de complexité géométrique [125, 129, 130]. Il est à noter qu'une seule étude se penche sur l'évaluation de la consommation énergétique de matériaux composites par FFF. Le chapitre 4 de ce manuscrit se penchera sur une analyse paramétrique de la consommation énergétique, en séparant le SEC et le SPE.

2.2.5 Couplages

Afin de tirer pleinement avantage des opportunités de la fabrication additive de matériaux composites renforcés par fibres de carbone, la mise en place d'analyses couplant les aspects techniques, économiques et énergétiques est cruciale. Ce couplage permet à la fois d'avoir une vision globale du procédé de fabrication, mais aussi d'identifier des jeux de paramètres optimaux en fonction d'objectifs prédéfinis. Quelques études, non spécifiques aux matériaux composites, ont effectué des approches multi-objectifs pour évaluer l'impact des paramètres de fabrication pour le procédé FFF. D'une part, l'équipe de Vidakis & al. évaluent le lien entre le taux de remplissage, l'angle de trame, la température de buse, la vitesse de déposition, l'épaisseur de couche et la température du plateau avec la consommation d'énergie et les propriétés de traction. Pour cela, ils se sont basés sur un des diagrammes des effets principaux, l'ANOVA et la méthodologie de surface de réponse. Les modèles de régression quadratique extraits ont été validés par six expériences complémentaires [110]. Cette méthodologie fut reproduite sur du PA6, en y ajoutant l'angle de déposition, en évaluant l'impact sur la résistance en compression, la ténacité et le module d'élasticité [141]. Les auteurs tiennent toutefois

TABLEAU 2.4 Tableau de compilation des valeurs de SEC et de puissance moyenne présentent dans la littérature, pour différentes machines d'impression FFF. *Note : les valeurs indiquées par un " * " ont été adaptées, afin d'établir le ratio entre l'énergie consommée et la masse déposée.*

Ref	Machine	Matière	Puissance moyenne (W)	SEC (kWh/kg)
[131]	Stratasys FDM 1650	ABS	1 320	346
[131]	Stratasys FDM 2000	ABS	2 200	115
[131]	Stratasys FDM 8000	ABS	2 200	23
[131]	Stratasys FDM Quantum	ABS	11 000	164
[132]	Stratasys FDM 3000	ABS	570	62-123*
[130]	Stratasys FDM 400mc	PC	2 450	145-149
[133]	Stratasys Dimension SST 1200es	ABS	580	50-61
[134]	Stratasys Dimension 768 SST	ABS P400	1100	192
[135]	Stratasys Dimension SST	<i>Inconnue</i>	1100	<i>Inconnue</i>
[136]	Makerbot Replicator 2x	ABS	125	8-13
[129]	Makerbot Replicator 2x	ABS	130*	7*
[129]	3D Systems RapMan 3.2	ABS	52*	5*
[129]	Stratasys Mojo	ABS	358*	26*
[129]	HP Designjet 3D	ABS	1902*	82*
[129]	Stratasys Dimension Elite	ABS	1708*	112*
[125]	Stratasys F370 FDM	ABS	480-588	14-79
		PC-ABS	506-617	14-79
[137]	Kossel Delta 3D	PLA	70	11-16*
[138]	Ultimaker 3	PLA	121-250*	13,9-75,7
[110]	Intamsys Funmat HT	ABS	272-511*	15-190*
[139]	Stratasys F270	ASA	650*	3-273*
[128]	Prusa i3 MK3S	PLA	<i>Inconnue</i>	12-30
[140]	Roboze One+400	PA-CF	<i>Inconnue</i>	140-220*

à préciser que lors de leurs essais de confirmation, le modèle ne réussissait pas toujours à prédire correctement les valeurs. Par exemple, une consommation énergétique négative est prédite par le modèle, ce qui n'est physiquement pas possible. Cela montre que le modèle est soumis à des restrictions et qu'il est censé produire des résultats fiables et précis uniquement dans la plage spécifique de valeurs des paramètres de contrôle. Camposeco-Negrete [139] a également utilisé cette méthodologie afin d'étudier la précision de la géométrie des pièces et la consommation d'énergie. Yosofi & al. [129] ont proposé une approche holistique afin évaluer et de comparer différentes machines de FA (FFF et binder jetting) en ce qui concerne la rugosité de la surface, le coût de fabrication, la consommation de matériaux, d'électricité et de fluides. L'influence des paramètres de fabrication n'est cependant pas prise en compte. Alizadeh & al. [142] proposent une approche systématique guidée par les données pour modéliser et optimiser la consommation d'énergie et la précision géométrique conjointement sur des pièces références aux géométries simples (cercle-diamant-carré). Un cadre intégré NSGA-II (Nondominated Sorting Genetic Algorithm II) et TOPSIS (Technique for

Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) est présenté pour trouver des solutions optimisées. Cette approche permet de trouver des optimisations pour répondre à la fois à la consommation d'énergie et à la précision géométrique des pièces, toutefois, l'étude est purement basée sur des données, sans expérimentation ou prises en compte des caractéristiques physiques du procédé FFF. Bianchi & al. [140] réalisent une analyse du cycle de vie, des essais de traction et des essais de flexion sur du polyamide en fibres de carbone et de verre. L'étude se concentre sur l'évaluation de l'impact de plusieurs paramètres de fabrication par rapport à ces indicateurs individuellement, et non dans une considération multi-objectifs. Leurs évaluations notent une grande influence de l'épaisseur de couche sur la consommation énergétique, tandis que la température d'extrusion semble n'avoir une influence que sur l'adhésion entre le plateau et les premières couches. Aussi, bien que les matériaux renforcés par fibres de carbone présentent des propriétés en traction et en flexion bien supérieures et que la consommation durant la fabrication est équivalente, l'impact de la production de fibre de carbone est d'environ un ordre de grandeur supérieur à celui des fibres de verre.

Le Tableau 2.5 synthétise l'influence des différents paramètres de fabrication sur les trois grands impacts : énergétique, économique et technique (résistance ultime en traction et rugosité de surface). Les impacts concernant l'angle de trame et l'orientation dépendent toutefois de la géométrie et des performances souhaitées, une influence générale ne peut donc pas être définis.

TABLEAU 2.5 Influence des paramètres de fabrication sur les performances énergétique, économique et technique (UTS et Ra).

Si	Impact énergétique	Impact économique	Impact technique	
			UTS	Ra
Épaisseur de couche augmente	++	+	--	--
Vitesse de déposition augmente	-	+	-	-
Température buse augmente	-	-	+	+
Température plateau augmente	--	-	++	++
Taux de remplissage augmente	--	--	++	+
Orientation "à plat"	+	+	+	+
"sur le flanc"	+	-	+	-
"montant"	--	-	-	-
Angle de trame	0	0	0	0

TABLEAU 2.5 Notes : les motifs pouvant être variés, ce paramètre n'a pas été pris en compte dans ce tableau.

CHAPITRE 3 OBJECTIFS DE RECHERCHE ET COHÉRENCE DES ARTICLES

3.1 Identification de la problématique

Le processus de fabrication additive par FFF pour les matériaux composites renforcés par fibres de carbone a montré un grand potentiel dans la production de pièces légères, en particulier pour des industries telles que le transport. Dans l'objectif de favoriser cette approche, il est au préalable nécessaire de vérifier la viabilité technique, économique et énergétique des pièces fabriquées. Cependant, cette approche est encore limitée et certains verrous doivent être levés :

- La reproductibilité limitée des procédés FA, en particulier ceux faisant appel à l'extrusion de matière, restreint la prise en main de ces procédés. Cette variabilité, notamment de l'impact des paramètres de fabrication, fluctue en fonction du procédé, de la machine et du matériau choisis. La difficulté de parvenir à une utilisation efficace des procédés de FA limite son application dans des secteurs industriels où la précision et la répétabilité sont essentielles, comme l'aéronautique ou l'automobile.
- Bien que des analyses économiques, techniques et énergétiques du FFF polymère aient déjà été menées, des analyses sur les matériaux composites ainsi que la combinaison de ces trois impacts permettrait d'obtenir une approche plus complète, une meilleure compréhension du procédé et d'identifier des solutions optimales ; pour y parvenir, la mise au point d'une méthodologie spécifiquement adaptée à la fabrication additive de matériaux composites est absente.
- Malgré le nombre croissant d'évaluations d'impact des jeux de paramètres, la sélection du jeu de paramètre le plus approprié pour une application spécifique reste encore trop subjective. La question de la mise à disposition d'outils adaptés pour aider à la prise de décision des parties prenantes n'a pas encore été résolue.

3.2 Objectifs de recherche

L'objectif principal de cette recherche est le développement d'une méthode d'aide à la décision multi-critère à partir d'indicateurs environnementaux, économiques et techniques, permettant d'orienter les choix pris par les différents acteurs de la chaîne de fabrication additive de matériaux polymères renforcés par fibres de carbone. Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- I. **Développer une approche de prise en main d'un nouveau couple machine/matériau :**
mettre en place une méthodologie permettant de comprendre les mécanismes, les flux physiques et énergétiques en jeu lors d'une fabrication par FFF de matériaux composites.
- II. **Développer des outils de modélisation sur les aspects économique, technique et énergétique du FFF composite :** mettre en place un ensemble de modélisation caractérisant d'un point de vue économique, énergétique et technique le couple machine/matière ; évaluer l'impact des paramètres de fabrication ;
- III. **Donner un cadre d'analyse multi-critère avant la fabrication de pièces :** développer des outils de prise de décision multi-critère ; mettre en place une méthodologie complète permettant de définir le jeu de paramètre optimal en fonction des objectifs souhaités par l'acteur ; faire le lien entre des essais sur pièces standardisées et la fabrication de pièces réelles.

3.3 Cohérence des articles

Les principaux résultats de cette recherche sont présentés sous la forme d'articles soumis à un comité de lecture dans les chapitres 4, 5 et 6, qui atteignent les objectifs de recherche I, II et III mentionnés à la section 3.2. La Figure 3.1 présente l'organisation des articles en fonction de la problématique scientifique. Partant d'une géométrie de pièce à fabriquer, d'une machine de FA, d'une bobine de matière, d'un cahier des charges et d'un utilisateur, le but est d'obtenir une évaluation économique, énergétique et technique d'une pièce que l'on fabrique. Afin d'obtenir ces évaluations, des modélisations économique, énergétique et technique sont développées ainsi qu'un outil multi-critère permettra de combiner ces modélisations. Cette combinaison des modélisations permet ainsi de produire un classement des différents jeux de paramètres possibles. Enfin, les jeux de paramètres sélectionnés seront utilisés afin de fabriquer la pièce souhaitée, dont nous connaissons les évaluations économique, énergétique et technique.

Le chapitre 4 présente l'article, *"A comprehensive methodology to support decision-making for additive manufacturing of short carbon-fiber reinforced polyamide 12 from energy, cost and mechanical perspectives"*, soumis journal The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, publié le 11 mars 2023 (DOI : 10.1007/s00170-023-11161-2). Dans ces travaux, la prise en main par l'utilisateur de l'ensemble comprenant la machine, la matière, la géométrie et le cahier des charges associés à la pièce est présentée ainsi qu'une première approche afin d'évaluer les impacts économique, énergétique et technique. Pour cela, une modélisation des flux matériels et énergétiques du procédé de FFF est utilisée, un profil de

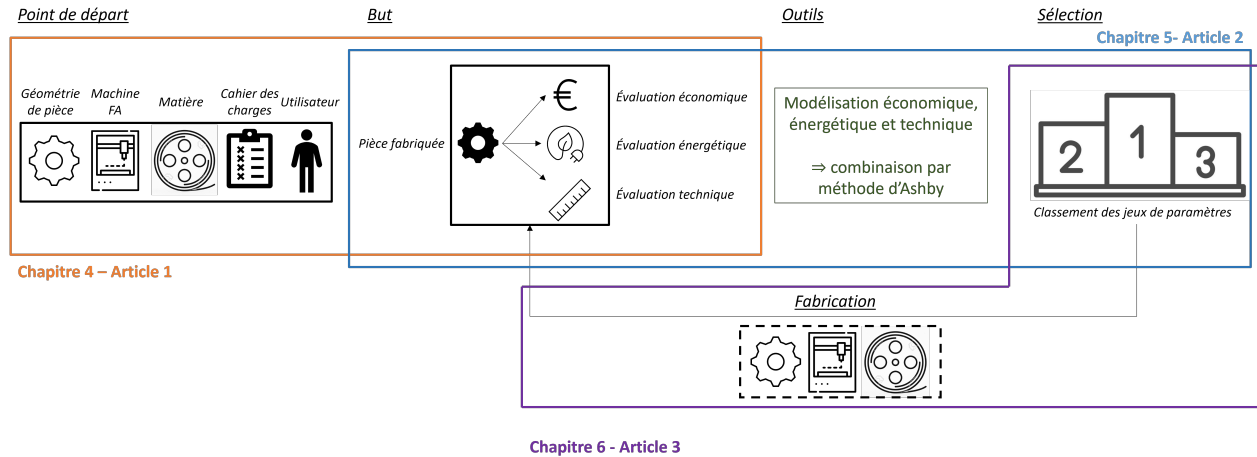


FIGURE 3.1 Articulation des contributions scientifiques de ce manuscrit.

puissance ainsi qu'une équation économique incluant les coûts de matière, d'énergie, de la main d'œuvres, du pre-process, du post-process, des coûts indirects et des consommables permet de caractériser le couple machine/matériau. Une analyse des impacts économique, énergétique et de la résistance en traction sur des éprouvettes de traction sur un nombre limité de paramètres de fabrication est réalisée. Ces résultats ont permis de mettre en place des outils d'analyse graphique de chacun des impacts ainsi qu'une première approche multi-critère.

Le chapitre 5 présente l'article, *"Identifying efficient solutions for additive manufacturing of short carbon-fiber reinforced polyamide 6 from energy and mechanical perspectives"*, accepté et présenté à la 30ème conférence CIRP Life Cycle Engineering, publié le 18 avril 2023 (DOI : 10.1016/j.procir.2023.02.091). Dans ces travaux, les modélisations pour évaluer les différents impacts économique, énergétique et technique sont développées. Puis combinées afin d'obtenir un outil de classement et de sélection entre plusieurs jeux de paramètres. Pour cela, un plan d'expériences est réalisé suivant la méthode de Taguchi. Ce plan d'expérience permet d'évaluer l'impact énergétique et technique sur les propriétés en traction d'éprouvette en traction sur 5 paramètres de fabrication à 3 niveaux. Trois types d'outils graphiques sont introduits afin d'accompagner les prises de décisions. 2 graphiques mono-critères : le premier permettant d'évaluer l'impact économique, énergétique et technique des paramètres de fabrication, le second permettant de classer les jeux de paramètres pour chacun des impacts. Enfin, un troisième type de graphique, basé sur les graphiques d'Ashby [143] multi-critères permettent la sélection de jeux de paramètres optimisés suivant les critères définis par l'utilisateur.

Le chapitre 6 présente l'article, *"Framework to assess effects of process parameters for FFF composite parts regarding energy consumption, cost and mechanical performance"*, soumis au

20 octobre 2023 auprès du journal Progress In Additive Manufacturing. Dans ces travaux, les résultats obtenus lors du chapitre 5 sont repris afin d'évaluer la transposition des données obtenues sur des pièces tests vers une pièce à géométrie réelle. Pour cela, trois jeux de paramètres retenus sont utilisés afin de fabriquer une roue dentée. Partant des jeux de paramètres issus du chapitre 5, la roue dentée est fabriquée puis évaluée du point de vue technique, économique et énergétique. En fil rouge, la question de l'utilisation de modèles obtenus par l'exploitation des données issues de pièces tests (les éprouvettes de traction du chapitre 5 et une portion de roue dentée) pour caractériser une pièce plus complexe (la roue dentée) est soulevée.

CHAPITRE 4 ARTICLE 1 : A COMPREHENSIVE METHODOLOGY TO SUPPORT DECISION-MAKING FOR ADDITIVE MANUFACTURING OF SHORT CARBON-FIBER REINFORCED POLYAMIDE 12 FROM ENERGY, COST AND MECHANICAL PERSPECTIVES

Thibault Le Gentil^{1,2}, Daniel Therriault², Olivier Kerbrat¹

¹ Civil and Mechanical Engineering Institute, CNRS GeM, Rennes University, Rennes, France

² Laboratory for Multiscale Mechanics (LM2), Mechanical Engineering Department, Polytechnique Montréal, Montreal, QC, Canada

Submitted in The International Journal of Advanced Manufacturing Technology on October 12th, 2022

Abstract

Additive manufacturing (AM) technologies have transformed manufacturing, by providing greater control over material deposition and consumption. Thanks to greater customization and their high strength-to-mass ratio, AM with composite materials has grown significantly over the past few years. Main focus in research area are on improving printing precision and higher production rates. However there is a lack of thorough analysis on the energy consumption of Fused Filament Fabrication (FFF) machines for composite manufacturing. We designed an experimental method, based on flow analysis for measuring the impact of temperature parameters on total cost, energy consumption, and tensile resistance of composite parts made by FFF. As the user should be able to improve FFF efficiency regarding economic, energy and technical aspects and obtain recommendations for setting up and using the machine. This study confirms that combining traditional economic and technical indicators (total cost and tensile resistance) to emerging energy indicators (specific energy consumption) can be successfully applied to additive manufacturing to provide an overview of those impacts. Results are yielding information to support optimization investigations depending on the need and goal. For example, two tested parameter combinations that offer similar tensile properties (4 % reduction in tensile resistance compared to best combination) show a 20 % difference in energy consumption.

4.1 Introduction

Additive manufacturing (AM) has attracted interest from both academia and industry, on account of its numerous applications in a variety of fields [1]. Contrary to a traditional manufacturing process, AM refers to a family of manufacturing techniques in which three-dimensional components are fabricated by adding materials layer-by-layer. The increased demands on more complex products and designs in a more efficient and sustainable way reflects some of the advantages of AM. These advantages includes a higher flexibility in both design and supply chain, and allows parts to be made that are impossible to produce in conventional manufacturing [2]. Additionally, this flexibility helps reducing raw material consumption and material waste during the process [3]. Therefore, in the context of Industry 4.0 and sustainability, AM is seen as one of the many means of bringing about this transition [4]. Among the AM processes, fused filament fabrication (FFF) the most widespread AM technique, has found applications within various sectors including aerospace, automotive, sport, and construction [5]. In particular, the combination of AM and carbon-fiber-reinforced polymer opens up the possibility of producing parts with a high stiffness-to-weight ratio [6], whilst reducing total mass through complex designs [7].

Thanks to recent technological progress, many materials are now applied to AM. Polyamide 12 (PA12) found many applications due to its high ductility and high toughness, with relative low cost [8, 9]. Additionally for the case of aerospace or automobile, PA12 respect flame resistance standards [10]. While, PA12 might be limited to relative low strength resistance, the addition of carbon fiber greatly enhance mechanical properties of the material, mainly stiffness-to-weight ratio [11]. Short carbon-fiber reinforced polyamide 12 (PA12-CF) have been used to form lightweight aerospace non-structural applications and automotive parts [10]. Moreover, the mechanical properties and printability of the PA12-CF filament varies with printing parameters or AM technology [12]. Table 4.1 compiles mechanical properties of PA12 and PA12-CF for virgin material and the two main AM process FFF and Selective Laser Sintering (SLS), with FFF PA12-CF showing higher mechanical resistance with a large variation depending on the carbon weight percentages used.

Regarding sustainability and according to the use, AM has several potential drawbacks [25]. There are two major issues, the first being the high energy demand during the manufacturing phase, and the second, the reduced productivity, compared to conventional processes [26, 27, 28]. Given the rapid growth of AM in industry, and the importance of ensuring sustainable development, there is a real need to investigate the relationship between energy consumption, cost, and the quality of the produced parts. In the present study, we therefore sought to develop a methodology for connecting these three aspects in the case of FFF of PA12-CF.

Table 4.1 Compilation of available data on mechanical properties of virgin PA12, PA12 by SLS and FFF, and PA12-CF by SLS and FFF. *Note : NA for Non Applicable.*

Material	Process	Filler	Mechanical properties					Source
			Tensile strength [MPa]	Young modulus [GPa]	Flexural strength [MPa]	Flexural modulus [GPa]	Tensile Elongation at break [%]	
PA12	Virgin	NA	53	1.8	68	1.7	200	Ensinger Plastics [13]
			43	1.4	44	1.2	350	Evonik [14]
	SLS	NA	-	-	53.9	1.54	-	[15]
			42.5	0.86	68	-	1.4	[16]
	FFF	NA	35	0.9	-	1.5	-	[17]
			61	0.53	42	1.06	439	[18]
PA12-CF	SLS	30% wt	54	0.94	32	0.84	-	[19]
			-	-	74	3	-	[20]
	FFF	33% wt	66	6.3	-	-	5	[21]
		10% wt	94	3.6	125	5.26	8	[22]
		6% wt	33.5	1.85	55.3	0.31	-	[23]
		35% wt	89	5.2	-	-	-	[11]
		<20% wt	63	3.8	84	3.75	3	3DXTech [24]

After reviewing the relevant literature on energy and cost assessment in AM (section II), we describe the methodology we used to model the process and acquire the relevant data (section III). Then we perform a design of experiments based on the fabrication of tensile specimens. Two printing parameters are varied (printhead temperature and heatbed strategy) on three levels each in order to obtain energy consumption, mass and tensile test. Results are then compiled in economic (total cost), energetic (Specific Energy Consumption and Specific Printing Energy) and mechanical (tensile resistance and Young’s modulus) indicators(section IV), followed by a discussion (section V) and conclusion (section VI).

4.2 Relevant literature on energy and cost assessment

4.2.1 Energy assessment and specific energy consumption of FFF

Initially designed for subtractive processes by Kara and Li [29], the specific energy consumption (SEC) indicator has since been applied to AM as a way of comparing and quantifying the energy efficiency of different processes or machines. SEC is defined as the ratio of total energy consumption to the mass deposited, and can be used to quantify energy efficiency in material deposition. Liu & al. [30] examine SEC values for different AM processes and their relation to global warming potential. Coupling an energy consumption to a more global Life Cycle Assessment (LCA). This study also shows the opportunity to increase energy efficiency without compromising the print quality. Dunaway & al. [31] studied experimentally the relation between energy consumption and part geometry characteristics. When Lunetto and al. com-

piled all the available data in the literature [26], they found significant variability in energy efficiency, ranging from 19 MJ/kg to 1247 MJ/kg for polymers. This variability underlines the differences in performance, depending on the printer's architecture (e.g., type, enclosure), the materials, the process parameters, and the geometric complexity. The warming up of the heating elements has been identified as the main demand of power [32]. The warm-up phase greatly varies depending on the printer architecture or the working environment (i.e., room temperature, humidity). Hence a second indicator, specific printing energy (SPE; i.e. SEC during the deposition phase), can be determined to focus on the printing phase. Total energy consumption can be divided into two categories: energy for the preparation of the printing (E_p), and energy directly needed for the fabrication phase (E_f).

4.2.2 Cost assessment

The modeling of cost with environmental consideration helps framing decision-making during manufacturing [33]. Many types of cost models exists regarding printing a single part, sometimes specific to a process or a material [34, 35, 36, 37]. Still, six distinct cost categories can be identified: 1) materials (including supporting material); 2) electricity (e.g., warm-up, build-up, calibration); 3) workforce (software and hardware); 4) pre- and postprocess (including quality control); 5) indirect cost (e.g., investment, maintenance); and 6) consumables. The total cost C_{tot} of manufacturing is estimated as follows:

$$C_{\text{tot}} = C_{\text{materials}} + C_{\text{electricity}} + C_{\text{workforce}} + C_{\text{pre/post process}} + C_{\text{indirect}} + C_{\text{consumables}} \quad (4.1)$$

One of the main advantage of AM compared to conventional manufacturing is *complexity-for-free*. AM does not rely on specific moulds or tools to manufacture part, which implies that the production cost does not rely on the complexity of the design, easing the production of lightweight parts [38].

4.2.3 Coupling aspects

Approach combining economic, energy and technical aspects to support decision-making are necessary to evaluate printing efficiency. Yosofi & al. [39] proposed a holistic approach for evaluating a part produced by an AM process regarding surface roughness, material, electrical and fluid consumption. Gutierrez-Osorio & al. [40] compared SEC, Young's modulus and tensile strength as a function of the layer thickness for different AM process. However based on literature review, a gap in comprehensive investigations on process energy consumption and print quality still exists.

4.2.4 Motivation for the present approach

In the literature, energy and cost assessments have mainly focused on the AM of polymer. In the case of composite materials, especially fiber-reinforced polymers, the demand for high performance and high mechanical properties requires the produced parts to be assessed from a mechanical perspective. Hence, there is a need to analyze the technical, economic and environmental impact of printing parameters for the AM of fiber-reinforced composites. The method we devised is based on a flow analysis of the manufacturing phase. This analysis yields an overview of the different parameters involved in the process, allowing optimization solutions to be explored. First, establishing the total manufacturing cost gives an indication of the parameters that can be modified and optimized from an *economic point-of-view*. Those modifications have impacts that need to be assessed from an *environmental point-of-view*. Finally, to ensure the industrial viability of the process, the impact on mechanical performance needs to be measured from a *mechanical point-of-view*.

4.3 Modelling approach

4.3.1 Flows

A cradle-to-gate representation of the material and energy flows involved in FFF of composite material is provided in Figure 4.1. This schematic shows that the process encompasses a wide range of subprocesses that are all interconnected and influence each other. For a gate-to-gate approach, the storage of the material and files creations are the first steps. Regarding the FFF machine, manufacturing a part can be divided in two subprocesses : first, warming-up of the different heating elements (i.e., preparation subprocess related to E_p), and second, the deposition of the part (i.e., fabrication subprocess related to E_f).

4.3.2 Cost model

Coupling the flow model of Figure 4.1 with the previously identified cost categories enable to obtain a generic formula for the total cost (see variables definitions in Table 4.2):

$$\begin{aligned}
 C_{\text{tot}} = & C_{\text{part}} \times M_{\text{part}} + C_{\text{sup}} \times M_{\text{sup}} + C_{\text{elec}} \times (P_p \times t_p + P_f \times t_f) \\
 & + C_{\text{op,hard}} \times (t_f + t_{\text{post}}) + C_{\text{op,soft}} \times t_{\text{soft}} + \frac{C_{\text{soft}}}{t_{\text{soft}}} + \frac{\frac{C_m}{\alpha} + M}{t_{hr} \times \beta} \times \frac{1}{t_f + t_p} + \sum_1^N C_{\text{cons}} \frac{t_{\text{cons}}}{T_{\text{cons}}}
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

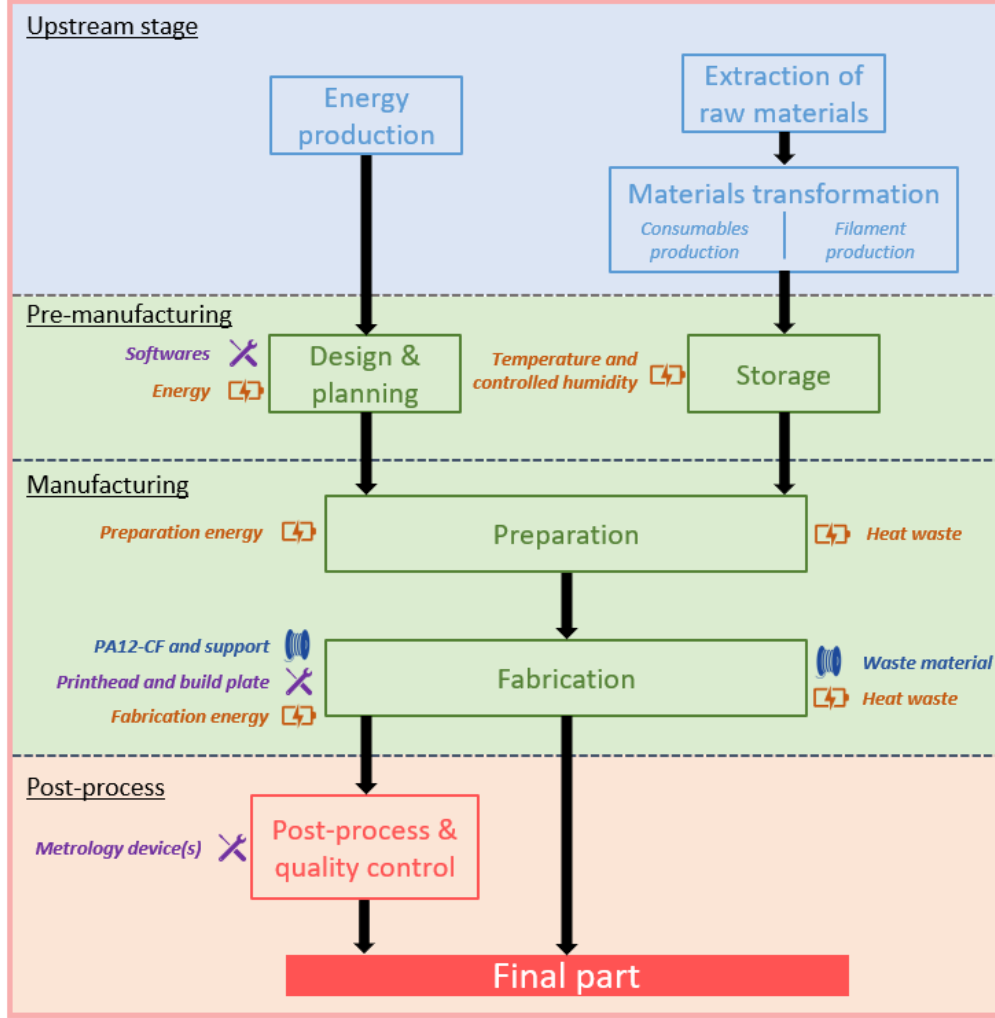


Figure 4.1 Production line of FFF printing with flow representations (energy flows in orange, resources flows in blue, and consumables flows in purple).

The Eq. 4.2 consider the six categories established in Eq. 4.1, and the entirety of the process. However in most cases, the parameters cannot all be modified separately. With regards only on manufacturing scope, certain parameters are out of scope. In this case, the global equation (Eq. 4.2) is replaced by the gate-to-gate scope such as :

$$C_{\text{man}} = C_{\text{materials}} + C_{\text{electricity}} + C_{\text{consumables}} \quad (4.3)$$

Table 4.2 Nomenclature of the different variables with associated definitions and unit.

Variables	Definitions [Unit]	Variables	Definitions [Unit]
C_{tot}	Total cost [€]	C_{man}	Cost for manufacturing scope [€]
C_{mat}	Base material part cost [€/kg]	C_{sup}	Support cost [€/kg]
M_{mat}	Base material part mass [kg]	M_{sup}	Support mass [kg]
C_{elec}	Base electricity cost [€/Whr]	t_p	Preparation time [hr]
P_p	Preparation power [W]	t_f	Fabrication time [hr]
P_f	Fabrication power [W]	$C_{\text{op,hard}}$	Hardware operator cost [€/hr]
$C_{\text{op,soft}}$	Software operator cost [€/hr]	t_{post}	Post-process time [hr]
t_{soft}	Software (slicing and CAD) time [hr]	C_m	Machine cost [€]
M	Maintenance cost [€]	α	Machine lifetime [hr]
t_{hr}	Annual working hours [hr]	β	Percentage of use time [%]
N	Total number of consumables	C_{cons}	Consumables cost [€]
t_{cons}	Use time of consumables [hr]	T_{cons}	Consumables lifetime [hr]

$$\begin{aligned}
C_{\text{man}} = & C_{\text{part}} \times M_{\text{part}} + C_{\text{sup}} \times M_{\text{sup}} + C_{\text{elec}} \times (P_p \times t_p + P_f \times t_f) \\
& + \left(C_{\text{printhead}} \times \frac{t_{\text{printhead}}}{T_{\text{printhead}}} + C_{\text{heatbead}} \times \frac{t_{\text{heatbead}}}{T_{\text{heatbead}}} \right)
\end{aligned} \tag{4.4}$$

The Eq. 4.4 presents the different factors an operator can modify during the fabrication phase, namely the material, electricity, and consumables (here, printhead and heatbed). The material cost remains constant for the desired part design, and the consumables cost is only related to printing duration. Consequently, the electricity cost is the only variable that can be controlled by the operator through printing parameters. Divided into preparation (p) and fabrication (f) consumptions, those two phases depend on the power demand (P_p , P_f) and the duration (t_p , t_f). Reducing these variables through printing parameters (e.g., temperature) can reduce the total cost.

4.3.3 Energy model

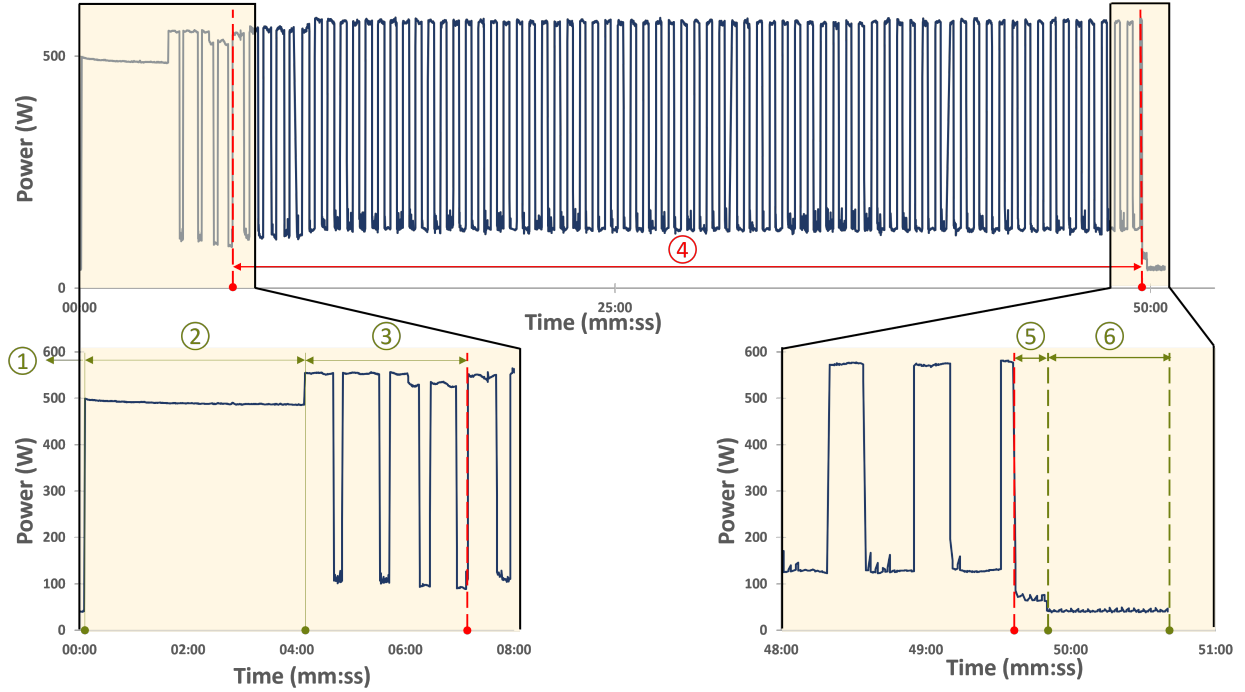


Figure 4.2 Power profile and identification of main printing phases. This profile corresponds to the printing of a specimen A1, PA12-CF at 260 °C printhead and 100% heating at 80 °C for the heatbed. Steps 1-3, 5 and 6 are preparation steps (green periods). Step 4 is fabrication (red period).

In the context of transition into a more sustainable industry, it is particularly crucial to consider the impact of decisions on energy consumption. SEC is an interesting quantitative indicator of total electricity consumption during the manufacturing phase. Additionally, the power profile can give qualitative information about the distribution of the power demand. Figure 4.2 provides an example of power profiles plotted as a function of process time for PA12-CF. Six different process phases can be identified: 1) idle and file launching; 2) heatbed warm-up; 3) printhead warm-up; 4) calibration and printing; 5) end and return to 0; and 6) idle. Phases 2) and 3) are temperature (hence material) dependent while Phase 4) is design dependent. Finally, Phases 1) and 5) are operator dependent. The preparation energy corresponds to the sum of the switch-on, file launch, heating (heatbed and printhead), calibration, return to 0 and idle phases. While fabrication energy corresponds to the energy used to keep the elements warm and displace them. As shown in Figure 4.2, the terms for fabrication energy E_f are directly given by the power demand in Phase 4), without the need to individually measure each displacement or heating energy term. Additionally, the energy

consumption for the warm-up and E_f are related to the temperatures of the printhead and the heatbed.

4.3.4 Mechanical performance

Carbon-fiber-reinforced polymer can be used in AM to improve material properties, thus, even with energetic consideration it is essential to control the quality of the part. In particular, if replacing a metallic part with a composite one means a drastic loss in mechanical performances, any reductions in cost and energy are irrelevant. Hence to ensure industrial viability, mechanical property needs to be assessed.

4.4 Experimental methods

4.4.1 Materials and equipment

We used a Raise 3D Pro2 FFF printer, an enclosed printer. To assess the mechanical properties of the printed part, we selected a tensile specimen Type A1, from standard ISO 527-2:2012. The filament material was CarbonX™ Nylon-CF Gen 3 from 3DXTech, with 240-270 °C and 80-110 °C as recommended temperatures from the manufacturer for the nozzle and the heatbed, respectively. Filament was stored in a vacuum oven to control humidity. We used a Fluke 289 multimeter to measure the electrical current during manufacturing. Mass of printed part are directly measured at the end of manufacturing. The voltage was measured upstream and assumed to remain constant throughout the experiment. Tensile tests were performed on Instron 1362 testing system with a 5kN load cell. Speed of testing is 5 mm/min, ultimate tensile resistance and Young's modulus are calculated following ISO 527-1:2012.

4.4.2 Design of experiment

To illustrate the impact of printing parameters on energy consumption and cost, as seen with Eq. 4.3, we selected two factors: printhead temperature, and heatbed heating strategy. Deposition orientation and infill were also considered, as they are common variables in FFF manufacturing. However, on one hand, the best tensile resistance for CRFP will always be delivered throughout the filament orientation without affecting energy consumption. On the other hand, for tensile specimen, an infill of 100 % must be chosen for optimal performance.

From the recommended temperature, we selected 245 °C, 250 °C, and 260 °C as our values for the nozzle temperature and the lower limit for the heatbed temperature 80 °C. To minimize

energy consumption, one could select a temperature below the recommended temperature, however, capability of the print is not ensured anymore. For the second parameter, we chose three levels depending on the number of heated layers relatively to the total number of layers printed (in percentage): full heating of the heatbed (100%), heating stopped at half the total layers (50%), and no heating (0%). In total, we performed nine different tests, with four repetitions for each condition. Tables 4.3 and 4.4 lists both fixed and variables printing parameters. In the case of Experiments #1 and #4, the adhesion between the part and the heatbed does not allow a proper deposition of the materials. This indicates threshold temperature conditions below which proper adhesion and deposition are difficult.

Table 4.3 Printing parameters held constant throughout the experiment.

Constant parameter	Value	Unit
Deposition speed	80	mm/s
Heatbed temperature (T_H)	80	°C
Layer thickness	0.2	mm
Outline shell	1	-
Infill percentage	100	%
Nozzle diameter	0.4	mm
Deposition orientation	+/- 45	°

Table 4.4 Variables and design of experiment.

Condition #	Printhead temperature T_P [°C]	Heatbed strategy [%]
1	245	0
2	245	50
3	245	100
4	250	0
5	250	50
6	250	100
7	260	0
8	260	50
9	260	100

Conditions #1, #4 and #6 have the same printing parameters, except printhead temperature. Condition #1 can not be successfully printed, meaning a 245 °C printhead temperature coupled with 0 % heatbed are insufficient. For condition #4, $T_P = 250$ °C and 0 % heatbed strategy are at the limit of the capability for the printer. Other conditions are within the range of capability of the printer and the variability is in terms of performance.

4.5 Results

4.5.1 Cost data

Total cost and cost distribution between materials, electricity and consumables are shown in Figure 4.3. Associated constant parameters are defined in Table 4.5. Materials represented the main cost, ranging from 74% to 94% of the total cost, depending on the conditions. As material consumption was roughly the same across all experiments, the absolute value of the material cost remained constant. It was therefore the differences in energy consumption that were responsible for the changes in total cost. From the conditions without heatbed heating to conditions with full heating, differences in power demand meant that the electricity cost represented between 5% and 20% of the total cost. As printing duration was equal for each experiment, the cost of consumables was not affected.

Table 4.5 Cost parameters held constant throughout the experiment. *Note : prices were converted into Euros according to the exchange rate on March 9 2022.*

Category	Parameters	Value	Source
Material	Base material part cost	52.78 EUR/500g	Supplier
Electricity	Base electricity cost	0.32 EUR/kWhr	Mean from public data [41]
Consumables	Printhead cost	227.49 EUR	Supplier
	Expected lifetime of printhead	1 year	Estimation from experience
	Heatbed cost	109.19 EUR	Supplier
	Expected lifetime of heatbed	1 year	Estimation from experience

4.5.2 Energy data

Figure 4.4 shows the different results of SEC (all six phases described in Figure 4.2), and SPE (Phase 4 only). As expected, energy consumption increased as the temperature increased. The difference in energy was, however, smaller between 50% and 100% than between 0% and 50%.

4.5.3 Tensile test data

Each of the 36 tensile specimens was mechanically tested, without any post-process. Figure 4.5 show results of each experiment regarding Young's modulus and ultimate tensile strength (UTS). Results revealed a substantial drop-off for experiments without heatbed heating (#4 and #7) on both Young's modulus and UTS. Young's modulus is relatively constant for

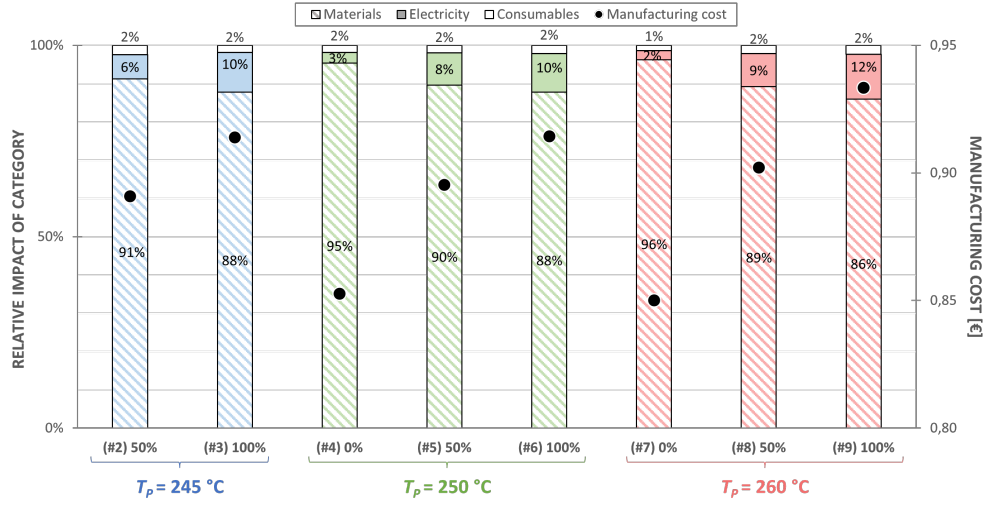


Figure 4.3 The estimated manufacturing cost and cost distribution for each condition. *Note : Condition #1 is not represented.*

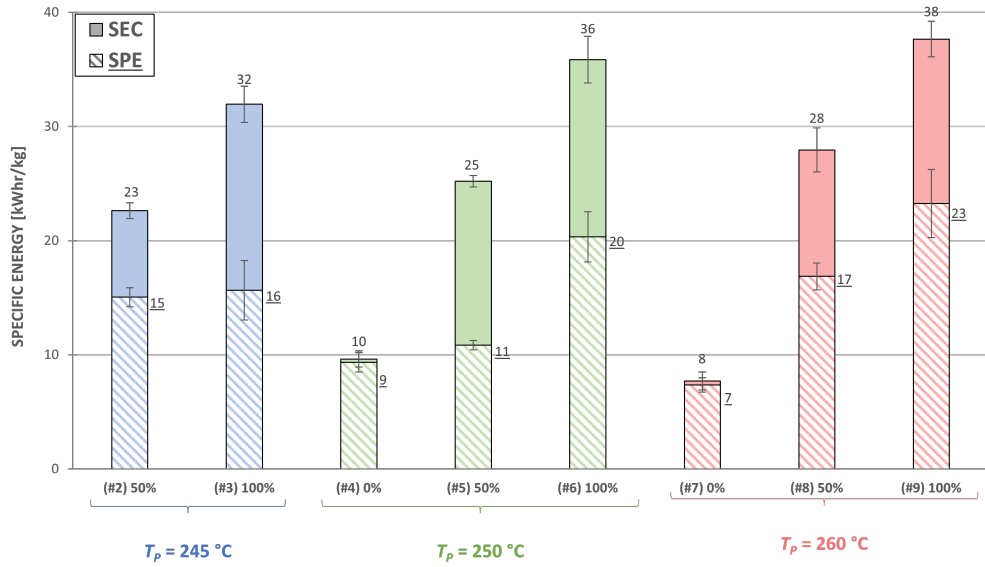


Figure 4.4 Mean data for SEC and SPE for each experiment. Error bars correspond to 95% confidence interval. *Note : Condition #1 is not represented.*

experiments when heatbed strategy is 50 % or 100 %. Highest ultimate tensile strength is achieved for Condition #9, while Conditions #6 and #8 are within 5% drop-off. Those results can be explained, on one hand as, Conditions #6 and #9 corresponded to full heating of the heatbed. On the other hand, Condition #8 also corresponds to the highest printhead temperature and the drop-off in UTS from 100 % to 50 % heatbed strategy is limited. Simi-

larly, the conditions with 50 % heatbed strategy exhibit a limited drop-off in UTS compared to their counterpart with 100 %. A lower ultimate tensile strength for other conditions (#2, #3, #4, #5 and #7) indicate that both printing parameters need to be optimized in order to achieved the highest resistance.

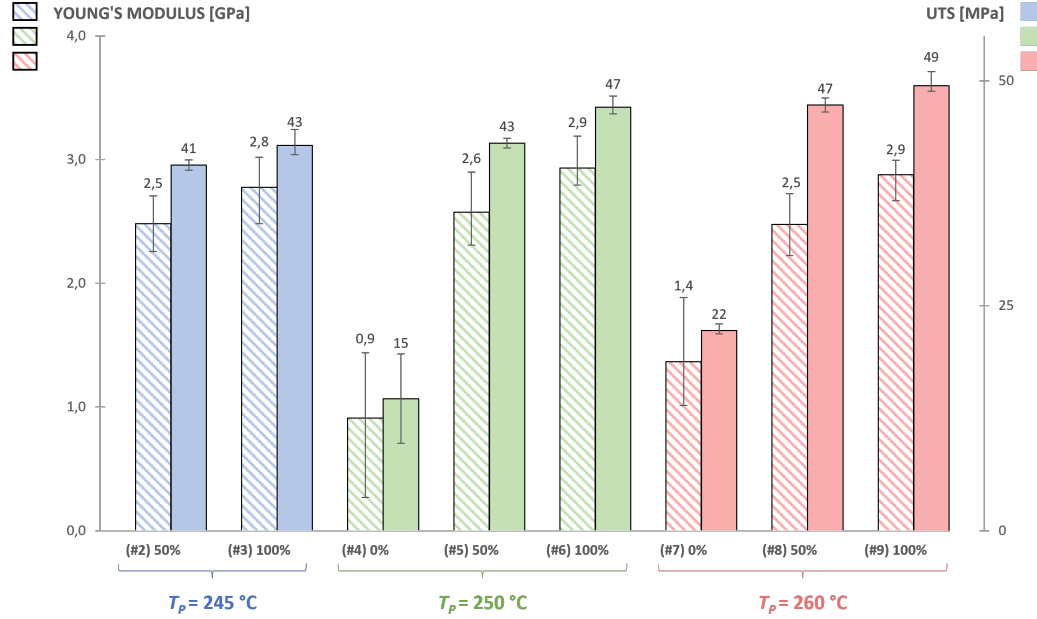


Figure 4.5 Comparison of tensile modulus and UTS for each conditions. Error bars correspond to 95% confidence interval. *Note : Condition #1 is not represented.*

4.6 Discussion

The printhead temperature and the heatbed strategy were compared in three cost categories: materials, electricity, and consumables. The materials cost is the main source of cost and remained constant. Nonetheless, electricity cost is significant and was the most fluctuating of all three categories, ranging from 5 to 20% of the total cost. Moreover, electricity cost would increase for a longer duration of printing.

The change in total consumption according to the different parameters was as expected reflecting a total energy that was more than four times higher when the heatbed was heated, increasing linearly across half and total heating. SEC and SPE underwent similar changes, as the temperature of the printhead and the heating strategy of the heatbed influenced both preparation power and fabrication power. Between the two parameters, the heatbed has the greater impact on energy consumption. Additionally, the unsuccessful printing in Condition #1 indicated a trade-off value or combination of the two parameters, determining

the printability or otherwise of a part.

The results of tensile tests on the printed specimens also changed as expected: heating positively increased ultimate tensile strength. However, the change in strength between the different heating strategies was not linear. On one side a printing strategy of 0% for the heatbed considerably reduced tensile strength, 68% and 55% reduction compare to full heatbed strategy for printhead temperatures of 250 °C and 260 °C, respectively. On the other side, the difference between a 50% strategy and full heating was relatively small, with 5% for 245 °C, 9% for 250 °C and 4% for 260 °C. Similarly for Young modulus, there are a 69% and 52% decreases between full and no heatbed heating for $T_p = 250$ °C and $T_p = 260$ °C. Between full and half heating, the drop-off are 11%, 10% and 14%, respectively. Additionally, conditions with same heatbed strategy (#4 and #7; #2, #5 and #8; #3, #6 and #9) present values of Young modulus within 0.1 GPa differences.

Figure 4.6 present each conditions regarding three main indicators : manufacturing cost, SPE and ultimate tensile strength. Such radar charts ease comparison between different conditions. Condition #9 is the appropriate solution for a case where the highest mechanical performance is searched, as it exhibits the maximum UTS and Young's modulus.

4.7 Conclusion

This work integrated emerging specific printing energy indicator to traditional cost and mechanical indicators in order to support decision-making in favor of more sustainable additive manufacturing. The aim of the present study was to develop an experimental method for gauging the impact of FFF printing parameters on three key indicators: manufacturing cost, specific printing energy, and ultimate tensile strength. Analysis of the flows involved in the process highlighted several economic variables as potential mean for optimization. To optimize the process in terms of cost and energy, both duration and power demand were identified as important variables. As duration is dependent on part design and desired mechanical strength, an optimization study would involve assessing both printing parameters and redesign. However, in the case of redesign the study would be case dependent thus harder to generalize.

By contrast, power demand is directly linked to printing parameters, making it much simpler to adjust for the operator. The present study therefore focused on a quick impact analysis of two parameters that influence the power demand for both the preparation phase and the printing phase: printhead temperature and heatbed heating strategy. With a relatively small design of experiments, an overview of all cost, energy and mechanical impacts can be

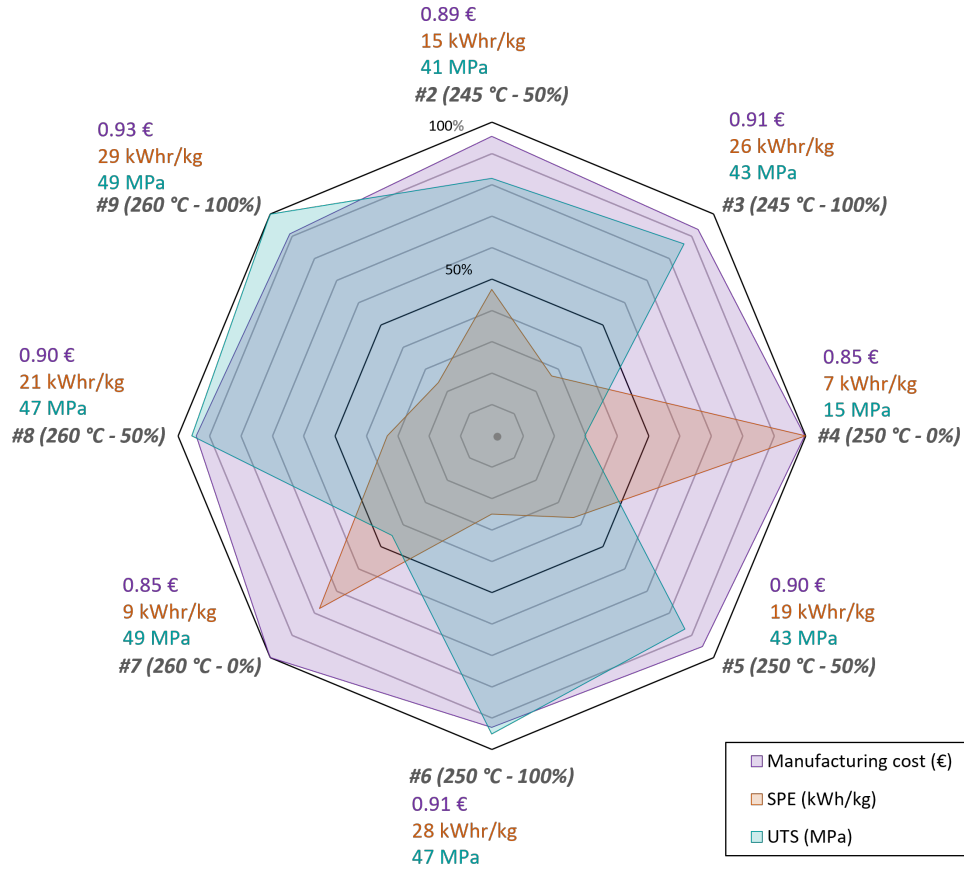


Figure 4.6 Radar charts for Conditions 2-9. Values are normalized, 100% being the optimum value (maximum for ultimate tensile strength and minimum for total cost and SEC).

estimated. Hence, the proposed methodology can be used to present solutions and strategies for optimizing the process, depending on the operator's requirements.

Future work would require to also investigate the duration variable, by evaluating parameters such as deposition speed and layer thickness. Moreover measuring the interactions between all the parameters could also give a more precise idea of the ideal combination of parameters, depending on the situation. Regarding cost evaluation, taking full account of Eq. 4.1 with machine cost, especially in the case of production series would provide a more exhaustive view. Finally, the tensile strength and Young's modulus are not the only mechanical or technical indicators needed, as printing precision and surface roughness are key indicators in AM and need to be investigated further. Other mechanical tests, such as fatigue or flexural tests, could also be implemented and would be compatible with the proposed methodology.

Statements and Declarations

- **Funding** : The authors gratefully acknowledge the financial support from the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada through Discovery Grants program – Individual (NSERC) (RGPIN-4566-2018 NSERC) and financial support provided by Brittany Regional Council for the mobility of the PhD student.
- **Conflict of interest/Competing interests** : The authors have no relevant financial or non-financial interests to disclose.
- **Availability of data and materials** : The public data used for "Base electricity cost" in Table 4.5, were derived from the following resources available in the public domain : <https://mern.gouv.qc.ca/energie/statistiques-energetiques/prix-electricite/> [41]. Any other data that support the findings of this study are available on request from the corresponding author.
- **Code availability** : Not applicable
- **Ethics approval** : Not applicable
- **Consent to participate** : Not applicable
- **Consent for publication** : Not applicable
- **Authors' contributions** : All authors contributed to the study conception and design. Material preparation, data collection and analysis were performed by Thibault Le Gentil, Daniel Therriault and Olivier Kerbrat. The first draft of the manuscript was written by Thibault Le Gentil and all authors commented on previous versions of the manuscript. All authors read and approved the final manuscript. The authors would also like to thank Sarah Benshrir for her help on uncertainty quantification and tensile tests.

References

- [1] Xin Wang, Man Jiang, Zuowan Zhou, Jihua Gou, and David Hui. "3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective". In: *Composites Part B: Engineering* 110 (2017), pp. 442–458. ISSN: 13598368. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.11.034. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>.
- [2] Luis Suárez and Manuel Domínguez. "Sustainability and environmental impact of fused deposition modelling (FDM) technologies". In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 106.3-4 (2020), pp. 1267–1279. ISSN: 14333015. DOI: 10.1007/s00170-019-04676-0.

- [3] Henri Paris, Hossein Mokhtarian, Eric Coatanéa, Matthieu Museau, and Inigo Flores Ituarte. “Comparative environmental impacts of additive and subtractive manufacturing technologies”. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 65.1 (2016), pp. 29–32. ISSN: 17260604. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.04.036.
- [4] Mohammed M. Mabkhot, Pedro Ferreira, Antonio Maffei, Primož Podržaj, Maksymilian Madziel, Dario Antonelli, Michele Lanzetta, Jose Barata, Eleonora Boffa, Miha Finžgar, Łukasz Paško, Paolo Minetola, Riccardo Chelli, Sanaz Nikghadam-Hojjati, Xi Vincent Wang, Paolo C. Priarone, Paweł Litwin, Dorota Stadnicka, and Niels Lohse. “Mapping industry 4.0 enabling technologies into united nations sustainability development goals”. In: *Sustainability (Switzerland)* 13.5 (2021), pp. 1–35. ISSN: 20711050. DOI: 10.3390/su13052560.
- [5] Syed A M Tofail, Elias P Koumoulos, Amit Bandyopadhyay, Susmita Bose, Lisa O Donoghue, and Costas Charitidis. “Additive manufacturing : scientific and technological challenges, market uptake and opportunities”. In: *Materials Today* 21.1 (2018), pp. 22–37. ISSN: 1369-7021. DOI: 10.1016/j.mattod.2017.07.001.
- [6] Nekoda van de Werken, Halil Tekinalp, Pouria Khanbolouki, Soydan Ozcan, Andrew Williams, and Mehran Tehrani. “Additively manufactured carbon fiber-reinforced composites: State of the art and perspective”. In: *Additive Manufacturing* 31.July 2019 (2020), p. 100962. ISSN: 22148604. DOI: 10.1016/j.addma.2019.100962.
- [7] Christoph Herrmann, Wim Dewulf, Michael Hauschild, Alexander Kaluza, Sami Kara, and Steve Skerlos. “Life cycle engineering of lightweight structures”. In: *CIRP Annals* 67.2 (2018), pp. 651–672. ISSN: 17260604. DOI: 10.1016/j.cirp.2018.05.008. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.05.008>.
- [8] Shunxin Qi, Xia Gao, Yunlan Su, Xia Dong, Dario Cavallo, and Dujin Wang. “Correlation between welding behavior and mechanical anisotropy of long chain polyamide 12 manufactured with fused filament fabrication”. In: *Polymer* 213.December 2020 (2021), p. 123318. ISSN: 00323861. DOI: 10.1016/j.polymer.2020.123318. URL: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.123318>.
- [9] Wolfgang Griehl and Djavid Ruestem. “Nylon-12-Preparation, Properties, and Applications”. In: *Industrial & Engineering Chemistry* 62.3 (1970), pp. 16–22. DOI: doi.org/10.1021/ie50723a005.
- [10] A. Kausar. “Advances in Carbon Fiber Reinforced Polyamide-Based Composite Materials”. In: *Advances in Materials Science* 19.4 (2019), pp. 67–82. DOI: 10.2478/adms-2019-0023.

- [11] Yahya Abderrafai, Mohammad Hadi Mahdavi, Facundo Sosa-Rey, Chloé Hérard, Ivonne Otero Navas, Nicola Piccirelli, Martin Lévesque, and Daniel Therriault. “Additive manufacturing of short carbon fiber-reinforced polyamide composites by fused filament fabrication: Formulation, manufacturing and characterization”. In: *Materials and Design* 214 (2022), p. 110358. ISSN: 18734197. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.110358. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110358>.
- [12] Isaac Ferreira, Rui Madureira, Santiago Villa, Abílio de Jesus, Margarida Machado, and Jorge Lino Alves. “Machinability of PA12 and short fibre-reinforced PA12 materials produced by fused filament fabrication”. In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 107.1-2 (2020), pp. 885–903. ISSN: 14333015. DOI: 10.1007/s00170-019-04839-z.
- [13] Ensinger Plastics. *TECAMID 12 natural* / Ensinger Plastics. URL: <https://www.ensingerplastics.com/en/shapes/products/pa12-tecamid-12-natural>.
- [14] Evonik. *Product Information VESTAMID® Care ML16*. URL: <https://www.plastics-database.com/material/pdf/VESTAMIDCareML16/VESTAMIDCareML16?sLg=en&rnd=1665067677760>.
- [15] Marius Nicolae Baba. “Flatwise to Upright Build Orientations under Three-Point Bending Test of Nylon 12 (PA12) Additively Manufactured by SLS”. In: *Polymers* 14.5 (2022). ISSN: 20734360. DOI: 10.3390/polym14051026.
- [16] Magdalena Tomanik, Matylda Zmudzińska, and Magdalena Wojtków. “Mechanical and Structural Evaluation of the PA12 Desktop Selective Laser Sintering Printed Parts Regarding Printing Strategy”. In: *3D Printing and Additive Manufacturing* 8.4 (2021), pp. 271–279. ISSN: 23297670. DOI: 10.1089/3dp.2020.0111.
- [17] Tuan Noraihan Azila Tuan Rahim, Abdul Manaf Abdullah, and Hazizan Md Akil. “Recent Developments in Fused Deposition Modeling-Based 3D Printing of Polymers and Their Composites”. In: *Polymer Reviews* 59.4 (2019), pp. 589–624. ISSN: 15583716. DOI: 10.1080/15583724.2019.1597883.
- [18] Andrew N. Dickson, James N. Barry, Kevin A. McDonnell, and Denis P. Dowling. “Fabrication of continuous carbon, glass and Kevlar fibre reinforced polymer composites using additive manufacturing”. In: *Additive Manufacturing* 16 (2017), pp. 146–152. ISSN: 22148604. DOI: 10.1016/j.addma.2017.06.004. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2017.06.004>.

- [19] J. M. Chacón, M. A. Caminero, P. J. Núñez, E. García-Plaza, I. García-Moreno, and J. M. Reverte. “Additive manufacturing of continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties”. In: *Composites Science and Technology* 181.June (2019), p. 107688. ISSN: 02663538. DOI: 10.1016/j.compscitech.2019.107688. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107688>.
- [20] Chunze Yan, Liang Hao, Lin Xu, and Yusheng Shi. “Preparation, characterisation and processing of carbon fibre/ polyamide-12 composites for selective laser sintering”. In: *Composites Science and Technology* 71.16 (2011), pp. 1834–1841. ISSN: 02663538. DOI: 10.1016/j.compscitech.2011.08.013. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.08.013>.
- [21] Anton Jansson and Lars Pejryd. “Characterisation of carbon fibre-reinforced polyamide manufactured by selective laser sintering”. In: *Additive Manufacturing* 9 (2016), pp. 7–13. ISSN: 22148604. DOI: 10.1016/j.addma.2015.12.003. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2015.12.003>.
- [22] Guangxin Liao, Zhixiang Li, Yuchuan Cheng, Dingding Xu, Dingchun Zhu, Shenglong Jiang, Jianjun Guo, Xinde Chen, Gaojie Xu, and Yuejin Zhu. “Properties of oriented carbon fiber/polyamide 12 composite parts fabricated by fused deposition modeling”. In: *Materials and Design* 139 (2018), pp. 283–292. ISSN: 18734197. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.11.027. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.027>.
- [23] L. G. Blok, M. L. Longana, H. Yu, and B. K.S. Woods. “An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites”. In: *Additive Manufacturing* 22.March (2018), pp. 176–186. ISSN: 22148604. DOI: 10.1016/j.addma.2018.04.039.
- [24] 3DXTech. *CarbonXTM Carbon Fiber Nylon 12 (PA12) 3D Filament*. 2022. URL: https://www.3dxtech.com/wp-content/uploads/2021/04/CF_PA12_v1.pdf.
- [25] Marcella Ruschi Mendes Saade, Ammar Yahia, and Ben Amor. “How has LCA been applied to 3D printing? A systematic literature review and recommendations for future studies”. In: *Journal of Cleaner Production* 244 (2020), p. 118803. ISSN: 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118803.
- [26] Vincenzo Lunetto, Paolo C Priarone, Manuela Galati, and Paolo Minetola. “On the correlation between process parameters and specific energy consumption in fused deposition modelling”. In: *Journal of Manufacturing Processes* 56.June (2020), pp. 1039–1049. ISSN: 1526-6125. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.06.002.

- [27] Martin Baumer, Joost R. Duflou, William Flanagan, Timothy G. Gutowski, Karel Kellens, and Reid Lifset. “Charting the Environmental Dimensions of Additive Manufacturing and 3D Printing”. In: *Journal of Industrial Ecology* 21 (2017), S9–S14. ISSN: 15309290. DOI: 10.1111/jiec.12668.
- [28] Ahmed Elkaseer, Stella Schneider, and Steffen Scholz. “Experiment-Based Process Modeling and Optimization for High-Quality and Resource-Efficient FFF 3D Printing”. In: *Applied Sciences* (2020).
- [29] S. Kara and W. Li. “Unit process energy consumption models for material removal processes”. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60.1 (2011), pp. 37–40. ISSN: 00078506. DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.018.
- [30] Zhichao Liu, Qiuhong Jiang, Fuda Ning, Hoyeol Kim, Weilong Cong, Changxue Xu, and Hong Chao Zhang. “Investigation of energy requirements and environmental performance for additive manufacturing processes”. In: *Sustainability (Switzerland)* 10.10 (2018). ISSN: 20711050. DOI: 10.3390/su10103606.
- [31] Daniel Dunaway, James Dillon Harstvedt, and Junfeng Ma. “A Preliminary Experimental Study of Additive Manufacturing Energy Consumption”. In: *Proceedings of the ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (2017), pp. 1–8.
- [32] Zhilin Ma, Mengdi Gao, Qingyang Wang, Nan Wang, Lei Li, Conghu Liu, and Zhifeng Liu. “Energy consumption distribution and optimization of additive manufacturing”. In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 116.11-12 (2021), pp. 3377–3390. ISSN: 14333015. DOI: 10.1007/s00170-021-07653-8.
- [33] Katharina Ruckstuhl, Rafaela Costa Camoes Rabello, and Sally Davenport. “Design and responsible research innovation in the additive manufacturing industry”. In: *Design Studies* 71 (2020), p. 100966. ISSN: 0142694X. DOI: 10.1016/j.destud.2020.100966. URL: <https://doi.org/10.1016/j.destud.2020.100966>.
- [34] Ben Freeman, Derek Coville, and Dan Hicks. “Cost estimation of CNC vs composite reinforced FDM3D printing for low-volume production of motorcycle components”. In: *American Journal of Engineering, Science and Technology* 6 (2020), pp. 1–13.
- [35] Vincenzo Lunetto, Paolo C. Priarone, Sami Kara, and Luca Settineri. “A comparative LCA method for environmentally friendly manufacturing: Additive manufacturing versus Machining case”. In: *Procedia CIRP* 98 (2021), pp. 406–411. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2021.01.125. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.125>.

- [36] R. J. Urbanic and S. M. Saqib. “A manufacturing cost analysis framework to evaluate machining and fused filament fabrication additive manufacturing approaches”. In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 102.9-12 (2019), pp. 3091–3108. ISSN: 14333015. DOI: 10.1007/s00170-019-03394-x.
- [37] Giuseppe Ingarao and Paolo C. Priarone. “A comparative assessment of energy demand and life cycle costs for additive- and subtractive-based manufacturing approaches”. In: *Journal of Manufacturing Processes* 56.June (2020), pp. 1219–1229. ISSN: 15266125. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.06.009. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.06.009>.
- [38] Mojtaba Khorram Niaki, S. Ali Torabi, and Fabio Nonino. “Why manufacturers adopt additive manufacturing technologies: The role of sustainability”. In: *Journal of Cleaner Production* 222 (2019), pp. 381–392. ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.03.019. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.019>.
- [39] Mazyar Yosofi, Olivier Kerbrat, and Pascal Mognol. “Additive manufacturing processes from an environmental point of view- a new methodology for combining technical, economic, and environmental predictive models”. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 102.Section 2 (2019), pp. 4073–4085. ISSN: 14333015. DOI: 10.1007/s00170-019-03446-2.
- [40] A. Horacio Gutierrez-Osorio, Leopoldo Ruiz-Huerta, Alberto Caballero-Ruiz, Héctor R. Siller, and Vicente Borja. “Energy consumption analysis for additive manufacturing processes”. In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 105.1-4 (2019), pp. 1735–1743. ISSN: 14333015. DOI: 10.1007/s00170-019-04409-3.
- [41] Ministère de l’Énergie et des Ressources naturelles du Québec. *Prix de l’électricité*. 2018. URL: <https://mern.gouv.qc.ca/energie/statistiques-energetiques/prix-electricite/>.

CHAPITRE 5 ARTICLE 2 : IDENTIFYING EFFICIENT SOLUTIONS FOR ADDITIVE MANUFACTURING OF SHORT CARBON-FIBER REINFORCED POLYAMIDE 6 FROM ENERGY AND MECHANICAL PERSPECTIVES

Thibault Le Gentil^{1,2}, Jean Langot², Daniel Therriault², Olivier Kerbrat¹

¹ Civil and Mechanical Engineering Institute, CNRS GeM, Rennes University, Rennes, France

² Laboratory for Multiscale Mechanics (LM2), Department of Mechanical Engineering, 2500 chemin de Polytechnique, Montreal H3T 1J4, Canada

Submitted in Procedia CIRP - 30th CIRP Life Cycle Engineering Conference on September 12th, 2022

Abstract

Additive manufacturing (AM) technologies have transformed manufacturing, by providing greater control over the material deposition. Owing to its versatility and high strength-to-mass ratio, AM with composite materials has grown exponentially, founding many applications in industries. Further implementation of AM with composite materials would require the user to be able to improve FFF (Fused Filament Fabrication) efficiency regarding energy and technical aspects. For this purpose, it is necessary to assess the energetic and mechanical effects of printing parameters. In this paper, five printing parameters are evaluated: bed heating strategy, bed temperature, nozzle temperature, layer thickness and deposition speed regarding energy consumption during printing phase and ultimate tensile strength (UTS). A decision-making tool based on Ashby's material selection tool is also implemented to further discriminate different solutions. Different weights and a Pareto front have been used to illustrate the methodology's potential. Among the tested parameters, bed heating strategy has proven to be the most impactful parameter while bed temperature shows little to no effect. This study proposes a methodology as starting point for efficient FFF printing.

5.1 Introduction

Additive Manufacturing (AM) techniques gain importance over the conventional subtractive manufacturing techniques, from being used for prototyping AM is, nowadays, a key element of the industry and manufacturing processes. The advantages of this technique include a greater customization parts and complex components, without using tools, and reduced

waste compared to other manufacturing techniques [1, 2]. These benefits have led to an even growing adoption of AM with a 19.5 % industry growth in 2021 [3].

Applications can be found in a wide range of industries, including aerospace, automotive, medical, and consumer goods. In 2017, the aerospace industry accounts for 18.2 % of the total AM market and is a promising field of applications, mainly for non-structural parts [4]. Additionally, the limited production lot in the aerospace industry meet the limited productivity of AM. Among the different AM processes, Fused Filament Fabrication (FFF) is the most widespread AM process owing to relatively fast production, ease of access and flexibility in material [5].

Among compatible material, composite material has found success in many transport industries due to his lightweighting potential, which can be further enhanced by AM. Thereby, reducing the fuel efficiency of airplane and carbon emission in an effort to meet the International Civil Aviation Organization target to reduce aviation emissions by 50 % by 2050. Previous examples present composite materials and AM as viable approaches for improving energy the efficiency [6]. Due to its attractive strength-to-weight ratio, resistance to thermal expansion, and corrosion resistance, carbon-fiber reinforced polymer (CRFP) is a widely and frequently used composite materials [7]. Among thermoplastics matrix, polyamide 6 (PA6) is one of the most versatile semi-crystalline polymers used in automobiles and aerospace [8]. Furthermore, carbon-fiber reinforced polyamide 6 (PA6-CF) exhibit attractive mechanical durability under hydro-thermal and thermo-oxidative conditions, making it suitable for automobile and aerospace applications [9, 10].

From a manufacturing viewpoint, FFF printing parameters are a cornerstone between energy consumption and part properties (e.g., mechanical, physical, geometry accuracy). Consequently, the need of methodology to assess and aid decision-making for printing parameters is required. Niang & al. [11] investigated the effects of speed deposition, nozzle temperature and layer thickness on the tensile properties and fracture interface of FFF CFRP parts. They found that an increase in speed deposition leads to lower interbonding between layers, while reducing the speed deposition below a certain speed also reduce tensile strength resistance. Benwood & al. [12] presented tensile tests and microstructures showing the bed temperature as the main contributor to the materials crystallinity, and tensile strength. The results provided by Christiyan & al. [13] showed that maximum tensile strength was improved by layer thickness below 0.2mm. Alafaghani & al. [14] analyzed the influence of the nozzle temperature, layer thickness, infill percentage and infill patterns on strength of FFF parts. Whilst infill percentage and layer thickness showed the highest impact on tensile resistance, nozzle temperature narrowly improves the tensile strength for small layer thickness

(< 0.5 mm) and have a strong influence for larger thickness (> 0.5 mm). Regarding energy consumption, Elkaseer & al. [15] statistically evaluated the impacts of infill density, layer thickness, speed deposition, nozzle temperature and orientation on energy consumption of PLA, using Taguchi orthogonal array. Layer thickness and printing speed were found as main factors. Lunetto & al. evaluated the influence of thickness, materials and infill percentage on energy per unit of mass produced. Vidakis & al. [16] compare energy consumption, to mechanical responses (ultimate tensile strength (UTS), Young's modulus and toughness) by changing infill percentage, deposition angle, nozzle temperature, deposition speed, deposition thickness and bed temperature. These studies focused on the impact of the different printing parameters on either the energy consumption or the mechanical performances. This work combine the energy consumption and the mechanical performance data to identify the appropriate solution to a specific need. Firstly, experimental data are gathered to assess the relationship between energy consumption and ultimate tensile strength to the most critical printing parameters. Secondly, based on the collected data, a decision tool is developed to discriminate various options for printer users relative to their goals.

5.2 Materials and method

Experimental tests were designed using CarbonX™ NYLON 6 + CF GEN 3 (< 20 %wt) filament from 3DXTech to produce tensile specimen Type A1, from standard ISO 527-2:2012 [17], on a Raise 3D Pro2 FFF printer. To regulate humidity, filament was kept in a vacuum oven. A HOBO Plug Load Data Logger UX120-018 was used to track energy consumption. After printing and measuring the mass, raft was manually removed. To evaluate the impact of printing parameters on energy consumption and mechanical performance, two indicators were selected: energy consumption during the deposition phase and UTS. Only the printing phase is evaluated to dismiss any variability during heating phases from the machine. Tensile tests were carried out following ISO 527-2 on Instron 1362 testing system with a 5 kN load cell. Speed of tests was 3 mm/min. The strain was measured with an extensometer MTS 634.26F-26.

Five printing parameters have been selected: bed temperature, nozzle temperature, layer thickness, deposition speed and bed heating strategy. Deposition orientation and infill were also considered, as they are common variables in FFF manufacturing. However, on one hand, the best tensile resistance for CRFP will always be delivered throughout the filament orientation without affecting energy consumption. On the other hand, for tensile specimen, an infill of 100 % must be chosen for optimal performance. Three levels for each of the five printing parameters were chosen to assess evolution of energy and mechanical impacts. Levels were

chosen to stay within the capability range of the printer and avoid any part manufacturing failure. Bed heating strategy is between 0 % (heating for the first three layers then no heating) and 100 %. 0 % would correspond to prototyping cases where only printability is required. For other parameters, levels were taken from the lower range recommended by the supplier and then increased. Finally, to minimize the number of experiments Taguchi method was selected. Two repetitions of each condition was tested. Table 5.1 lists fixed printing parameters and Table 5.2 present the twenty-seven conditions of printing parameters.

Table 5.1 Printing parameters held constant throughout the experiment.

Parameter	Value	Unit
Outline shell	1	-
Nozzle diameter	0.4	mm
Deposition orientation	+/-45	°
Top solid layers	0	-
Bottom solid layers	0	-
Extrusion multiplier	0.85	%

5.3 Results and discussion

5.3.1 Energy consumption

Figure 5.1 depict impacts of the different printing parameters on energy consumption. Bed heating strategy is the predominant parameter, influencing the power demand during manufacturing. The second most important parameter is the layer thickness, affecting manufacturing duration. In contrast, bed temperature show little to no impact on energy consumption. This outcome can be explained by the fact that bed temperature mostly affects how long the heating phase lasts, but does not influence power demand and/or the duration of the printing phase. Finally, the increase of the energy with the deposition speed is counter-intuitive, as higher speed would mean a reduction in manufacturing time. The relatively small difference between the high and low factor levels may help to explain this evolution. Also, deposition speed denotes the highest value possible during printing, not mean speed. Increase in speed also mean increase in acceleration/deceleration and power demand. Figure 5.2 show energy consumption during printing phase for each condition. The difference between the minimum and maximum usage, which ranges from 62 Wh to 304 Wh, is approximately 5 times. Those values correspond to a Specific Energy Consumption (ratio between total energy consumption and printed mass) ranging between 25 MJ/kg to 113 MJ/kg, which is consistent to SEC data available in the literature for other FFF printers [18]. As bed heating strategy is the most

Table 5.2 Design of experiment following L₂₇ Taguchi orthogonal array.

#	Bed heating strategy	Bed temperature [°C]	Nozzle temperature [°C]	Layer thickness [mm]	Deposition speed [mm/s]
1	Stop heating after 3 layers (0 %)	80	255	0.15	75
2	0 %	80	260	0.20	80
3	0 %	80	270	0.30	85
4	0 %	90	255	0.20	80
5	0 %	90	260	0.30	85
6	0 %	90	270	0.15	75
7	0 %	95	255	0.30	85
8	0 %	95	260	0.15	75
9	0 %	95	270	0.20	80
10	Heating for 50 %	80	255	0.20	85
11	50 %	80	260	0.30	75
12	50 %	80	270	0.15	80
13	50 %	90	255	0.30	75
14	50 %	90	260	0.15	80
15	50 %	90	270	0.20	85
16	50 %	95	255	0.15	80
17	50 %	95	260	0.20	85
18	50 %	95	270	0.30	75
19	Full heating (100 % of the layers)	80	255	0.30	80
20	100 %	80	260	0.15	85
21	100 %	80	270	0.20	75
22	100 %	90	255	0.15	85
23	100 %	90	260	0.30	75
24	100 %	90	270	0.20	80
25	100 %	95	255	0.30	75
26	100 %	95	260	0.20	80
27	100 %	95	270	0.15	85

impactful parameter, values are colored according to the level of heating strategy. The two most consuming conditions are for full heating of the bed and a layer thickness of 0.15 mm.

5.3.2 Tensile test

Figure 5.3 shows the influence of the printing parameters on the ultimate tensile strength, and Figure 5.4 depicts the sorted UTS values for each condition, with a focus on heating bed strategy. The UTS is mainly affected by the heating bed strategy: a full heating im-

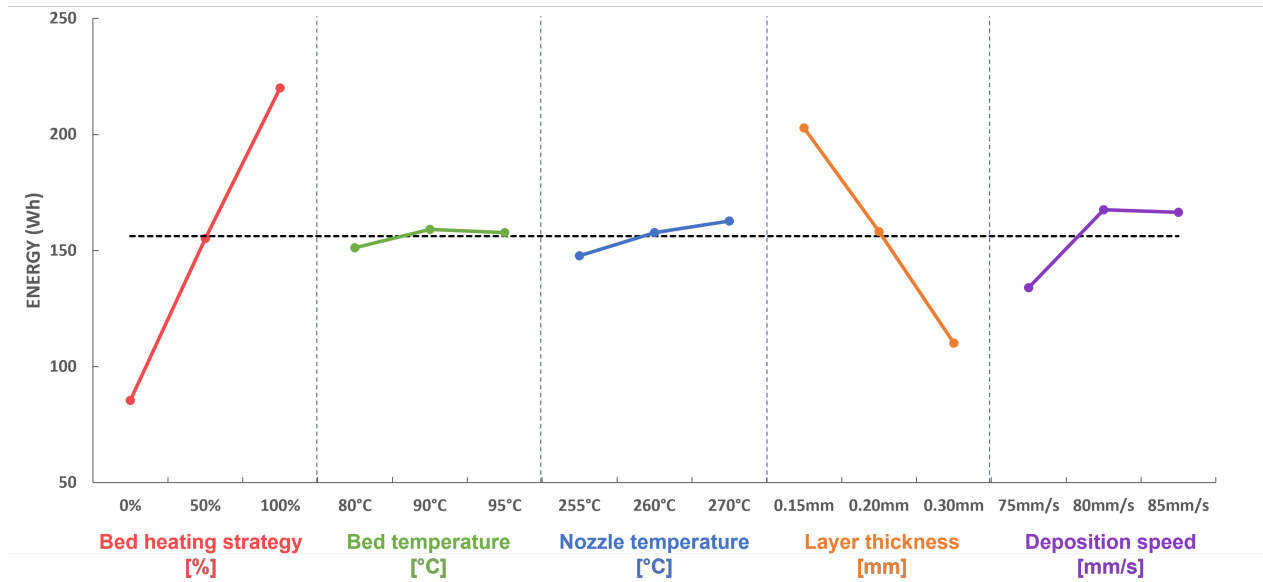


Figure 5.1 Impact of the different printing parameters on energy consumption during printing phase.

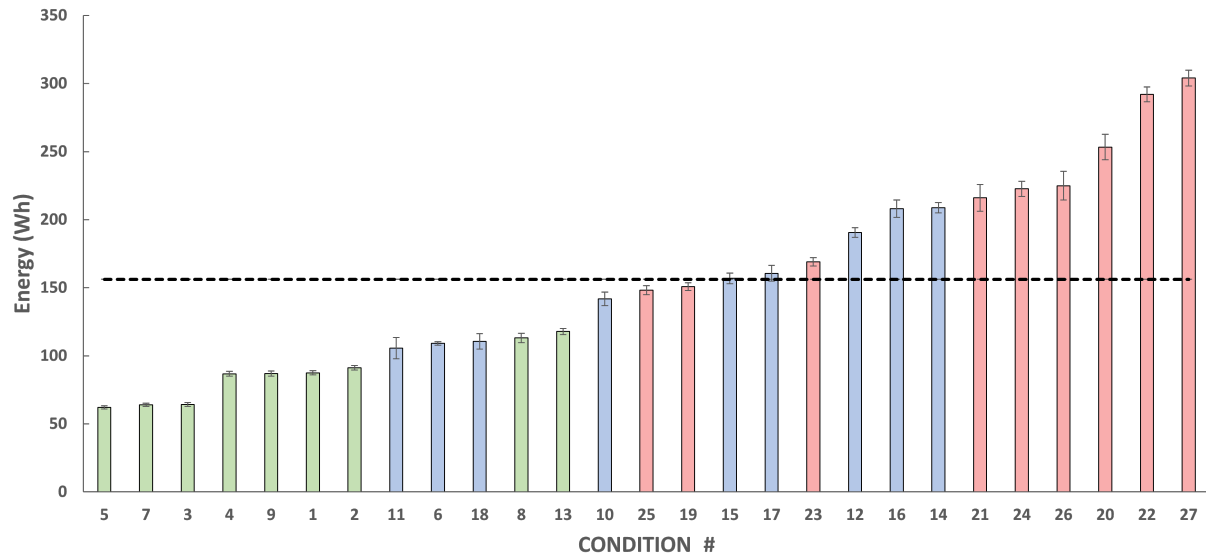


Figure 5.2 Sorted energy consumption values for the twenty-seven conditions. In green, bed heating strategy of 0 %; in blue, heating for 50 % of the layers; in red, 100 %. Black dotted line represents mean value. Error bars represent 95 % confidence interval.

proves greatly the mechanical properties of the specimen when compared to 3 layers or 50 % strategies. Since the bed heating strategy is the most impactful parameter on both energy consumption and UTS, it is a preferred variable to adjust depending on an energy saving case

or a mechanical optimization case. Increasing the bed and nozzle temperatures also slightly improves the UTS, but this effect is limited. The bed heating strategy, bed temperature and nozzle temperature affect the environment temperature, which in turn influences the complex process of molecular diffusion and heat transfers that drive the consolidation of the filaments at the interface and therefore improves the UTS.

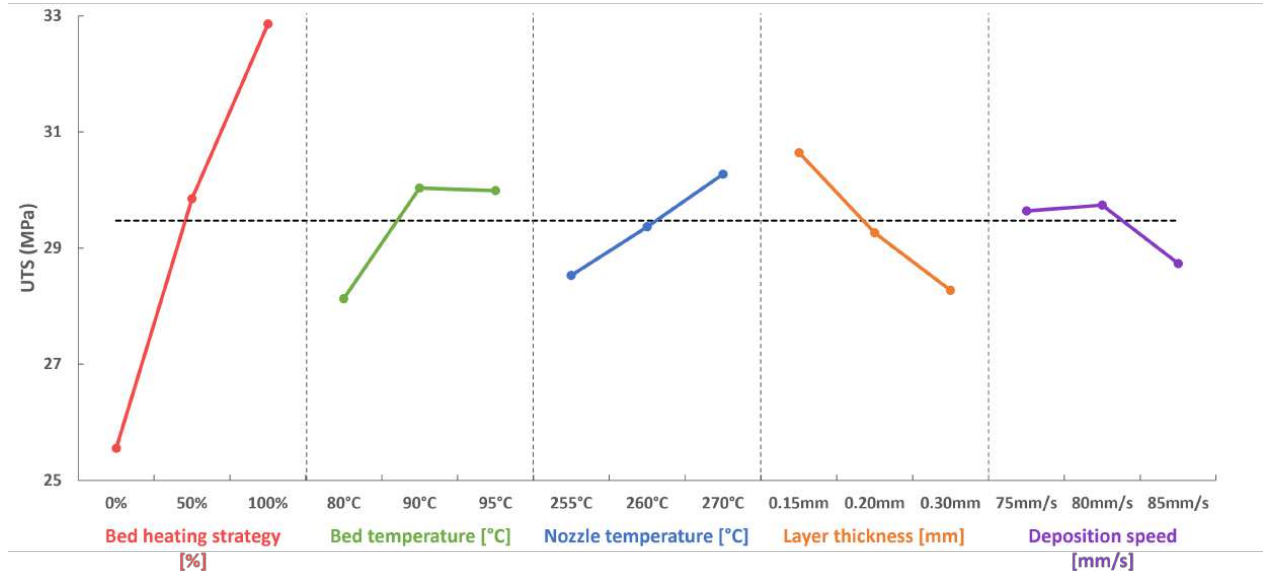


Figure 5.3 Impact of the different printing parameters on UTS during printing phase.

Increasing the deposition speed has a detrimental effect on the UTS, because the filament cannot uniformly reach the nozzle temperature if the deposition speed is too important. The mechanical resistance is influenced by the width of the contact between filaments [19], which explains why reducing layer thickness has a favorable impact on UTS. However, given the weak adhesion and the porosity between the filaments, the interface between the filaments is a recognized source of disruption [20], reducing the layer thickness also increases the number of contacts between filaments, raising statistically the risk of failure.

5.3.3 Decision-making

To help decision-making following the prior results, one can use multi-objective optimization tool from Ashby. Figure 5.5 plot each conditions relative to their energy consumption and the inverse of UTS. On this plot, Pareto front represents conditions that provide the best balance between the two indicators. In our case, several conditions appear as equally balanced.

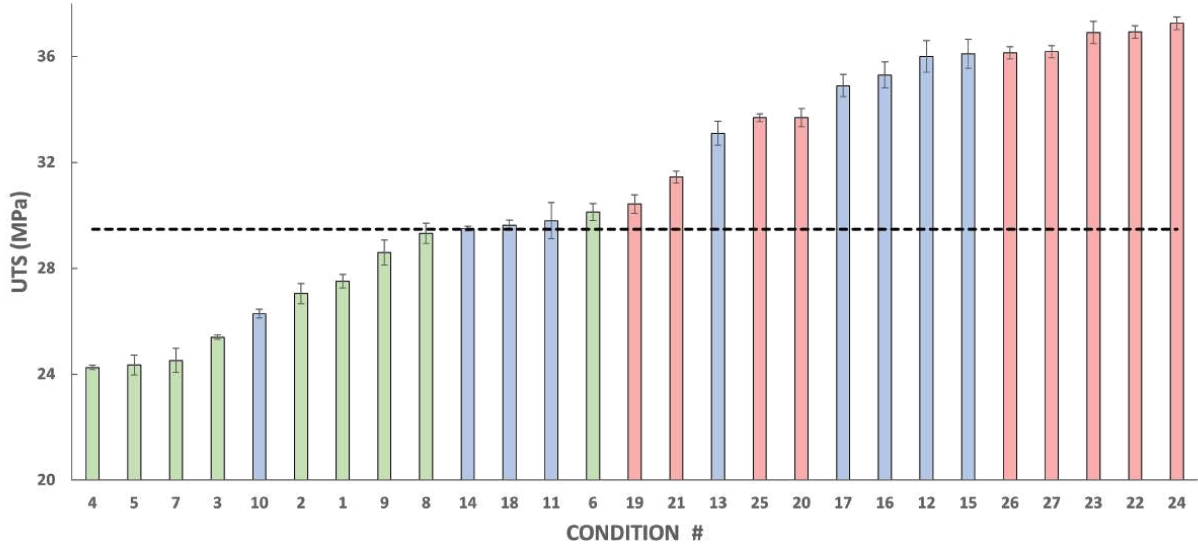


Figure 5.4 Sorted UTS values for each condition. bed heating strategy of 0 %; in blue, heating for 50 % of the layers; in red, 100 % of the layers. Black dotted line represents mean value. Error bars represent 95 % confidence interval.

Additionally, a *value function* can be formulated with a slope that balance the conflicting objectives depending on the goal, the conditions minimizing the function being the overall optimum. Figure 5.6 represents different values of the slope, depending on the application. Additionally, relative to their goals, designers, environmentalists, printer manufacturers, and technical managers might choose different values.

For the case where energy consumption and UTS are both equally important, then $\alpha = 1$ (slope = 1), and thus, condition #25 is the optimum (Figure 5.6a). As a middle-ground compromise, condition #25 corresponds to the full heating of the bed. Other parameters are fixed at 95 °C and 270 °C temperatures for bed and nozzle respectively, 0.30 mm layer thickness for 75 mm/s. Figure 5.6b), present the case where for each increase of a unit of energy consumption we accept an increase of 10 units of UTS (slope = 0.1). Condition #3 having the fifth lowest UTS but third less consuming. For this energy saving case, the bed is only heated at 270 °C for the first three layers, nozzle temperature is 80 °C, layer thickness is 0.30 mm and speed deposition is at 85 mm/s. And vice versa for the case in Figure 5.6c), where each increase of a unit of UTS we accept an increase of 10 units of energy consumption (slope = 10). In this case #27 and #24 are the optimums. Condition #27 having the highest of all UTS but also most consuming. For this mechanical performance

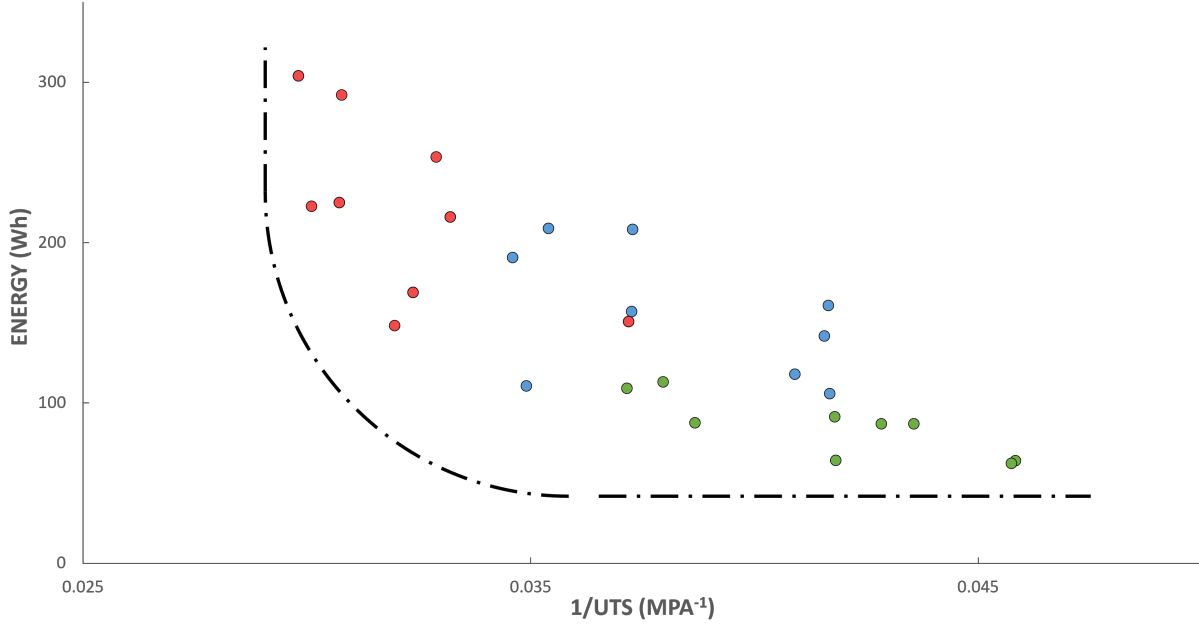


Figure 5.5 Plot of energy consumption with respect to $1/UTS$ for each condition. In green, bed heating stopped after 3 layers; in blue, heating for 50 %; in red, 100 %. Black dotted line represent the Pareto front.

oriented case, all parameters are set at optimal levels mechanically (100 %; 95 °C; 255 °C; 0.15 mm; 85 mm/s).

These findings suggest a weak and inverse correlation between energy use and tensile resistance. As the highest consumption condition does not always have the highest UTS, indicating space for efficiency. Similar to this, the lowest consuming condition did not result in the lowest UTS.

5.4 Conclusion

This study presents a framework for efficient FFF printing to confront various solutions regarding their energy and mechanical performances. Each printer user can then adapt this comparison methodology to identify the set of printing parameters adapted to a mechanical, energy or balance AM fabrication.

First, the impacts of five printing parameters for composite PA6-CF materials, revealed the bed heating strategy and the layer thickness as main contributor to energy consumption and UTS. While full heating of the bed appears to be more appropriate to display the highest mechanical resistance, no heating may be more suited for prototyping. Inversely, bed and

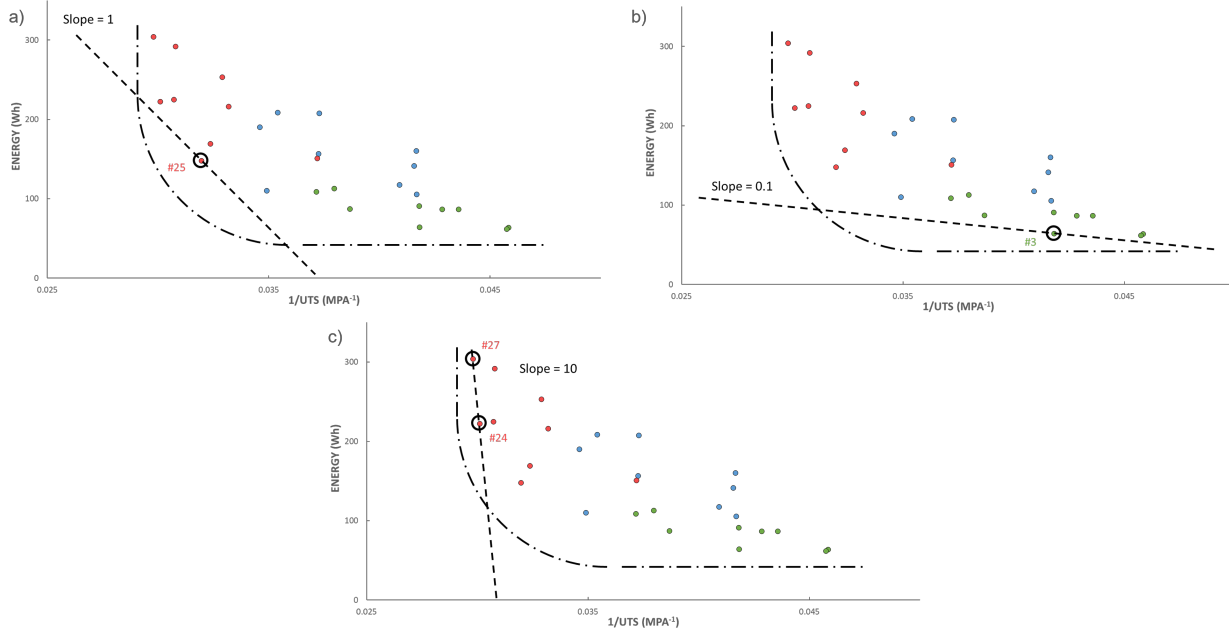


Figure 5.6 Plot of energy consumption with respect to $1/UTS$ for each condition, with Pareto front, and value function with: a) slope = 1 (no preference between energy consumption and UTS); b) slope = 0.1 (low energy consumption is preferred); and c) slope = 10 (UTS is favored). The black circle correspond to optimized condition for each slope.

nozzle temperature have a relatively low impact on the mechanical properties and energy consumption during printing phase.

Secondly, Ashby's multi-objective optimization tool was applied to the various conditions to help decision-making. The Pareto front first display conditions with the best compromise between the two indicators (here energy consumption and UTS). Although the correlation exists, an increase in energy consumption does not lead directly to the most optimal mechanical solution, and vice versa. Then, the weight associated to the two indicators will further distinguish conditions. In future work, this methodology can further be expanded by investigating other AM process and/or material. Moreover, interactions between printing parameters and integrating the economic aspect could give additional information to optimize the process.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the financial support from the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada through Discovery Grants program – Individual (NSERC) (RGPIN-4566-2018 NSERC) and financial support provided by Brittany Regional

Council.

References

- [1] Tuan D. Ngo, Alireza Kashani, Gabriele Imbalzano, Kate T.Q. Nguyen, and David Hui. “Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges”. In: *Composites Part B: Engineering* 143. February (2018), pp. 172–196. ISSN: 13598368. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>.
- [2] Andra Tofan-Negru, Cristian Barbu, Amado Stefan, and Ioana Carmen Boglis. “Analysis and characterization of additive manufacturing processes”. In: *INCAS Bulletin* 13.4 (2021), pp. 167–180. ISSN: 22474528. DOI: 10.13111/2066-8201.2021.13.4.14.
- [3] Wohlers Associates. *Wohlers Report 2022*. 2022. URL: <https://www.3dnatives.com/en/wohlers-report-2022-strong-growth-additive-manufacturing-160320225/#!>.
- [4] Manu Srivastava and Sandeep Rathee. “Additive manufacturing: recent trends, applications and future outlooks”. In: *Progress in Additive Manufacturing* 7.2 (2021), pp. 261–287. ISSN: 23639520. DOI: 10.1007/s40964-021-00229-8. URL: <https://doi.org/10.1007/s40964-021-00229-8>.
- [5] M.V.D Sai Kalyan, Harish Kumar, and Leeladhar Nagdeve. “Latest trends in Additive manufacturing”. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1104.1 (2021), p. 012020. ISSN: 1757-8981. DOI: 10.1088/1757-899x/1104/1/012020.
- [6] L. Zhu, N. Li, and P. R.N. Childs. “Light-weighting in aerospace component and system design”. In: *Propulsion and Power Research* 7.2 (2018), pp. 103–119. ISSN: 2212540X. DOI: 10.1016/j.jppr.2018.04.001.
- [7] Olusanmi Adeniran, Weilong Cong, Eric Bediako, and Sunday Peter Adu. “Environmental affected mechanical performance of additively manufactured carbon fiber–reinforced plastic composites”. In: *Journal of Composite Materials* 56.7 (2022), pp. 1139–1150. DOI: 10.1177/00219983211066548.
- [8] Xingshuang Peng, Miaomiao Zhang, Zhengchuan Guo, Lin Sang, and Wenbin Hou. “Investigation of processing parameters on tensile performance for FDM-printed carbon fiber reinforced polyamide 6 composites”. In: *Composites Communications* 22. September (2020), p. 100478. ISSN: 24522139. DOI: 10.1016/j.coco.2020.100478. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100478>.

- [9] Lin Sang, Chuo Wang, Yukai Wang, and Zhiyong Wei. “Thermo-oxidative ageing effect on mechanical properties and morphology of short fibre reinforced polyamide composites-comparison of carbon and glass fibres”. In: *RSC Advances* 7.69 (2017), pp. 43334–43344. ISSN: 20462069. DOI: 10.1039/c7ra07884f.
- [10] Lin Sang, Chuo Wang, Yingying Wang, and Wenbin Hou. “Effects of hydrothermal aging on moisture absorption and property prediction of short carbon fiber reinforced polyamide 6 composites”. In: *Composites Part B: Engineering* 153.April (2018), pp. 306–314. ISSN: 13598368. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.08.138. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.138>.
- [11] Fuda Ning, Weilong Cong, Yingbin Hu, and Hui Wang. “Additive manufacturing of carbon fiber-reinforced plastic composites using fused deposition modeling: Effects of process parameters on tensile properties”. In: *Journal of Composite Materials* 51.4 (2017), pp. 451–462. ISSN: 1530793X. DOI: 10.1177/0021998316646169.
- [12] Claire Benwood, Andrew Anstey, Jacek Andrzejewski, Manjusri Misra, and Amar K. Mohanty. “Improving the Impact Strength and Heat Resistance of 3D Printed Models: Structure, Property, and Processing Correlations during Fused Deposition Modeling (FDM) of Poly(Lactic Acid)”. In: *ACS Omega* 3.4 (2018), pp. 4400–4411. ISSN: 24701343. DOI: 10.1021/acsomega.8b00129.
- [13] K. G.Jaya Christiyana, U. Chandrasekhar, and K. Venkateswarlu. “A study on the influence of process parameters on the Mechanical Properties of 3D printed ABS composite”. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 114.1 (2016). ISSN: 1757899X. DOI: 10.1088/1757-899X/114/1/012109.
- [14] Ala’aldin Alafaghani, Muhammad Ali Ablat, Hossein Abedi, and Ala Qattawi. “Modeling the influence of fused filament fabrication processing parameters on the mechanical properties of ABS parts”. In: *Journal of Manufacturing Processes* 71.September (2021), pp. 711–723. ISSN: 15266125. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.09.057. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.09.057>.
- [15] Ahmed Elkaseer, Stella Schneider, and Steffen Scholz. “Experiment-Based Process Modeling and Optimization for High-Quality and Resource-Efficient FFF 3D Printing”. In: *Applied Sciences* (2020).
- [16] N. Vidakis, J. D. Kechagias, M. Petousis, F. Vakouftsi, and N. Mountakis. “The effects of FFF 3D printing parameters on energy consumption”. In: *Materials and Manufacturing Processes* 00.00 (2022), pp. 1–18. ISSN: 15322475. DOI: 10.1080/10426914.2022.2105882. URL: <https://doi.org/10.1080/10426914.2022.2105882>.

- [17] ISO/TC 61/SC 2 Mechanical behavior. “Plastics — Determination of tensile properties — Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics”. In: *ICS 83.080.01* 2 (2012), p. 11. URL: iso.org/standard/56046.html.
- [18] Vincenzo Lunetto, Paolo C Priarone, Manuela Galati, and Paolo Minetola. “On the correlation between process parameters and specific energy consumption in fused deposition modelling”. In: *Journal of Manufacturing Processes* 56.June (2020), pp. 1039–1049. ISSN: 1526-6125. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.06.002.
- [19] George Marsh. “Airbus A350 XWB update”. In: *Reinforced Plastics* 54.6 (2010), pp. 20–24. ISSN: 00343617. DOI: 10.1016/S0034-3617(10)70212-5. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-3617\(10\)70212-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-3617(10)70212-5).
- [20] Chensong Dong. “Effects of Process-Induced Voids on the Properties of Fibre Reinforced Composites”. In: *Journal of Materials Science and Technology* 32.7 (2016), pp. 597–604. ISSN: 10050302. DOI: 10.1016/j.jmst.2016.04.011. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmst.2016.04.011>.

CHAPITRE 6 ARTICLE 3 : FRAMEWORK TO ASSESS EFFECTS OF PROCESS PARAMETERS FOR FFF COMPOSITE PARTS REGARDING ENERGY CONSUMPTION, COST AND MECHANICAL PERFORMANCE

Thibault Le Gentil^{1,2}, Daniel Therriault², Olivier Kerbrat¹

¹ Civil and Mechanical Engineering Institute, CNRS GeM, Rennes University, Rennes, France

² Laboratory for Multiscale Mechanics (LM2), Department of Mechanical Engineering, 2500 chemin de Polytechnique, Montreal H3T 1J4, Canada

Submitted in Progress in Additive Manufacturing on October 20th, 2023

Abstract

The aerospace and automotive industries constantly search for materials with enhanced strength-to-weight ratios to reduce material usage. To create lightweight parts, both additive manufacturing (AM) and composite materials are increasingly used. To support adoption in such applications, it is crucial to characterize from economic, technical and energy to produce lightweight parts made by AM processes. As such, tests are carried out on standard specimen prior to the manufacturing of parts. This study reports the experimental investigations on the comparison of energy consumption, manufacturing cost and surface roughness between test specimen and real case study parts of same heights. Three sets of parameters are first identified from multi-objectives decision tools, then compared using fused filament fabrication of short carbon-fiber reinforced polyamide-6 (PA6-CF). It is concluded that energy and economic impacts can be transferred with consideration for scale, however, surface roughness is not conserved.

6.1 Introduction

Additive manufacturing (AM), commonly known as 3D printing, has grown rapidly in recent years, providing a disruptive transformation on how products are conceived and manufactured. Among the different processes, Fused Filament Fabrication (FFF) is the most widespread AM process for polymers and composite materials. The end of the last patent for FFF in 2009, renewed the interest and investment in AM technologies and FFF [1, 2]. Within the newfound developments, composite and carbon-fiber-reinforced-polymers (CFRP) materials have attracted many interests as the combination of geometrical freedom (from AM process) and reduced density (from CFRP) has found wide application notably, in transportation (au-

tomotive, aerospace, etc.) as it helps reduce fuel consumption [3]. With their layer-by-layer construction approach, AM technologies in general have revolutionized the notion of manufacturing. However, the literature has documented their high energy requirements, which are incompatible with the current policies of energy and carbon emission reduction [4].

Thanks to recent technological progress, many materials are now compatible to FFF process. Polyamide 6 (PA6) found many applications as being one of the most versatile semi-crystalline polymers which are heavily used in automobile industry as gear, manifold and front-end module [5] due to its superior mechanical properties compared to more widely used PLA or ABS materials [6]. Matrix by itself cannot satisfy the mechanical behavior expectations. The application of reinforcement, especially carbon fibers, has been regarded as an effective solution to the low strength and stiffness issue [7]. Table 6.1 presents some mechanical properties of virgin PA6 and PA6-CF for FFF filament and virgin material. The mechanical properties of PA6-CF filament and printability vary depending on the printing parameters.

Table 6.1 Compilation of available data on mechanical properties of virgin and FFF PA6 and PA6-CF. *Note : NA for Non Applicable.*

Material	Process	Filler	Mechanical properties					Source
			Tensile strength [MPa]	Young modulus [GPa]	Flexural strength [MPa]	Flexural modulus [GPa]	Tensile elongation at break [%]	
PA6	Pure	NA	79	3.3	100	2.9	130	[8]
			80	3.3			50	[9]
			56	2.1	65	2.0	4	[10]
	FFF		51	2.1	85	1.6	>50	[11]
			63	3.8	84	3.7	3	[12]
PA6-CF	FFF	<20%wt	74	5.5			2.9	[13]
		?						

From a manufacturing viewpoint, FFF printing parameters are a cornerstone between energy consumption and part quality (e.g., mechanical, physical, geometry accuracy). Therefore, it as drawn attention in various studies on the impact of those printing parameters on quality, cost and energy consumption. For FFF printing, Gao & al. [14] has reviewed interlayer bonding for polymer materials and concluded some general consideration. Firstly, they concluded that bond formation mechanism has not been well established. Hindering the manufacturing of high-performance polymer parts and globally leading to an empirical evaluation of printing parameters. Secondly, the inherent anisotropy of FFF parts is different for amorphous and semicrystalline polymers, due to different bond mechanisms. In both cases, the interlayer bond quality is a function of the bond time provided by the FFF process and printing parameters. From a mechanical performance perspective, Pei & al. [15] established that the

impact of the process parameter is the primary contributor to void generation, compared to materials microstructural properties such as fiber volume fraction, void volume fraction and fiber orientation. Additionally, FFF printed composite parts have poor reproducibility [16].

Nonetheless, many studies have evaluated the various impacts of printing parameters on mechanical performance, mainly tensile properties [17]. There are numerous printing criteria, but seven of them have received the most attention: layer height, deposition speed, nozzle temperature, heatbed temperature, infill percentage, infill patterns and deposition orientation. Layer height is viewed as the primary parameters on tensile performance, as increasing the layer height decreases tensile strength [18, 19, 20]. Similarly, deposition speed also negatively impact tensile performance. Ding & al. [21] reported the effect is even more significant for PLA-CF Y-construct specimen. Arjun & al. [22] described how as layer height and speed deposition increased it caused voids within the printed part and lead to poor interfacial bonding. High layer thickness also results in poor surface roughness, as Nagendra & al. [23] and Patil & al. [24] both found layer thickness was the greatest influence on surface roughness. However Wang & al. [19], in the case of high performance PEEK-CF, warned about low deposition speed as it can modify printing stability. Nozzle temperature tends to work well within a range of value. Li & al. [25] showed for PLA- and ABS- composites, that higher temperature leads to higher tensile strength but above a certain threshold it weakened the mechanical performances [20, 15, 14] or geometrical accuracy [14]. Krajangsawasdi & al. gathered printing temperature ranges for different composite materials from several studies. Appropriate temperature is roughly between glass-transition temperature and degradation temperature [26]. Yet, higher nozzle temperature within the range is preferable as it makes better melting fluidity and formability of printed materials [19].

The heating bed temperature is comparable to the nozzle temperature to the extent it has a range of suitable values, which is normally below the glass transition temperature. As for nozzle temperature, Krajangsawasdi & al. gathered bed temperature ranges for different composite materials from several studies [26]. Belei & al. [20] found that, alongside the layer height, bed temperature was the most influential parameter, as higher heatbed temperature improves the infiltration and diffusion among deposited filaments and interlayers [19]. Infill density and patterns are also two important parameters. Relative to mechanical performances, 100% is preferable [26, 27] as it can drastically change performances [28]. Both Sanei & al. [17] and Ali & al. [27] concluded triangular fill patterns exhibited the highest tensile strength. Also, for tensile specimen, a flat deposition along the fiber gives the highest tensile performances, especially for CFRP [29, 17]. Memarzadeh & al. [30] observed anisotropy was increased when CF is oriented along the printing direction, resulting in enhanced directional properties such as high strength.

Numerous cost models exist in the literature regarding the production cost in additive manufacturing [31, 4, 32, 33]. Six production cost categories can be identified: (1) Material (including supporting material); (2) electricity; (3) workforce; (4) pre- and post- process; (5) indirect cost (e.g., investment, maintenance); (6) consumables. With regard to printing parameters only material, electricity and consumables costs are variables, as printing parameters influence energy consumption and manufacturing time [34, 35]. Intuitively high nozzle temperature and bed temperature will rise energy consumption, while low deposition speed and layer thickness increase production time. Therefore, cost evaluation of printing parameters depends on the material and part geometry. Cost and energy consumption are two impacts often linked. Quarto & al. conducted two studies, first on cost production [36] and second on energy consumption [37] and concluded that production cost can be derived from a detailed estimation of energy consumption to compare with other machining solution. Elkaseer & al. [38] compared the impacts of infill density, layer thickness, speed deposition, nozzle temperature and orientation on energy consumption. Layer thickness and printing speed were found as main factors. Vidakis & al. [39] found similar results, with infill density also playing an important role. Overall, Kechagias & al. [40] analyzed the effects of the materials (polymer), consumables, energy and waste produced on sustainability. Energy consumption being the most impactful of them all. However, Lunetto & al. have highlighted the high embodied energy of carbon-fiber and composite materials. Furthermore, no data are available for AM [41].

Few studies have considered multiple objectives in FFF process. Mohamed & al. [42] used regression model using surface response to evaluate the relationship between printing parameters, mechanical performances and build cost on a homemade test specimen. Both Vidakis & al. [39] and Camposeco-Negrete [43] used Taguchi methodology to reduce the number of experiments, coupled with an ANOVA assistance to process data, on tensile test specimens. On one hand, Vidakis & al. linked energy consumption and tensile properties, on the other hand, Camposeco-Negrete studied part geometry accuracy and energy consumption. They both found a meaningful reduction in energy consumption is possible without a significant drop-off in mechanical performances. Alizadeh & al. [44] proposes a data-driven systematic approach to model and optimize the energy consumption and geometric accuracy jointly on a circle-diamond-square benchmark part. An integrated NSGA-II (Nondominated Sorting Genetic Algorithm II) and TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) framework is presented to find optimized solutions. Camposeco-Negrete & al. [45] linked dimensional deviation, processing time, mass and ultimate tensile strength to find optimize solutions, for a tensile test specimen, using different weighting between responses. Bianchi & al. [46] performed a life cycle assessment, tensile test and flexural test on carbon-

fiber polyamide (PA). Evaluating the impact of several printing parameters in regard to those indicators. Although no multi-objective decision tools is provided or used, they have concluded the strains acting on the fiber-reinforced composite material have a significant impact on the choice for the most environmentally friendly material. When 3D printed components must sustain tensile pressures, PA-CF is more environmentally friendly than PA-GF; nevertheless, if 3D printed components must withstand flexural stresses, then PA-GF is a better solution.

To the best of the author's knowledge no methodology, easy-to-use and tested on complex part, combining assessment on energy consumption, cost and mechanical performance exist in the literature. Such methodology could reveal possible parameters combinations for optimization. Furthermore, the intrinsic anisotropy of FFF process brings the question of how measurement on standard test specimens might be applied to more complex geometry.

6.2 Material and methods

6.2.1 Methodology

Table 6.2 Sets of parameters extracted from previous work [34]

Optimization	Balanced	Energy-saving	Mechanical performance
Bed heating strategy [%]	100	0	100
Bed temperature [°C]	90	80	90
Nozzle temperature [°C]	260	270	270
Layer thickness [mm]	0.3	0.3	0.2
Deposition speed [mm/s]	75	85	80

Table 6.3 Printing parameters held constant throughout the experiment.

Parameter	Value	Unit
Outline shell	1	-
Nozzle diameter	0.4	mm
Deposition orientation	+/-45	°
Top solid layers	0	-
Bottom solid layers	0	-
Extrusion multiplier	0.85	%

A 2-step methodology is proposed to combine mechanical performance, production cost and energy consumption for FFF printing of CFRP parts, as presented on figure 6.1. The first step, consist in characterizing the printer/material couple. A design of experiment is used to

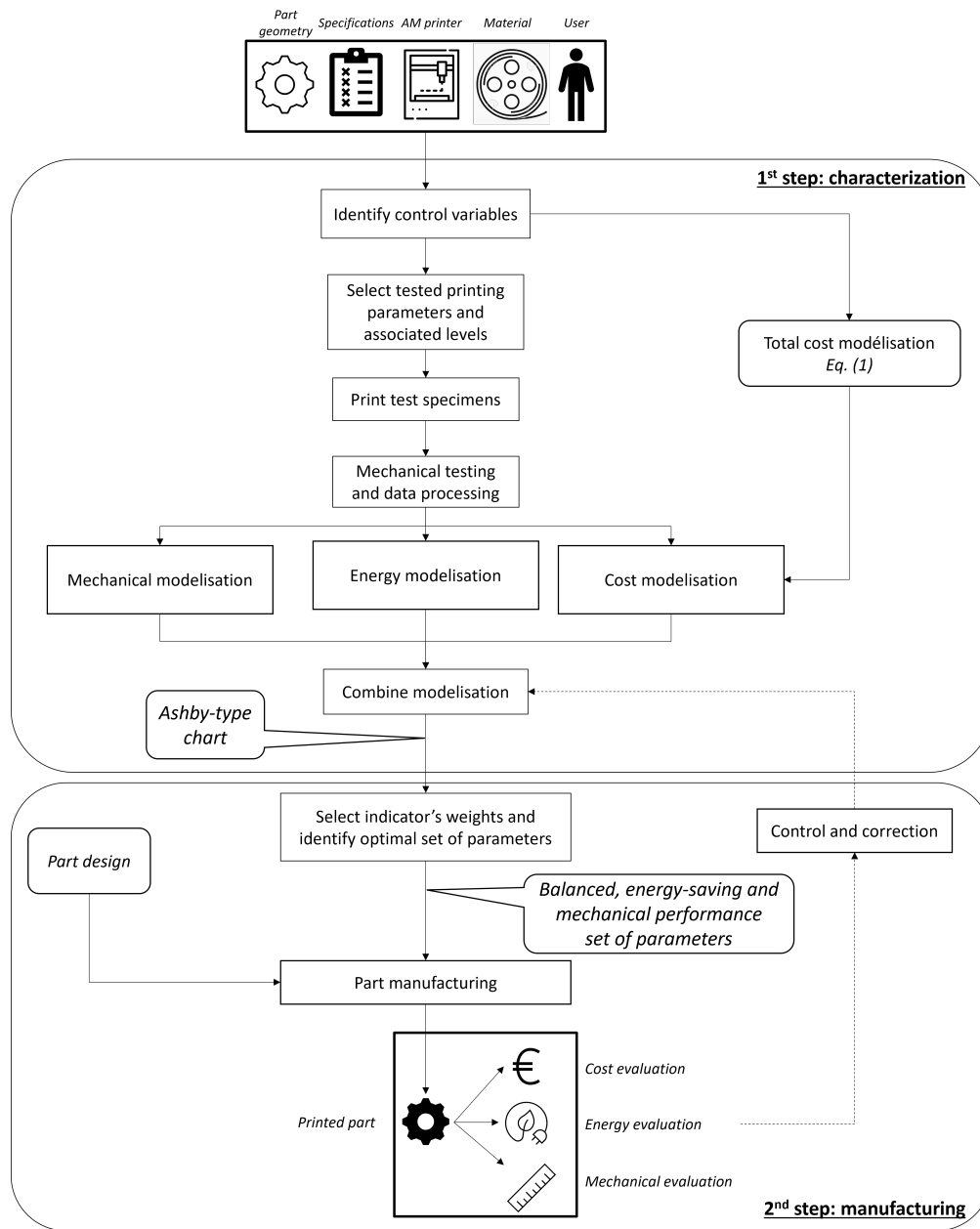


Figure 6.1 Graphical summary of the two-step methodology. Details on the first step can be found on prior work [34].

assess the impact of the desired printing parameters, on standard test specimens. Results are then used as input on a multi-objective optimization tool. This tool consists of three types of graphs : impact per parameter, ranking sets of parameters and a graph, based on an Ashby plot, combine each information then extract the most appropriate set of parameters. The second step manufacture the desired part using the optimized set of parameters. A test is then performed on the final part to control the coherence with the first step model, regarding

mechanical, cost and energy performances. Based on output results (namely mechanical optimization, energy-saving and balanced) from prior work on the first step [34], only the second step is presented in this paper. The three sets of parameters are detailed on Table 6.2, and parameters held constant throughout the experiment on Table 6.3.

Table 6.4 Nomenclature of the different variables with associated definitions and unit.

Variables	Definitions [Unit]	Variables	Definitions [Unit]
C_{tot}	Total cost [€]	C_{man}	Cost for manufacturing scope [€]
C_{mat}	Base material part cost [€/kg]	C_{sup}	Support cost [€/kg]
M_{mat}	Base material part mass [kg]	M_{sup}	Support mass [kg]
C_{elec}	Base electricity cost [€/Whr]	t_p	Preparation time [hr]
P_p	Preparation power [W]	t_f	Fabrication time [hr]
P_f	Fabrication power [W]	$C_{\text{op,hard}}$	Hardware operator cost [€/hr]
$C_{\text{op,soft}}$	Software operator cost [€/hr]	t_{post}	Post-process time [hr]
t_{soft}	Software (slicing and CAD) time [hr]	C_m	Machine cost [€]
M	Maintenance cost [€]	α	Machine lifetime [hr]
t_{hr}	Annual working hours [hr]	β	Percentage of use time [%]
N	Total number of consumables	C_{cons}	Consumables cost [€]
t_{cons}	Use time of consumables [hr]	T_{cons}	Consumables lifetime [hr]

6.2.2 Case study

The component of the case study is a workholding gear that was modeled using an actual industrial example from Markforged and Dana Incorporated [48]. The critical factor in this case is the surface roughness of the gear tooth. The optimal sets of parameters from the first step remain applicable in the current study, even though the first stage focused on the tensile properties of a tensile test specimen. Strong tensile properties are always beneficial, and reasonably, one may expect that on more complex geometries, the relative strength between each set of parameters is conserved. In order to reduce time and cost, our methodology proposes to print only the functional surface (e.g., a teeth). The hypothesis is that results

Table 6.5 Cost parameters held constant throughout the experiment. *Note : prices were converted into Euros according to the exchange rate on August 28 2023.*

Category	Variables	Value	Source
Material	C_{mat}	66.78 EUR/kg	Supplier
Electricity	C_{elec}	0.0007 EUR/kWh	Mean from public data [47]
Consumables	T_{cons}	1 year	Estimation from experience
	Printhead cost	45.95 EUR	Supplier
	Heatbed cost	55.18 EUR	Supplier
	Hot end cost	73.57 EUR	Supplier
	Fan cost	13.87 EUR	Supplier
Workforce	$C_{\text{op,hard}}$	10.39 EUR/h	Minimum wage in Quebec
	$C_{\text{op,soft}}$	12.99 EUR/h	Minimum wage in Quebec+25%
Indirect	C_m	3678.15 EUR	Supplier
	α	8 years	Estimation
	t_{hr}	2410 h	Estimation
	β	0.5%	Estimation

from a fraction of the total part provide an accurate representation of the total gear's final measurement. In order to verify this assumption, both the fraction and the entire gear will be produced. Geometry of the full workholding gear and the reduced two-teeth is presented on Figure 6.2. The two-teeth portion makes up 6 % of the workholding part's volume and the two parts are of equal height.

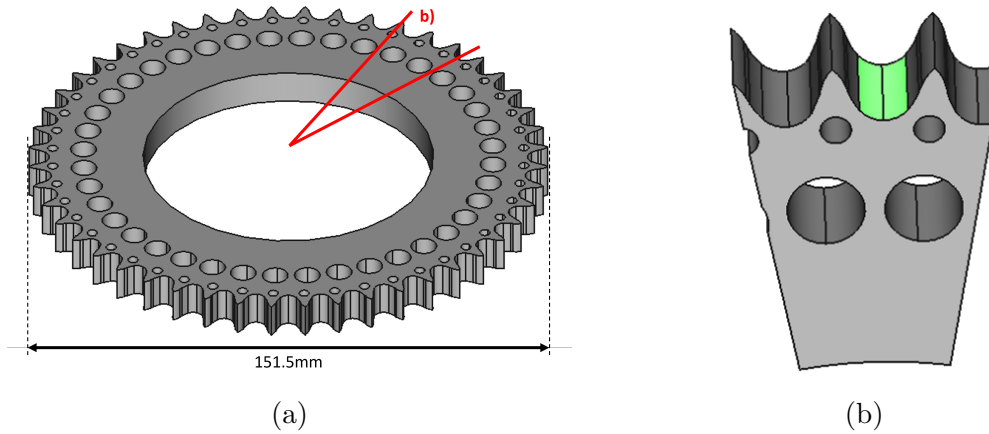


Figure 6.2 Geometry of the case study, dimension are based on reference ISO606 06B: chain pitch is 9.52 mm; cylinder diameter is 5.72mm; thickness is 5.20 mm and 48 tooth. (a) Workholding gear; (b) Two-teeth part, surface in green correspond to the measured surface.

6.2.3 Materials and testing

The materials involved in this investigation is CarbonX™ Nylon 6 + CF GEN 3 (< 20 %wt) filament from 3DXTech, on a Raise 3D Pro2 FFF printer. To regulate humidity, filament was kept in a vacuum oven, as Ferrel & al. [49] showed it can prevent moisture in the filament. Energy consumption was recorded using a HOBO Plug Load Data Logger UX120-018. A roughness tester Mitutoyo SJ-210 was used to measure surface roughness, following ISO 4287:1997. Cost evaluation is based on the evaluation of material, electricity, workforce, pre- and post-process, indirect cost and consumables, with the following equation (see variables definitions in Table 6.4 and associated cost for constant parameters are defined in Table 6.5):

$$C_{\text{tot}} = C_{\text{part}} \times M_{\text{part}} + C_{\text{sup}} \times M_{\text{sup}} + C_{\text{elec}} \times (P_p \times t_p + P_f \times t_f) + C_{\text{op,hard}} \times (t_f + t_{\text{post}}) + C_{\text{op,soft}} \times t_{\text{soft}} + \frac{C_{\text{soft}}}{t_{\text{soft}}} + \frac{\frac{C_m}{\alpha} + M}{t_{\text{hr}} \times \beta} \times \frac{1}{t_f + t_p} + \sum_1^N C_{\text{cons}} \frac{t_{\text{cons}}}{T_{\text{cons}}} \quad (6.1)$$

Estimates from the equation will be assessed against quotes from a companies to determine their relative relevance: Fablab Inc. (Canada).

6.3 Results

6.3.1 Energy consumption and cost

Table 6.6 depicts measured mean power for produced parts compared to the model and total cost evaluated from the equation 6.1. Given the fact that both sets of parameters for mechanical performance and energy-saving optimizations are within the uncertainty, the energy consumption closely matches the predicted mean power. On the other hand, while the order of magnitude is conserved (< 5 % error), energy usage for balanced performance is slightly outside the uncertainty threshold. The Specific Printing Energy (SPE) model was used to characterize the energy efficiency in material deposition. SPE is the ratio between energy consumption during printing (without the heating phase) and printed mass. The results indicate that SPE is appropriate when comparing energy consumption for parts of varying size, mass, and printing time as the three sets of parameters exhibit similar values for both parts.

As stated in the introduction, cost and energy are closely linked. Indeed, mechanical optimization is both the most expensive of the three sets of parameters and the most consuming. Inversely, energy-saving is the cheapest and the least energy consuming.

The quote from Fablab Inc., with a layer thickness of 0.254 mm results in a cost of 71.28 EUR

Table 6.6 Comparison between predicted and measured mean power, mass, SPE and total cost. *Note: mean power correspond to the mean power between two-teeth parts and workholding parts.*

Indicator	Balanced	Energy-saving	Mechanical performance
Predicted mean power [W]	312.2 ± 12.5	123.3 ± 3.6	314.9 ± 8.2
Measured mean power [W]	296.9	123.1	307.7
Mass [g]			
(two-teeth/workholding)	4.7 / 91.3	4.6 / 90.8	5.1 / 91.2
SPE [Wh/g]			
(two-teeth/workholding)	31.0 / 30.3	12.5 / 10.4	37.8 / 32.7
Total cost [EUR]			
(two teeth part/workholding)	3.82/14.43	3.60/12.44	4.27/14.62

(104.60 CAD), compared to 12.44 to 14.62 EUR given by the equation 2.1. The ratio of 4-5 between the quote and the equation can partially be explained by the company margin, transportation cost (not included in the equation) and wage disparity between the equation's assumption and actual wage.

6.3.2 Surface roughness

Table 6.7 present maximum and mean surface roughness for each part. An increase in mean surface roughness is observed between the full workholding parts and the two teeth parts: $+6.0\mu m$ (+33 %) for the balanced set of parameter, $+4.8\mu m$ (20 %) in the energy-saving case, and $+4.4\mu m$ (22 %) for mechanical performance. Gears are classified, according to ISO 1328, upon their maximum surface roughness. In this classification, balanced and mechanical performance workholdings would be of class 11 (maximum surface roughness $< 25 \mu m$) and energy-saving workholding would be of class 12. However, every two-teeth parts are of class 12.

Additionally, layer thickness was defined as the most impactful parameter on surface roughness. Likewise, balanced and energy-saving optimization share the same layer thickness and produce similar surface roughness. The mechanical performance set of parameters present lower surface roughness, as the layer thickness is lower.

6.4 Discussion

In this study, a multi-objective and customizable tool to meet the needs of the user is presented to assist FFF printing. A design of experiment is performed to characterize the material and the printer jointly. Energy consumption is simply measured during the DoE, while

Table 6.7 Maximum and mean surface roughness comparison between two teeth parts and workholding parts, for the three sets of parameters.

Set of parameter	Two teeth part		Workholding gear	
	Ra max [μm]	Ra mean [μm]	Ra max [μm]	Ra mean [μm]
Balanced	26.79	23.78	21.67	17.73
Energy-saving	25.37	23.68	21.16	18.91
Mechanical performance	25.20	19.43	16.32	15.05

cost can be derived from cost equation. Regarding mechanical assessment, the anisotropic nature of FFF printing, even more for composite part, makes standard mechanical testing limited. The transposition from measurement on the test specimen to more complex geometry is uncertain and inconsistent, especially for the case of tensile testing [50]. Results can only give relative comparison between sets of printing parameters. Similarly, the findings of this investigation also demonstrate that the surface roughness of a part is not conserved for a smaller portion of the same part. Indicating that in FFF process, the scale and size of produced part affect the surface roughness. The variation appears to be related to the FFF process itself as the printing parameters, height, material, and printer are all the same. To corroborate this finding and determine the cause, more research is needed. This finding does not apply to energy consumption, as measurements are similar between tensile test specimen, the workholding gear and the two-teeth part.

6.5 Conclusion

A two-step methodology framework is presented to evaluate the impact of printing parameters on energy consumption, manufacturing cost and surface roughness on real case parts. This multi-objective tool helps discriminating sets of parameters depending on the need and goal of the user. The framework is made to be simple and easily adaptable to the user context, such as a different printer, a different material, a different part, a different mechanical test and/or different parameters. This work illustrated how a first characterization step might be applied to a second step of printing a part with a more complex geometry. However, each indicator response differently. Firstly, energy consumption assessment is well conserved between the first and the second step. Secondly, several cost equations exist with each one having his own advantages, depending on the user needs. Thirdly, mechanical characterization remains a challenging assessment to perform. The transposition between standardized specimen or small sample is hardly applicable on complex geometry. More specifically on surface roughness, different results are found between a certain volume compared to the same volume within a part.

References

- [1] Mohsen Attaran. “The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing”. In: *Business Horizons* 60.5 (2017), pp. 677–688. ISSN: 00076813. DOI: 10.1016/j.bushor.2017.05.011. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>.
- [2] Bastian Brenken, Eduardo Barocio, Anthony Favaloro, Vlastimil Kunc, and R. Byron Pipes. “Fused filament fabrication of fiber-reinforced polymers: A review”. In: *Additive Manufacturing* 21.February (2018), pp. 1–16. ISSN: 22148604. DOI: 10.1016/j.addma.2018.01.002. URL: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.01.002>.
- [3] Guo Dong Goh, Yee Ling Yap, Shweta Agarwala, and Wai Yee Yeong. “Recent Progress in Additive Manufacturing of Fiber Reinforced Polymer Composite”. In: *Advanced Materials Technologies* 4.1 (2019), pp. 1–22. ISSN: 2365709X. DOI: 10.1002/admt.201800271.
- [4] Vincenzo Lunetto, Paolo C. Priarone, Sami Kara, and Luca Settineri. “A comparative LCA method for environmentally friendly manufacturing: Additive manufacturing versus Machining case”. In: *Procedia CIRP* 98 (2021), pp. 406–411. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2021.01.125. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.125>.
- [5] Xingshuang Peng, Miaomiao Zhang, Zhengchuan Guo, Lin Sang, and Wenbin Hou. “Investigation of processing parameters on tensile performance for FDM-printed carbon fiber reinforced polyamide 6 composites”. In: *Composites Communications* 22.September (2020), p. 100478. ISSN: 24522139. DOI: 10.1016/j.coco.2020.100478. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100478>.
- [6] Elena Verdejo de Toro, Juana Coello Sobrino, Alberto Martínez Martínez, Valentín Miguel Eguía, and Jorge Ayllón Pérez. “Investigation of a short carbon fibre-reinforced polyamide and comparison of two manufacturing processes: Fused Deposition Modelling (FDM) and polymer injection moulding (PIM)”. In: *Materials* 13.3 (2020). ISSN: 19961944. DOI: 10.3390/ma13030672.
- [7] Michael Chapiro. “Current achievements and future outlook for composites in 3D printing”. In: *Reinforced Plastics* 60.6 (2016), pp. 372–375. ISSN: 00343617. DOI: 10.1016/j.repl.2016.10.002. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.repl.2016.10.002>.
- [8] Ensinger. *PA 6 - TECAMID 6 natural*. 2023. URL: <https://www.ensingerplastics.com/en/shapes/pa6-tecamid-6-natural>.

- [9] Mitsubishi Chemical Group. *Ertalon® 6 SA PA6 - Chemical resistant nylon 6 / MCG*. 2023. URL: <https://www.mcam.com/en/products/shapes/engineering/nylatron-ertalon/ertalon-6-sa-pa6>.
- [10] *Filament PA6-CO pour imprimante 3D / Kimya®*. URL: <https://www.kimya.fr/fr/produit/kimya-pa6-co/>.
- [11] Filament2Print. *PA6*. 2023. URL: <https://filament2print.com/gb/nylon-pa/1812-pa6-nanovia.html>.
- [12] *PA6+CF Carbon Fiber Nylon 3D Filament by 3DXTECH*. URL: <https://www.3dxtch.com/product/carbonx-pa6-cf/>.
- [13] Nanovia. *Nanovia PA-6 CF : Carbon fiber reinforced*. 2023. URL: <https://nanovia.tech/en/ref/nanovia-pa-6-cf/>.
- [14] Xia Gao, Shunxin Qi, Xiao Kuang, Yunlan Su, Jing Li, and Dujin Wang. “Fused filament fabrication of polymer materials: A review of interlayer bond”. In: *Additive Manufacturing* 37.2 (2021), p. 101658. ISSN: 22148604. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101658. URL: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101658>.
- [15] Shenli Pei, Kaifeng Wang, Cheng Bang Chen, Jingjing Li, Yang Li, Danielle Zeng, Xuming Su, and Hui Yang. “Process-structure-property analysis of short carbon fiber reinforced polymer composite via fused filament fabrication”. In: *Journal of Manufacturing Processes* 64.November 2020 (2021), pp. 544–556. ISSN: 15266125. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.02.019. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.02.019>.
- [16] M. S. Irfan, S. Patel, R. Umer, M. A. Ali, and Y. Dong. “Thermal and morphological analysis of various 3D printed composite honeycomb cores”. In: *Composite Structures* 290.March (2022), p. 115517. ISSN: 02638223. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.115517. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115517>.
- [17] Seyed Hamid Reza Sanei and Diana Popescu. “3d-printed carbon fiber reinforced polymer composites: A systematic review”. In: *Journal of Composites Science* 4.3 (2020). ISSN: 2504477X. DOI: 10.3390/jcs4030098.
- [18] Kaushal Sharma and Raghavan Jayaraman. “Effect of FDM Printing Parameters on the Properties of Carbon Fiber Reinforced PET-G Composite”. In: *Proceeding of the Canadian Society for Mechanical Engineering Internation Congress* (2020). DOI: 10.32393/csme.2020.1285.

- [19] Peng WANG, Bin ZOU, Shouling DING, Lei LI, and Chuanzhen HUANG. “Effects of FDM-3D printing parameters on mechanical properties and microstructure of CF/PEEK and GF/PEEK”. In: *Chinese Journal of Aeronautics* 34.9 (2021), pp. 236–246. ISSN: 10009361. DOI: 10.1016/j.cja.2020.05.040. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.05.040>.
- [20] Carlos Belei, Jana Joeressen, and Sergio T. Amancio-Filho. “Fused-Filament Fabrication of Short Carbon Fiber-Reinforced Polyamide: Parameter Optimization for Improved Performance under Uniaxial Tensile Loading”. In: *Polymers* 14.7 (2022). ISSN: 20734360. DOI: 10.3390/polym14071292.
- [21] Qingjun Ding, Xinyu Li, Denghui Zhang, Gai Zhao, and Zhijun Sun. “Anisotropy of poly(lactic acid)/carbon fiber composites prepared by fused deposition modeling”. In: *Journal of Applied Polymer Science* 137.23 (2020), pp. 1–11. ISSN: 10974628. DOI: 10.1002/app.48786.
- [22] P. Arjun, V. K. Bidhun, U. K. Lenin, V. P. Amritha, Ribin Varghese Pazhamannil, and P. Govindan. “Effects of process parameters and annealing on the tensile strength of 3D printed carbon fiber reinforced polylactic acid”. In: *Materials Today: Proceedings* 62.P14 (2022), pp. 7379–7384. ISSN: 22147853. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.02.142. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.142>.
- [23] J. Nagendra, M. K. Srinath, S. Sujeeth, K. S. Naresh, and M. S. Ganesha Prasad. “Optimization of process parameters and evaluation of surface roughness for 3D printed nylon-aramid composite”. In: *Materials Today: Proceedings* 44 (2021), pp. 674–682. ISSN: 22147853. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.609. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.609>.
- [24] Pooja Patil, Dharmendra Singh, Sunil J. Raykar, and Jaiprakash Bhamu. “Multi-objective optimization of process parameters of Fused Deposition Modeling (FDM) for printing Polylactic Acid (PLA) polymer components”. In: *Materials Today: Proceedings* 45 (2021), pp. 4880–4885. ISSN: 22147853. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.01.353. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.353>.
- [25] Jiahui Li, Yvonne Durandet, Xiaodong Huang, Guangyong Sun, and Dong Ruan. “Additively manufactured fiber-reinforced composites: A review of mechanical behavior and opportunities”. In: *Journal of Materials Science and Technology* 119 (2022), pp. 219–244. ISSN: 10050302. DOI: 10.1016/j.jmst.2021.11.063. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.11.063>.

- [26] Narongkorn Krajangsawasdi, Lourens G. Blok, Ian Hamerton, Marco L. Longana, Benjamin K.S. Woods, and Dmitry S. Ivanov. “Fused deposition modelling of fibre reinforced polymer composites: A parametric review”. In: *Journal of Composites Science* 5.1 (2021). ISSN: 2504477X. DOI: 10.3390/jcs5010029.
- [27] Zeeshan Ali, Yuekai Yan, Hui Mei, Laifei Cheng, and Litong Zhang. “Effect of infill density, build direction and heat treatment on the tensile mechanical properties of 3D-printed carbon-fiber nylon composites”. In: *Composite Structures* 304.P1 (2023), p. 116370. ISSN: 02638223. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.116370. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116370>.
- [28] Elena Verdejo De Toro, Juana Coello Sobrino, Alberto Mat3n3ez Mart3n3ez, and Valent3n Miguel Egu3a. “Analysis of the influence of the variables of the fused deposition modeling (FDM) process on the mechanical properties of a carbon fiber-reinforced polyamide”. In: *Procedia Manufacturing* 41 (2019), pp. 731–738. ISSN: 23519789. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.09.064. URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.09.064>.
- [29] Tom Fisher, Jos3 Humberto S. Almeida, Brian G. Falzon, and Zafer Kazanc3. “Tension and Compression Properties of 3D-Printed Composites: Print Orientation and Strain Rate Effects”. In: *Polymers* 15.7 (2023). ISSN: 20734360. DOI: 10.3390/polym15071708.
- [30] Amin Memarzadeh, Babak Safaei, Asli Tabak, Saeid Sahmani, and Cafer Kizilors. “Advancements in additive manufacturing of polymer matrix composites: A systematic review of techniques and properties”. In: *Materials Today Communications* 36.May (2023), p. 106449. ISSN: 23524928. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.106449. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106449>.
- [31] Aini Zuhra Abdul Kadir, Yusri Yusof, and Md Saidin Wahab. “Additive manufacturing cost estimation models—a classification review”. In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 107.9-10 (2020), pp. 4033–4053. ISSN: 14333015. DOI: 10.1007/s00170-020-05262-5.
- [32] R. J. Urbanic and S. M. Saqib. “A manufacturing cost analysis framework to evaluate machining and fused filament fabrication additive manufacturing approaches”. In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 102.9-12 (2019), pp. 3091–3108. ISSN: 14333015. DOI: 10.1007/s00170-019-03394-x.
- [33] Paul Alexander, Seth Allen, and Debasish Dutta. “Part orientation and build cost determination in layered manufacturing”. In: *CAD Computer Aided Design* 30.5 (1998), pp. 343–356. ISSN: 00104485. DOI: 10.1016/S0010-4485(97)00083-3.

- [34] Thibault Le Gentil, Daniel Therriault, and Olivier Kerbrat. “A comprehensive methodology to support decision-making for additive manufacturing of short carbon-fiber reinforced polyamide 12 from energy, cost and mechanical perspectives”. In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 0123456789 (2023). ISSN: 14333015. DOI: 10.1007/s00170-023-11161-2. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11161-2>.
- [35] Vincenzo Tagliaferri, Federica Trovalusci, Stefano Guarino, and Simone Venettacci. “Environmental and economic analysis of FDM, SLS and MJF additive manufacturing technologies”. In: *Materials* 12.24 (2019). ISSN: 19961944. DOI: 10.3390/ma1224161.
- [36] Mariangela Quarto and Claudio Giardini. “Additive manufacturing of metal filament: when it can replace metal injection moulding”. In: *Progress in Additive Manufacturing* 8.3 (2023), pp. 561–570. ISSN: 23639520. DOI: 10.1007/s40964-022-00348-w. URL: <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00348-w>.
- [37] Mariangela Quarto and Claudio Giardini. “Additive manufacturing of metal filament: when it can replace metal injection moulding”. In: *Progress in Additive Manufacturing* 8.3 (2023), pp. 561–570. ISSN: 23639520. DOI: 10.1007/s40964-022-00348-w. URL: <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00348-w>.
- [38] Ahmed Elkaseer, Stella Schneider, and Steffen Scholz. “Experiment-Based Process Modeling and Optimization for High-Quality and Resource-Efficient FFF 3D Printing”. In: *Applied Sciences* (2020).
- [39] N. Vidakis, J. D. Kechagias, M. Petousis, F. Vakouftsi, and N. Mountakis. “The effects of FFF 3D printing parameters on energy consumption”. In: *Materials and Manufacturing Processes* 00.00 (2022), pp. 1–18. ISSN: 15322475. DOI: 10.1080/10426914.2022.2105882. URL: <https://doi.org/10.1080/10426914.2022.2105882>.
- [40] John Kechagias and Dimitrios Chaidas. “Fused filament fabrication parameter adjustments for sustainable 3D printing”. In: *Materials and Manufacturing Processes* 38.8 (2023), pp. 933–940. ISSN: 15322475. DOI: 10.1080/10426914.2023.2176872. URL: <https://doi.org/10.1080/10426914.2023.2176872>.
- [41] Vincenzo Lunetto, Manuela Galati, Luca Settineri, and Luca Iuliano. “Sustainability in the manufacturing of composite materials: A literature review and directions for future research”. In: *Journal of Manufacturing Processes* 85.December 2022 (2023), pp. 858–874. ISSN: 15266125. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.12.020. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.12.020>.

- [42] Omar A. Mohamed, Syed H. Masood, and Jahar L. Bhowmik. “Experimental Investigation and Optimization of FDM Process Parameters for Build Cost and Mechanical Properties Using I-Optimal Design”. In: *Encyclopedia of Smart Materials* 1.December 2020 (2021), pp. 368–385. DOI: 10.1016/B978-0-12-815732-9.00078-4. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-815732-9.00078-4>.
- [43] Carmita Camposeco-Negrete. “Optimization of printing parameters in fused deposition modeling for improving part quality and process sustainability”. In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 108.7-8 (2020), pp. 2131–2147. ISSN: 14333015. DOI: 10.1007/s00170-020-05555-9.
- [44] Morteza Alizadeh, Mehrnaz Noroozi Esfahani, Wenmeng Tian, and Junfeng Ma. “Data-Driven Energy Efficiency and Part Geometric Accuracy Modeling and Optimization of Green Fused Filament Fabrication Processes”. In: *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME* 142.4 (2020), pp. 1–9. ISSN: 10500472. DOI: 10.1115/1.4044596.
- [45] Carmita Camposeco-Negrete, Julio Varela-Soriano, and José Jorge Rojas-Carreón. “The effects of printing parameters on quality, strength, mass, and processing time of polylactic acid specimens produced by additive manufacturing”. In: *Progress in Additive Manufacturing* 6.4 (2021), pp. 821–840. ISSN: 23639520. DOI: 10.1007/s40964-021-00198-y. URL: <https://doi.org/10.1007/s40964-021-00198-y>.
- [46] Iacopo Bianchi, Archimede Forcellese, Tommaso Mancia, Michela Simoncini, and Alessio Vita. “Process parameters effect on environmental sustainability of composites FFF technology”. In: *Materials and Manufacturing Processes* 37.5 (2022), pp. 591–601. ISSN: 15322475. DOI: 10.1080/10426914.2022.2049300. URL: <https://doi.org/10.1080/10426914.2022.2049300>.
- [47] Ministère de l’Énergie et des Ressources naturelles du Québec. *Prix de l’électricité*. 2018. URL: <https://mern.gouv.qc.ca/energie/statistiques-energetiques/prix-electricite/>.
- [48] Markforged. *Dana Incorporated Gears Application*. URL: <https://markforged.com/fr/resources/application-spotlights/dana-incorporated-gears>.
- [49] William H. Ferrell, Corey M. Arndt, and Stephanie TerMaath. “Tensile strength dependence of FFF fiber reinforced ABS on environmental conditioning”. In: *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 28.20 (2021), pp. 2163–2176. ISSN: 15376532. DOI: 10.1080/15376494.2020.1722870. URL: <https://doi.org/10.1080/15376494.2020.1722870>.

- [50] Clara Phillips, Mark Kortschot, and Fae Azhari. “Towards standardizing the preparation of test specimens made with material extrusion: Review of current techniques for tensile testing”. In: *Additive Manufacturing* 58.March (2022), p. 103050. ISSN: 22148604. DOI: 10.1016/j.addma.2022.103050. URL: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103050>.

CHAPITRE 7 DISCUSSION GÉNÉRALE

Le développement de plus en plus répandu et l'utilisation de la FA composite dans différents secteurs industriels doivent pouvoir se réaliser tout en garantissant la viabilité technique, économique et énergétique. De ce fait, les travaux ici présentés ont pour objectifs de caractériser le couple machine/matière ainsi que d'accompagner les prises de décision pour les différents acteurs de la fabrication, avec comme cas d'application la fabrication FFF de PA6-CF et PA12-CF. La Figure 7.1 présente un schéma récapitulant la méthodologie développée durant ces travaux.

Lors d'une première prise en main d'un procédé de FA ou d'une machine par un nouvel acteur, le chapitre 4 présente une méthodologie permettant d'identifier les variables contrôlables par l'utilisateur (palier **A**). Pour cela, il est tout d'abord nécessaire d'identifier les leviers qui sont contrôlables par l'utilisateur. Ces leviers dépendent de la géométrie de la pièce souhaitée et de son cahier de charges, des outils à disposition (machine de FA) et de la matière choisie (étape **A.1**). En parallèle, l'utilisateur pourra décomposer le procédé en différentes phases, cela permettra de mieux décrire les mécanismes en place et les flux intervenants de la phase d'extraction de la matière jusqu'à la fabrication de la pièce en détaillant les flux énergétiques, de matière et de consommables intervenants aux cours de son cycle de vie (étape **A.2**), comme présenté lors de la section 4.3.1. Grâce à cela, l'utilisateur pourra alors identifier les variables impactantes sur les différents aspects du procédé (étape **A.3**). Par exemple, du point de vue énergétique, le profil de puissance typique d'une fabrication FFF est dressé afin d'identifier les principales sources de consommation (chauffe des éléments et durée de fabrication) et les différentes phases de la machine : la phase de préparation (mise en veille, lancement des fichiers, chauffe des éléments chauffants, retour à 0) et la phase de fabrication (calibration et déposition de la matière). Ce profil de puissance identifie la durée de fabrication et la puissance moyenne comme, en partie fixées par la phase de préparation de la machine, et en partie variables sur la phase de fabrication. Du point de vue technique, la nécessité ou non d'un post-process aurait un impact fort sur la suite du procédé. Enfin, du point de vue économique, la décomposition en phase permet à un responsable de fabrication additive de mettre en avant les termes d'une équation de coût total, prenant en compte la matière, l'énergie, la main d'œuvre, le pre/post-process, les coûts indirects et de consommables (étape **A.4**). Par la suite, en combinant les étapes **A.1** et **A.3**, il sera alors possible de traduire en variables contrôlables, en l'occurrence les paramètres de fabrication (étape **A.5**).

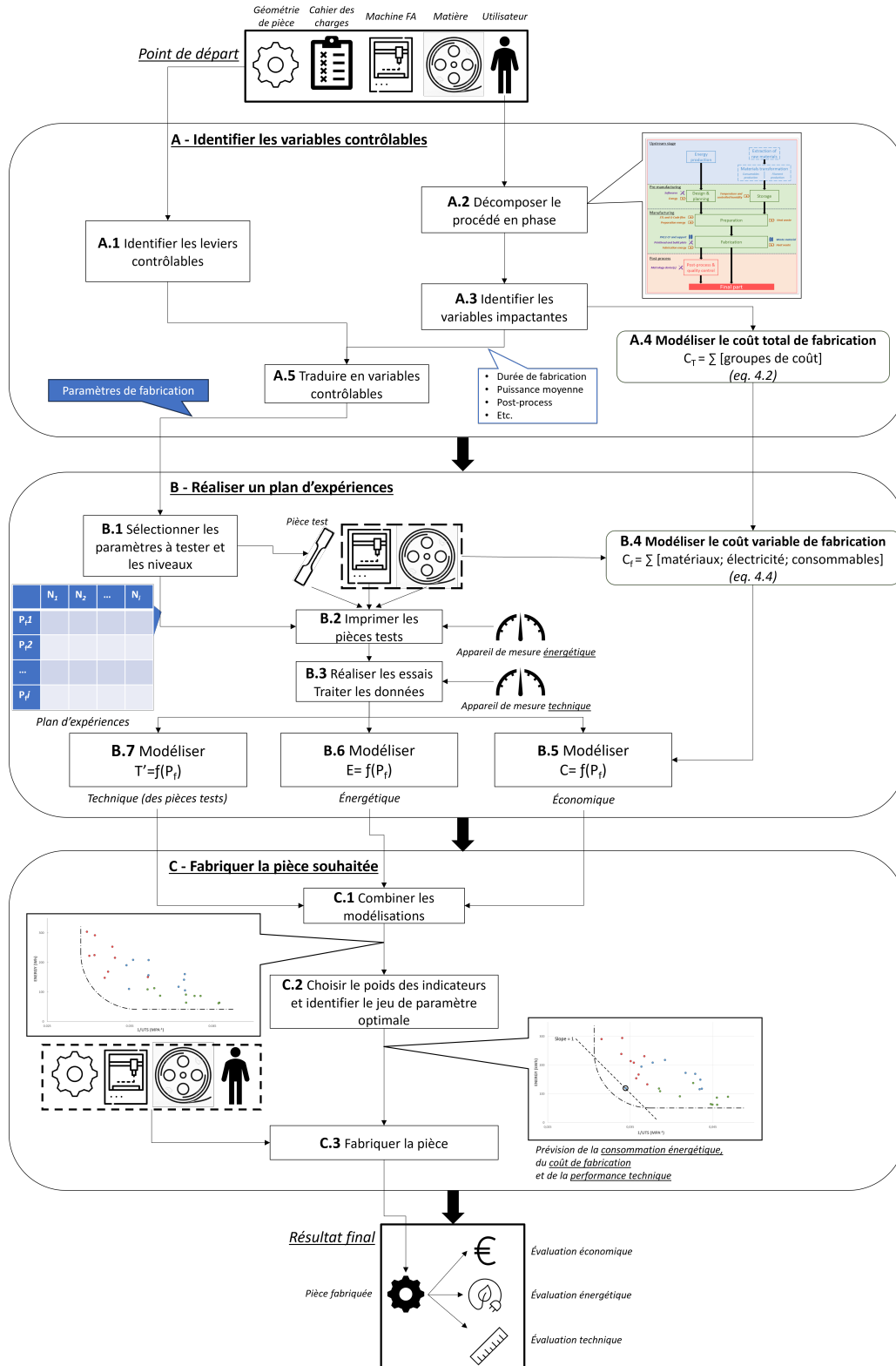


Figure 7.1 Schéma récapitulatif de la méthodologie développée durant ces travaux. P_{fi} : paramètre de fabrication i ; N_i : Niveau i du paramètres de fabrication; C_T : coût total; C_f : coût de fabrication; T : indicateur technique; T' : indicateur technique sur les pièces tests; E : indicateur énergétique; C : indicateur économique.

Le premier palier réalisé, nous pouvons alors passer à l'établissement d'un plan d'expériences (palier **B**). C'est le cœur de l'analyse qui permet à l'opérateur de la machine ou au concepteur d'évaluer l'impact d'un grand nombre de paramètres de fabrication et d'estimer des solutions optimales. Pour les paramètres évalués et leurs niveaux choisis, ce palier n'est à réaliser qu'une seule fois. Tout d'abord, les paramètres à tester et leurs niveaux sont à sélectionner (étape **B.1**). Le chapitre 4 présente un plan d'expériences préliminaire, avec un nombre restreint de paramètres et de niveaux, afin d'évaluer rapidement les conditions nécessaires à la mise en œuvre du plan et fournir à l'opérateur de la machine un premier aperçu des paramètres de fabrication significatifs. Ce plan d'expériences simple est adapté à la prise en main d'un procédé nouveau ou pour identifier rapidement l'impact d'un paramètre de fabrication. Le plan d'expériences présenté au chapitre 5 est quant à lui plus poussé, avec un nombre plus large de paramètres et de niveaux permettant d'obtenir des informations pour une modélisation complète de l'impact des paramètres de fabrication. Dans le chapitre 5, l'utilisation d'un plan d'expérience fractionné (suivant la méthode de Taguchi) permet d'évaluer un maximum de paramètres de fabrication tout en limitant le nombre d'essais à réaliser. Une fois le plan d'expérience décidé, la réalisation de ce plan peut se dérouler. En fonction du critère technique choisi, une géométrie de pièce test doit également être sélectionnée. Une fois ces sélections effectuées, la fabrication de ces pièces tests peut être réalisée avec prise de mesure de la consommation énergétique durant les fabrications (étape **B.2**). Puis, la réalisation des essais techniques et le traitement des données énergétiques et techniques peuvent être effectués (étape **B.3**). En se basant sur ces données, la mise en place des modélisations techniques, énergétiques et économiques peut alors se réaliser afin d'accompagner l'opérateur dans son évaluation des impacts des différents paramètres (étapes **B.5**, **B.6** et **B.7**). Du côté de la modélisation économique, la modélisation globale réalisée à l'étape **A.4** peut être réduite en une modélisation se focalisant sur la fabrication, en fonction de la machine et du matériau choisis, afin de ne conserver que les termes variables durant la fabrication : la matière, l'énergie et les consommables. (étape **B.4**). Enfin, les données obtenues pendant la fabrication des pièces tests et des essais peuvent alors être incluses dans la modélisation afin d'obtenir une évaluation du coût de fabrication pour chacun des jeux de paramètres du plan d'expérience (étape **B.5**). Au cours du chapitre 4, un graphique montrant la répartition relative des coûts est proposé, ce qui dans l'étude, met en avant la prédominance des coûts de matière et d'une grande variabilité des coûts énergétiques. Du côté de la modélisation énergétique (étape **B.6**), les indicateurs de SEC et de SPE sont proposés, le premier permettant d'obtenir une consommation globale, adaptée aux fabrications en série, le second se concentre sur l'énergie utile, adapté à l'évaluation d'une pièce ou d'un plateau unique de fabrication. Enfin, du côté de la modélisation technique (étape **B.7**), les essais

réalisés indiquent au concepteur si les pièces fabriquées vont respecter le cahier des charges ou non. Afin d'accompagner et de faciliter le traitement des informations, deux types de graphiques sont introduits dans le chapitre 5 :

1. Graphique des effets principaux : cet outil permet de rapidement quantifier l'impact de chacun des paramètres sur l'indicateur et leurs importances relatives. Le graphique indique également les paramètres qui auraient une influence contradictoire ou peu significative. À noter toutefois que les résultats obtenus ne sont valables que dans la plage des niveaux choisis pour les paramètres.

Exemple dans l'étude : le graphique permet de rapidement identifier la température de la buse comme peu impactant sur la consommation énergétique, mais sensiblement impactant sur la résistance en traction. La température peut donc être augmentée afin d'améliorer les performances de la pièce fabriquée sans craindre une hausse de la consommation d'énergie. À l'inverse, réduire l'épaisseur de couche amènera rapidement à une grande augmentation de la consommation énergétique par unité de résistance en traction améliorée.

2. Classement des jeux de paramètres : cet outil classe les jeux de paramètres en fonction de l'indicateur choisi. Le classement peut permettre d'observer des tendances d'optimisation. Aussi, un jeu de couleurs peut être intégré afin d'ajouter une information supplémentaire (paramètre le plus impactant, coût de fabrication, durée de fabrication, etc.).

Exemple dans l'étude : le classement des énergies montre que les 3 jeux de paramètres les plus consommateurs sont significativement distincts les uns des autres, à l'inverse le classement de la résistance ultime, indique que les 5 jeux de paramètres les plus résistants sont similaires. Cela signale qu'une optimisation de la consommation énergétique peut être réalisée sans compromettre les performances mécaniques.

Au cours du chapitre 4, le palier **B** a été utilisé afin d'évaluer l'impact d'un paramètre qui n'avait pas été étudié auparavant, la stratégie de chauffe. De manière générale, la chauffe du plateau joue deux rôles : le premier est d'assurer l'adhésion des premières couches déposées sur le plateau et ainsi garantir la fabricabilité de la pièce; le second est de maintenir en température les couches déjà déposées afin d'améliorer la fusion entre les couches et ainsi renforcer mécaniquement la pièce fabriquée. Comme nous l'avons vu dans la partie 2.2.1, ces deux rôles influent principalement sur les premières couches déposées et perdent de l'influence au fur et à mesure que les couches sont déposées. Toutefois, les chauffes des éléments chauffants (buse et plateau) sont les deux paramètres impactant le plus la puissance moyenne au cours de la fabrication. L'idée est donc de profiter de la chauffe du plateau sur les pre-

mières couches puis, une fois l'effet dissipé, de stopper la chauffe du plateau afin de réduire la puissance moyenne. Sur la figure 4.5, on observe un module de Young et une résistance mécanique ultime similaire (différence inférieure à 5 %) entre les pièces fabriquées avec une stratégie de chauffe de 50 % et de 100 % (bien qu'inférieur pour les premiers), mais une grande diminution de la consommation d'énergie entre 25 et 30 % lorsque le plateau cesse d'être chauffé à la moitié des couches. Alors, au concepteur de décider si ce compromis est satisfaisant.

Une fois l'évaluation individuelle des paramètres effectuée, le troisième palier **C** consiste en la mise en place d'outils afin d'accompagner le concepteur dans sa prise de décision multi-objectifs. La première étape consiste à combiner les modélisations individuelles (étape **C.1**). Au cours du chapitre 4, un graphique radar est proposé comme outil de prise de décision, résumant les performances des neuf jeux de paramètres étudiés. Ce type de graphique semble pertinent dans le cas d'un faible nombre de jeux de paramètres, donc un plan d'expérience préliminaire, mais devient vite illisible et inutilisable au fur et à mesure que le nombre de jeux de paramètre augmente. Le chapitre 5 propose un autre graphique basé sur la méthode de sélection des matériaux et de procédé d'Ashby. Ce type de graphique permet de résumer les résultats obtenus au cours du plan d'expériences, suivant deux axes. Chaque axe représentant un indicateur (ou une combinaison d'indicateur), cela permet de rapidement identifier les performances les plus intéressantes. Par un front de Pareto, les solutions non dominées peuvent ressortir et être étudiées. De plus, en fonction du poids associé à chacun des deux indicateurs, une droite (dont la pente dépend du poids des indicateurs) permet de discriminer les solutions et de faire ressortir différents jeux de paramètres optimisés en fonction du besoin (étape **C.2**). Comme pour le classement des jeux de paramètres, un jeu de couleur peut être intégré afin d'ajouter une information supplémentaire (paramètres le plus impactant, coût de fabrication, durée de fabrication, etc.). *Exemple dans l'étude* : une courbe approximant un front de Pareto est utilisée. Trois pentes représentant trois scénarios différents sont utilisées. Dans le scénario de performance mécanique, deux jeux de paramètres semblent très proches. Des essais complémentaires peuvent alors être réalisés autour de ces jeux de paramètres, en combinant avec les informations des graphiques des effets principaux pour effectuer une nouvelle série de mesure et trouver une nouvelle solution optimale. Grâce à cet outil, un jeu de paramètre optimal peut être sélectionné et utilisé afin de fabriquer la pièce souhaitée (étape **C.3**). Ainsi, nous avons fabriqué la pièce souhaitée avec une évaluation économique, énergétique et technique.

Le chapitre 6 introduit la transition de la méthodologie vers une application plus réelle, les pièces fabriquées ne sont plus des éprouvettes de traction standardisée, mais une roue dentée inspirée d'une application industrielle. Ce chapitre a deux objectifs, tout d'abord passer au

troisième palier **C** de la méthodologie (utiliser les résultats du palier **B** sur des éprouvettes de traction pour une application sur la pièce réelle), mais également aborder la question de la transposition des modélisations économique, technique et énergétique vers une pièce plus complexe. En effet, dans quelles mesures les résultats obtenus sur une pièce simple, l'éprouvette de traction, s'adaptent à une fabrication plus longue, avec une géométrie plus complexe et dont on ne peut mesurer les performances en traction?

Le point de départ est les trois jeux de paramètres identifiés, dans le palier **B** du chapitre 5, comme optimaux (scénario *équilibré*, scénario *économie d'énergie*, et scénario *performance mécanique*). L'idée est donc de fabriquer la roue dentée suivant ces trois jeux de paramètres. Toutefois, les essais de performances mécaniques avaient été réalisés sur les propriétés en traction, et ne peuvent être reproduits sur une roue dentée. Afin de résoudre cette problématique, le choix fut d'effectuer des essais d'état de surface, et ce pour plusieurs raisons. La première raison est l'hypothèse que, quand bien même les essais de traction ne peuvent être réalisés et donc que les propriétés en traction ne peuvent être vérifiées, les performances en traction relatives sur éprouvette de traction seront conservées. Le jeu de paramètre *performance mécanique* présentera donc toujours de meilleures propriétés en traction que les autres scénarios, malgré le fait que la quantification précise ne peut être réalisée. La seconde raison est que l'indicateur principal de performance d'une roue dentée est sa classe de qualité, qui dépend de l'état de surface des dents. Enfin, la troisième raison est que l'évaluation de la précision de fabrication est un critère régulièrement évalué en FFF, le procédé étant limité sur cet aspect technique. Finalement, afin de comparer l'impact du changement de dimensions, le choix a été de fabriquer à la fois les roues dentées, mais également une portion de la roue. Ce faisant, nous pouvons comparer si l'état de surface mesurée et la consommation énergétique sur une fraction de la pièce sont équivalentes par rapport à la totalité de la pièce, ce qui permettrait de réduire la durée et les coûts d'essais. Les résultats obtenus semblent indiquer que proportionnellement l'impact énergétique est conservé entre les éprouvettes de traction et les pièces réelles. À l'inverse, l'état de surface n'est pas conservé. Le concepteur ne pourra pas se baser sur les résultats obtenus sur des pièces tests ou sur du prototypage pour préjuger de l'état de surface finale. Ainsi, l'opérateur de la machine devra donc effectuer des essais d'état de surface directement sur la pièce souhaitée avec le jeu de paramètre final.

CHAPITRE 8 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

8.1 Conclusion

Dans ce manuscrit, une méthodologie adaptée à la fabrication FFF de FRCP, permettant l'évaluation de l'impact des paramètres de fabrication sur les aspects techniques, économiques et énergétiques est présentée. Les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Une évaluation conjointe des aspects techniques, économiques et énergétiques permet de mieux comprendre les spécificités du procédé et de tirer des pistes d'optimisations en termes de paramètres de fabrication. Des outils graphiques, simples d'utilisation et d'interprétation, ont été mis en place afin d'accompagner la prise de décision multicritère pour l'utilisateur, expert ou non du FFF de FRCP.
- L'étude de la température du plateau de fabrication, à travers l'angle de la température et de la durée du maintien en chauffe, peut ouvrir de nouvelles pistes d'optimisation entre les performances mécaniques, la consommation d'énergie et les coûts de fabrication.
- La transposition de résultats obtenus sur des pièces tests ne peut être effectuée de manière directe. Pour un jeu de paramètre donné, la puissance moyenne consommée sera conservée, l'évaluation énergétique peut donc se faire en prenant en compte le changement de durée de fabrication. L'évaluation technique des propriétés en traction et de l'état de surface ne peut être transposée entre les pièces tests et les pièces réelles. Le changement de la géométrie de la pièce rend impossibles des essais de traction, tandis que l'état de surface n'est pas conservé entre les deux types de pièces. Enfin, concernant l'aspect économique, la transposition semble correspondre aux ordres de grandeur, cependant l'évaluation est très dépendante du cas étudié et doit s'effectuer au cas par cas.

8.2 Recommandations

Des recherches futures sont recommandées dans les domaines suivants :

- Bien que la fabrication de pièce CFRP par FFF permet de réduire les impacts environnementaux durant la phase d'utilisation dans des secteurs comme le transport, l'évaluation sur d'autres aspects du cycle de vie reste limité. Comme mis en évidence par Lunetto & al. [144], les fibres de carbone et les matériaux composites ont une

énergie intrinsèque élevée, très variable en fonction du matériau et du procédé, et pourtant, aucune donnée pour la FA n'existe. La fin de vie des pièces CFRP fabriquées par FFF est également un axe de recherche. Par exemple, les méthodes de recyclage et de broyage des CFRP en fin de vie sont-elles adaptées? L'utilisation d'une matrice polyamide (recyclable) en lieu et place de résine thermodurcissable (non recyclable) peut être une piste comme vecteur de réduction de l'impact environnemental des pièces en fin de vie.

- Les paramètres de fabrication sont principalement étudiés individuellement, l'évaluation des couplages et interactions entre paramètres (e.g., vitesse de déposition et épaisseur de couche), permettraient d'obtenir de nouvelles pistes d'optimisation, mais également de mieux comprendre les mécanismes de formation des liaisons intercouches. À ce jour, seules quelques études ont analysé ces effets [138, 110, 101]. Une utilisation plus fine des paramètres de fabrication, via leurs interactions, peut-elle permettre de réduire les coûts, la consommation énergétique et améliorer les propriétés mécaniques, afin de justifier l'utilisation de la FA dans des domaines encore inexploités?
- Bien que l'émission de substances toxiques pendant la fabrication FFF est un fait établi, les mécanismes et les moyens permettant de réduire ces émissions ne sont pas encore établies [145]. De plus quelle différence, en termes d'émissions de particules, entre la FA polymère et composite? La FA composite nécessite-t-elle des protections spécifiques?
- Parmi les outils de modélisation et d'évaluation de l'impact des paramètres de fabrication, une distinction par acteur de la chaîne de fabrication (technicien, concepteur, fabricant de machines, fournisseur de matière, chef d'entreprise) permettrait d'effectuer un pas supplémentaire pour l'adoption d'une méthodologie par les secteurs industriels. Un cas d'application avec un ou des partenaire(s) industriel(s) irait également dans ce sens. Des contacts avec des partenaires dans les secteurs aéronautique et naval avaient été initialement élaborés durant cette thèse, cependant le contexte de confinement et de cotutelle internationale n'ont pas permis de mener à bien cette mise en application industrielle.
- Comme étudié au cours du chapitre 6, la transposition des évaluations techniques des pièces tests vers des pièces réelles est complexe. Par exemple aujourd'hui, aucune solution satisfaisante ne permet d'évaluer de manière précise les propriétés en traction d'une pièce réelle fabriquée par FFF, ou encore, les états de surface ne sont pas transposables d'une pièce à une autre à machine, matériau et paramètres de fabrication constants. Quelles approches permettraient de surmonter ces obstacles et une standardisation des essais est-elle possible pour les procédés de FA? À noter toutefois une évolution des normes dans ce sens, avec par exemple la norme ISO/ASTM 52902 publié en 2023 sur

les évaluations des capacités géométriques des procédés de fabrication additifs [146].

RÉFÉRENCES

- [1] UNITED NATIONS. “Work of the Statistical Commission pertaining to the 2030 Agenda for Sustainable Development”. In : *Global indicator framework for the Sustainable Development Goals and targets of the 2030 Agenda for Sustainable Development*, 11371.July (2017), p. 4-25. URL : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9d/A_RES_71_313_E.pdf.
- [2] INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION. *IATA - Climate Change*. URL : <https://www.iata.org/en/programs/environment/climate-change/>.
- [3] L. ZHU, N. LI et P. R.N. CHILDS. “Light-weighting in aerospace component and system design”. In : *Propulsion and Power Research* 7.2 (2018), p. 103-119. ISSN : 2212540X. DOI : 10.1016/j.jprr.2018.04.001.
- [4] M MARINO et Roberto SABATINI. “Advanced lightweight aircraft design configurations for green operations”. In : *Practical Responses to Climate Change Conference 2014 (PRCC 2014)* November (2014), p. 1-9. URL : https://researchrepository.rmit.edu.au/esploro/outputs/conferenceProceeding/Advanced-lightweight-aircraft-design-configurations-for/9921862409301341?institution=61RMIT_INST.
- [5] Karel KELLENS, Martin BAUMERS, Timothy G. GUTOWSKI, William FLANAGAN, Reid LIFSET et Joost R. DUFLOU. “Environmental Dimensions of Additive Manufacturing : Mapping Application Domains and Their Environmental Implications”. In : *Journal of Industrial Ecology* 21 (2017), S49-S68. ISSN : 15309290. DOI : 10.1111/jiec.12629.
- [6] Guo Dong GOH, Yee Ling YAP, Shweta AGARWALA et Wai Yee YEONG. “Recent Progress in Additive Manufacturing of Fiber Reinforced Polymer Composite”. In : *Advanced Materials Technologies* 4.1 (2019), p. 1-22. ISSN : 2365709X. DOI : 10.1002/admt.201800271.
- [7] Karel KELLENS, Raya MERTENS, Dimos PARASKEVAS, Wim DEWULF et Joost R. DUFLOU. “Environmental Impact of Additive Manufacturing Processes : Does AM Contribute to a More Sustainable Way of Part Manufacturing?” In : *Procedia CIRP*. T. 61. Elsevier B.V., 2017, p. 582-587. DOI : 10.1016/j.procir.2016.11.153.
- [8] K. SATHISH, S. Senthil KUMAR, R. Thamil MAGAL, V. SELVARAJ, V. NARASIMHARAJ, R. KARTHIKEYAN, G. SABARINATHAN, Mohit TIWARI et Adamu Esubalew KASSA. “A Comparative Study on Subtractive Manufacturing and Additive Manufacturing”.

- In : *Advances in Materials Science and Engineering* 2022 (2022). ISSN : 16878442. DOI : 10.1155/2022/6892641.
- [9] R. J. URBANIC et S. M. SAQIB. “A manufacturing cost analysis framework to evaluate machining and fused filament fabrication additive manufacturing approaches”. In : *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 102.9-12 (2019), p. 3091-3108. ISSN : 14333015. DOI : 10.1007/s00170-019-03394-x.
 - [10] A. KAUSAR. “Advances in Carbon Fiber Reinforced Polyamide-Based Composite Materials”. In : *Advances in Materials Science* 19.4 (2019), p. 67-82. DOI : 10.2478/adms-2019-0023.
 - [11] Vincenzo LUNETTO, Manuela GALATI, Luca SETTINERI et Luca IULIANO. “Sustainability in the manufacturing of composite materials : A literature review and directions for future research”. In : *Journal of Manufacturing Processes* 85.December 2022 (2023), p. 858-874. ISSN : 15266125. DOI : 10.1016/j.jmapro.2022.12.020. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.12.020>.
 - [12] Amin MEMARZADEH, Babak SAFAEI, Asli TABAK, Saeid SAHMANI et Cafer KIZILORS. “Advancements in additive manufacturing of polymer matrix composites : A systematic review of techniques and properties”. In : *Materials Today Communications* 36.May (2023), p. 106449. ISSN : 23524928. DOI : 10.1016/j.mtcomm.2023.106449. URL : <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106449>.
 - [13] N. W.Y. OMAR, N. A. SHUAIB, M. H.J.Ab HADI et A. I. AZMI. “Mechanical properties of carbon and glass fibre reinforced composites produced by additive manufacturing : A short review”. In : *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering* 670.1 (2019). ISSN : 1757899X. DOI : 10.1088/1757-899X/670/1/012020.
 - [14] Nekoda van de WERKEN, Halil TEKINALP, Pouria KHANBOLOUKI, Soydan OZCAN, Andrew WILLIAMS et Mehran TEHRANI. “Additively manufactured carbon fiber-reinforced composites : State of the art and perspective”. In : *Additive Manufacturing* 31.July 2019 (2020), p. 100962. ISSN : 22148604. DOI : 10.1016/j.addma.2019.100962.
 - [15] S. CHAND. “Carbon fibers for composites”. In : *Journal of Materials Science* 35.6 (2000), p. 1303-1313. ISSN : 00222461. DOI : 10.1023/A:1004780301489.
 - [16] Xiaosong HUANG. “Fabrication and properties of carbon fibers”. In : *Materials* 2.4 (2009), p. 2369-2403. ISSN : 19961944. DOI : 10.3390/ma2042369.

- [17] Jiahui LI, Yvonne DURANDET, Xiaodong HUANG, Guangyong SUN et Dong RUAN. “Additively manufactured fiber-reinforced composites : A review of mechanical behavior and opportunities”. In : *Journal of Materials Science and Technology* 119 (2022), p. 219-244. ISSN : 10050302. DOI : 10.1016/j.jmst.2021.11.063. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.11.063>.
- [18] Zhenzhen QUAN, Amanda WU, Michael KEEFE, Xiaohong QIN, Jianyong YU, Jonghwan SUHR, Joon Hyung BYUN, Byung Sun KIM et Tsu Wei CHOU. “Additive manufacturing of multi-directional preforms for composites : Opportunities and challenges”. In : *Materials Today* 18.9 (2015), p. 503-512. ISSN : 18734103. DOI : 10.1016/j.mattod.2015.05.001. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.mattod.2015.05.001>.
- [19] Ivan Philip BECKMAN, Christine LOZANO, Elton FREEMAN et Guillermo RIVEROS. “Fiber selection for reinforced additive manufacturing”. In : *Polymers* 13.14 (2021). ISSN : 20734360. DOI : 10.3390/polym13142231.
- [20] Furqan AHMAD, Heung Soap CHOI et Myung Kyun PARK. “A review : Natural fiber composites selection in view of mechanical, light weight, and economic properties”. In : *Macromolecular Materials and Engineering* 300.1 (2015), p. 10-24. ISSN : 14392054. DOI : 10.1002/mame.201400089.
- [21] *Epsilon Composite*. URL : <https://www.epsilon-composite.com/fibre-de-carbone>.
- [22] Chrysoula PANDELIDI, Stuart BATEMAN, Sebastian PIEGERT, Rene HOEHNER, Ingomar KELBASSA et Milan BRANDT. “The technology of continuous fibre-reinforced polymers : a review on extrusion additive manufacturing methods”. In : *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 113.11-12 (2021), p. 3057-3077. ISSN : 14333015. DOI : 10.1007/s00170-021-06837-6.
- [23] Matthew SUCH, Carwyn WARD et Kevin POTTER. “Aligned Discontinuous Fibre Composites : A Short History”. In : *Journal of Multifunctional Composites* 2.3 (2014), p. 1995-1998. DOI : 10.12783/issn.2168-4286/2/3/4.
- [24] Hayden Thompson BLACK, Mathias C CELINA et James R MCELHANON. “Additive Manufacturing of Polymers : Materials Opportunities and Emerging Applications”. In : *Sandia National Laboratories* April (2016), p. 40.
- [25] Vishal MISHRA, Sushant NEGI, Simanchal KAR, Anup Kumar SHARMA, Yadav Narendra Kumar RAJBAHADUR et Avinash KUMAR. “Recent advances in fused deposition modeling based additive manufacturing of thermoplastic composite structures : A

- review”. In : *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 0.0 (2022), p. 1-39. ISSN : 15307980. DOI : 10.1177/08927057221102857.
- [26] 3DXTECH. 2023. URL : <https://www.3dxtech.com/>.
- [27] Andrew DICKSON, Hisham ABOURAYANA et Denis DOWLING. “Composites Using Fused Filament Fabrication — A Review”. In : *Polymers* 12.2188 (2020), p. 1-18.
- [28] Rouhollah D. FARAHANI, Martine DUBÉ et Daniel THERRIault. “Three-Dimensional Printing of Multifunctional Nanocomposites : Manufacturing Techniques and Applications”. In : *Advanced Materials* 28.28 (2016), p. 5794-5821. ISSN : 15214095. DOI : 10.1002/adma.201506215.
- [29] Nikita PERETYAGIN, Anton SELEZNEV et Pavel PERETYAGIN. “Direct ink writing technology (3d printing) of graphene-based ceramic nanocomposites : A review”. In : *Nanomaterials* 10.7 (2020), p. 1-48. ISSN : 20794991. DOI : 10.3390/nano10071300.
- [30] Chad DUTY, Christine AJINJERU, Vidya KISHORE, Brett COMPTON, Nadim HMEIDAT, Xun CHEN, Peng LIU, Ahmed Arabi HASSEN, John LINDAHL et Vlastimil KUNC. “What makes a material printable ? A viscoelastic model for extrusion-based 3D printing of polymers”. In : *Journal of Manufacturing Processes* 35.August 2017 (2018), p. 526-537. ISSN : 15266125. DOI : 10.1016/j.jmapro.2018.08.008. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.008>.
- [31] Giovanni POSTIGLIONE, Gabriele NATALE, Gianmarco GRIFFINI, Marinella LEVI et Stefano TURRI. “Conductive 3D microstructures by direct 3D printing of polymer/carbon nanotube nanocomposites via liquid deposition modeling”. In : *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* 76 (2015), p. 110-114. ISSN : 1359835X. DOI : 10.1016/j.compositesa.2015.05.014. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.05.014>.
- [32] Marta INVERNIZZI, Gabriele NATALE, Marinella LEVI, Stefano TURRI et Gianmarco GRIFFINI. “UV-assisted 3D printing of glass and carbon fiber-reinforced dual-cure polymer composites”. In : *Materials* 9.7 (2016), p. 9-11. ISSN : 19961944. DOI : 10.3390/MA9070583.
- [33] Robert E. PRZEKOP, Ewa GABRIEL, Daria PAKUŁA et Bogna SZTORCH. “Liquid for Fused Deposition Modeling Technique (L-FDM)—A Revolution in Application Chemicals to 3D Printing Technology : Color and Elements”. In : *Applied Sciences (Switzerland)* 13.13 (2023). ISSN : 20763417. DOI : 10.3390/app13137393.

- [34] James P. LEWICKI, Jennifer N. RODRIGUEZ, Cheng ZHU, Marcus A. WORSLEY, Amanda S. WU, Yuliya KANARSKA, John D. HORN, Eric B. DUOSS, Jason M. ORTEGA, William ELMER, Ryan HENSLEIGH, Ryan A. FELLINI et Michael J. KING. “3D-Printing of Meso-structurally Ordered Carbon Fiber/Polymer Composites with Unprecedented Orthotropic Physical Properties”. In : *Scientific Reports* 7.December 2016 (2017), p. 1-14. ISSN : 20452322. DOI : 10.1038/srep43401.
- [35] Y. SAITO, F. FERNANDEZ, D. A. TORTORELLI, W. S. COMPEL, J. P. LEWICKI et J. LAMBROS. “Experimental Validation of an Additively Manufactured Stiffness-Optimized Short-Fiber Reinforced Composite Clevis Joint”. In : *Experimental Mechanics* 59.6 (2019), p. 859-869. ISSN : 17412765. DOI : 10.1007/s11340-019-00514-2.
- [36] H. A. PIERSON, E. CELIK, A. ABBOTT, H. DE JARNETTE, L. SIERRA GUTIERREZ, K. JOHNSON, H. KOERNER et J. W. BAUR. “Mechanical Properties of Printed Epoxy-Carbon Fiber Composites”. In : *Experimental Mechanics* 59.6 (2019), p. 843-857. ISSN : 17412765. DOI : 10.1007/s11340-019-00498-z.
- [37] M. A.S.R. SAADI, Alianna MAGUIRE, Neethu T. POTTACKAL, Md Shajedul Hoque THAKUR, Maruf Md IKRAM, A. John HART, Pulickel M. AJAYAN et Muhammad M. RAHMAN. “Direct Ink Writing : A 3D Printing Technology for Diverse Materials”. In : *Advanced Materials* 34.28 (2022), p. 1-57. ISSN : 15214095. DOI : 10.1002/adma.202108855.
- [38] Jorge Lino ALVES, Leonardo SANTANA et Edwin M. OCAÑA GARZÓN. “Binder jetting”. In : *Polymers for 3D Printing : Methods, Properties, and Characteristics*. 2022, p. 113-125. ISBN : 9780128183113. DOI : 10.1016/B978-0-12-818311-3.00010-0.
- [39] Christina SCHMIDLEITHNER et Deepak M. KALASKAR. “Stereolithography”. In : *IntechOpen*. 3D Printin. 2018. Chap. 1, p. 1-22. ISBN : 978-953-51-6722-8. DOI : 10.5772/intechopen.78147. URL : <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10050793>.
- [40] Aini Zuhra Abdul KADIR, Yusri YUSOF et Md Saidin WAHAB. “Additive manufacturing cost estimation models—a classification review”. In : *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 107.9-10 (2020), p. 4033-4053. ISSN : 14333015. DOI : 10.1007/s00170-020-05262-5.
- [41] Y. G. BALA, Dinesh Kumar RAJENDRAN et Varthini RAJAGOPAL. “A review on binder jetting fabrication : Materials, characterizations and challenges”. In : *Advances in Additive Manufacturing Processes*. Sous la dir. de Jeyaprakash NATARAJAN, Muralimohan CHEEPU et Che-Hua YANG. T. 6. 121-140. Bentham Books, 2021.

- [42] Yuxuan WANG, Yonghui ZHOU, Lanying LIN, Jorge CORKER et Mizi FAN. “Overview of 3D additive manufacturing (AM) and corresponding AM composites”. In : *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* 139.January (2020), p. 106114. ISSN : 1359835X. DOI : 10.1016/j.compositesa.2020.106114.
- [43] Vishwesh DIKSHIT, Guo Dong GOH, Arun Prasanth NAGALINGAM, Guo Liang GOH et Wai Yee YEONG. *Recent progress in 3D printing of fiber-reinforced composite and nanocomposites*. INC, 2020, p. 371-394. ISBN : 9780128199046. DOI : 10.1016/b978-0-12-819904-6.00017-7. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-819904-6.00017-7>.
- [44] Yukako SANO, Ryosuke MATSUZAKI, Masahito UEDA, Akira TODOROKI et Yoshiyasu HIRANO. “3D printing of discontinuous and continuous fibre composites using stereolithography”. In : *Additive Manufacturing* 24.May (2018), p. 521-527. ISSN : 22148604. DOI : 10.1016/j.addma.2018.10.033. URL : <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.033>.
- [45] Sanjay KUMAR. “Selective Laser Sintering : A Qualitative and Objective Approach”. In : *Jom* 55.10 (2003), p. 43-47. ISSN : 10474838. DOI : 10.1007/s11837-003-0175-y.
- [46] Siddharth Ram ATHREYA, Kyriaki KALAITZIDOU et Suman DAS. “Mechanical and microstructural properties of Nylon-12/carbon black composites : Selective laser sintering versus melt compounding and injection molding”. In : *Composites Science and Technology* 71.4 (2011), p. 506-510. ISSN : 02663538. DOI : 10.1016/j.compscitech.2010.12.028. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.12.028>.
- [47] Shangqin YUAN, Jiaming BAI, Chee Kai CHUA, Jun WEI et Kun ZHOU. “Material evaluation and process optimization of CNT-coated polymer powders for selective laser sintering”. In : *Polymers* 8.10 (2016). ISSN : 20734360. DOI : 10.3390/polym8100370.
- [48] J. P. KRUTH, M. C. LEU et T. NAKAGAWA. “Progress in additive manufacturing and rapid prototyping”. In : *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 47.2 (1998), p. 525-540. ISSN : 00078506. DOI : 10.1016/S0007-8506(07)63240-5.
- [49] R. D. GOODRIDGE, M. L. SHOFNER, R. J.M. HAGUE, M. MCCLELLAND, M. R. SCHLEA, R. B. JOHNSON et C. J. TUCK. “Processing of a Polyamide-12/carbon nanofibre composite by laser sintering”. In : *Polymer Testing* 30.1 (2011), p. 94-100. ISSN : 01429418. DOI : 10.1016/j.polymertesting.2010.10.011. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2010.10.011>.

- [50] Haseung CHUNG et Suman DAS. "Processing and properties of glass bead particulate-filled functionally graded Nylon-11 composites produced by selective laser sintering". In : *Materials Science and Engineering : A* 437.2 (2006), p. 226-234. ISSN : 09215093. DOI : 10.1016/j.msea.2006.07.112.
- [51] Yan CHUNZE, Shi YUSHENG, Yang JINSONG et Liu JINHUI. "A nanosilica/nylon-12 composite powder for selective laser sintering". In : *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 28.23 (2009), p. 2889-2902. ISSN : 07316844. DOI : 10.1177/0731684408094062.
- [52] T J GILL et K K B HON. "Experimental investigation into the selective laser sintering of silicon carbide polyamide composites". In : *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Journal of Engineering Manufacture* 218.10 (2004), p. 1249-1256. DOI : 10.1243/0954405042323487. URL : <https://doi.org/10.1243/0954405042323487>.
- [53] Wei ZHU, Chunze YAN, Yusheng Yunsong SHI, Shifeng WEN, Jie LIU, Qingsong WEI et Yusheng Yunsong SHI. "A novel method based on selective laser sintering for preparing high-performance carbon fibres/polyamide12/epoxy ternary composites". In : *Scientific Reports* 6.January (2016), p. 1-10. ISSN : 20452322. DOI : 10.1038/srep33780.
- [54] Mei CHEN, Yanbei HOU, Ran AN, Wei Shian TEY, Ming GAO, Jiayao CHEN, Li-hua ZHAO et Kun ZHOU. "Investigation of the mechanical properties of polyimide fiber/polyamide 12 composites printed by Multi Jet Fusion". In : *Virtual and Physical Prototyping* 18.1 (2023). ISSN : 17452767. DOI : 10.1080/17452759.2023.2246032.
- [55] Neha YARAGATTI et Amar PATNAIK. "A review on additive manufacturing of polymers composites". In : *Materials Today : Proceedings* 44 (2020), p. 4150-4157. ISSN : 22147853. DOI : 10.1016/j.matpr.2020.10.490. URL : <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.490>.
- [56] Hideo KODAMA. "Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer". In : *Review of Scientific Instruments* 52.11 (nov. 1981), p. 1770-1773. ISSN : 0034-6748. DOI : 10.1063/1.1136492. URL : <https://doi.org/10.1063/1.1136492>.
- [57] D. E. KARALEKAS. "Study of the mechanical properties of nonwoven fibre mat reinforced photopolymers used in rapid prototyping". In : *Materials and Design*. T. 24. 8. 2003, p. 665-670. DOI : 10.1016/S0261-3069(03)00153-5.

- [58] Bharat BHUSHAN et Matt CASPERS. “An overview of additive manufacturing (3D printing) for microfabrication”. In : *Microsystem Technologies* 23.4 (2017), p. 1117-1124. ISSN : 09467076. DOI : 10.1007/s00542-017-3342-8.
- [59] Ali BASTAS. “Sustainable manufacturing technologies : A systematic review of latest trends and themes”. In : *Sustainability (Switzerland)* 13.8 (2021). ISSN : 20711050. DOI : 10.3390/su13084271.
- [60] Ben UTELA, Duane STORTI, Rhonda ANDERSON et Mark GANTER. “A review of process development steps for new material systems in three dimensional printing (3DP)”. In : *Journal of Manufacturing Processes* 10.2 (2008), p. 96-104. ISSN : 15266125. DOI : 10.1016/j.jmapro.2009.03.002. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2009.03.002>.
- [61] Xin WANG, Man JIANG, Zuowan ZHOU, Jihua GOU et David HUI. “3D printing of polymer matrix composites : A review and prospective”. In : *Composites Part B : Engineering* 110 (2017), p. 442-458. ISSN : 13598368. DOI : 10.1016/j.compositesb.2016.11.034. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>.
- [62] Pedram PARANDOUSH et Dong LIN. “A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites”. In : *Composite Structures* 182 (2017), p. 36-53. ISSN : 0263-8223. DOI : 10.1016/j.compstruct.2017.08.088. URL : <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.088>.
- [63] Mahesh GOPAL, Hirpa G. LEMU et Endalkachew Mosisa GUTEMA. “Sustainable Additive Manufacturing and Environmental Implications : Literature Review”. In : *Sustainability (Switzerland)* 15.1 (2023), p. 1-23. ISSN : 20711050. DOI : 10.3390/su15010504.
- [64] Bernhard MUELLER et Detlef KOCHAN. “Laminated object manufacturing for rapid tooling and patternmaking in foundry industry”. In : *Computers in Industry* 39.1 (1999), p. 47-53. ISSN : 01663615. DOI : 10.1016/S0166-3615(98)00127-4.
- [65] Jolie FRKETIC, Tarik DICKENS et Subramanian RAMAKRISHNAN. “Automated manufacturing and processing of fiber-reinforced polymer (FRP) composites : An additive review of contemporary and modern techniques for advanced materials manufacturing”. In : *Additive Manufacturing* 14 (2017), p. 69-86. ISSN : 22148604. DOI : 10.1016/j.addma.2017.01.003. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2017.01.003>.
- [66] Chao HU et Qing-hua QIN. “Advances in fused deposition modeling of discontinuous fiber/ polymer”. In : *Current Opinion in Solid State & Materials Science* 24.5 (2020),

- p. 100867. ISSN : 1359-0286. DOI : 10.1016/j.cossms.2020.100867. URL : <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2020.100867>.
- [67] Arup DEY, Isnala Nanjin Roan EAGLE et Nita YODO. “A review on filament materials for fused filament fabrication”. In : *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 5.3 (2021). ISSN : 25044494. DOI : 10.3390/jmmp5030069.
- [68] Jiri George DROBNY. *Handbook of thermoplastic elastomers*. Elsevier, 2014.
- [69] Zhenzhen QUAN, Zachary LARIMORE, Amanda WU, Jianyong YU, Xiaohong QIN, Mark MIROTNIK, Jonghwan SUHR, Joon Hyung BYUN, Youngseok OH et Tsu Wei CHOU. “Microstructural design and additive manufacturing and characterization of 3D orthogonal short carbon fiber/acrylonitrile-butadiene-styrene preform and composite”. In : *Composites Science and Technology* 126 (2016), p. 139-148. ISSN : 02663538. DOI : 10.1016/j.compscitech.2016.02.021. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.02.021>.
- [70] Easir Arafat PAPON et Anwarul HAQUE. “Review on process model, structure-property relationship of composites and future needs in fused filament fabrication”. In : *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 39.19-20 (2020), p. 758-789. ISSN : 15307964. DOI : 10.1177/0731684420929757.
- [71] ENSINGER. *PA 6 - TECAMID 6 natural*. 2023. URL : <https://www.ensingerplastics.com/en/shapes/pa6-tecamid-6-natural>.
- [72] MITSUBISHI CHEMICAL GROUP. *Ertalon® 6 SA PA6 - Chemical resistant nylon 6 / MCG*. 2023. URL : <https://www.mcam.com/en/products/shapes/engineering/nylatron-ertalon/ertalon-6-sa-pa6>.
- [73] *Filament PA6-CO pour imprimante 3D / Kimya®*. URL : <https://www.kimya.fr/fr/produit/kimya-pa6-co/>.
- [74] FILAMENT2PRINT. *PA6*. 2023. URL : <https://filament2print.com/gb/nylon-pa/1812-pa6-nanovia.html>.
- [75] *PA6+CF Carbon Fiber Nylon 3D Filament by 3DXTECH*. URL : <https://www.3dxtech.com/product/carbonx-pa6-cf/>.
- [76] NANOVIA. *Nanovia PA-6 CF : Carbon fiber reinforced*. 2023. URL : <https://nanovia.tech/en/ref/nanovia-pa-6-cf/>.
- [77] ENSINGER. *PA 12 - TECAMID 12 natural*. 2023. URL : <https://www.ensingerplastics.com/en/shapes/pa12-tecamid-12-natural>.

- [78] Tuntun PLASTIC. *Polyamide 12 Manufacturers / PA 12 (Nylon 12) Material Properties & Price*. 2023. URL : <https://www.tuntunplastic.com/product/polyamide-12-material.html>.
- [79] 3DJAKE FRANCE. *Fiberlogy Nylon PA12 Black*. 2023. URL : <https://www.3djake.com/fiberlogy/nylon-pa12-black>.
- [80] MACHINES-3D. *Carbon fiber Nylon filament 500g Black*. 2023. URL : https://www.machines-3d.com/en/machines3d-filament-carbon-fiber-nylon-pa12-175mm-500g-black-xml-367_930_1080-1177.html.
- [81] 3DXTech. *CarbonXTM Carbon Fiber Nylon 12 (PA12) 3D Filament*. 2022. URL : https://www.3dxtech.com/wp-content/uploads/2021/04/CF_PA12_v1.pdf.
- [82] Halil L. TEKINALP, Vlastimil KUNC, Gregorio M. VELEZ-GARCIA, Chad E. DUTY, Lonnie J. LOVE, Amit K. NASKAR, Craig A. BLUE et Soydan OZCAN. “Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing”. In : *Composites Science and Technology* 105 (2014), p. 144-150. ISSN : 02663538. DOI : 10.1016/j.compscitech.2014.10.009. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.10.009>.
- [83] Narongkorn KRAJANGSAWASDI, Lourens G. BLOK, Ian HAMERTON, Marco L. LONGANA, Benjamin K.S. WOODS et Dmitry S. IVANOV. “Fused deposition modelling of fibre reinforced polymer composites : A parametric review”. In : *Journal of Composites Science* 5.1 (2021). ISSN : 2504477X. DOI : 10.3390/jcs5010029.
- [84] G. NYIRANZEYIMANA, J. M. MUTUA, B. R. MOSE et T. O. MBUYA. “Optimization of process parameters in fused deposition modelling of thermoplastics : A review”. In : *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 52.6 (2021), p. 682-694. ISSN : 15214052. DOI : 10.1002/mawe.202000193.
- [85] Fuda NING, Weilong CONG, Yingbin HU et Hui WANG. “Additive manufacturing of carbon fiber-reinforced plastic composites using fused deposition modeling : Effects of process parameters on tensile properties”. In : *Journal of Composite Materials* 51.4 (2017), p. 451-462. ISSN : 1530793X. DOI : 10.1177/0021998316646169.
- [86] Kumaresan RAJAN, Mahendran SAMYKANO, Kumaran KADIRGAMA, Wan Sharuzi Wan HARUN et Md Mustafizur RAHMAN. *Fused deposition modeling : process, materials, parameters, properties, and applications*. 0123456789. Springer London, 2022. DOI : 10.1007/s00170-022-08860-7. URL : <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08860-7>.

- [87] Yiyun WU, Kui WANG, Victor NETO, Yong PENG, Robertt VALENTE et Said AHZI. “Interfacial behaviors of continuous carbon fiber reinforced polymers manufactured by fused filament fabrication : A review and prospect”. In : *International Journal of Material Forming* 15.3 (2022), p. 1-18. ISSN : 19606214. DOI : 10.1007/s12289-022-01667-7. URL : <https://doi.org/10.1007/s12289-022-01667-7>.
- [88] Shenli PEI, Kaifeng WANG, Cheng Bang CHEN, Jingjing LI, Yang LI, Danielle ZENG, Xuming SU et Hui YANG. “Process-structure-property analysis of short carbon fiber reinforced polymer composite via fused filament fabrication”. In : *Journal of Manufacturing Processes* 64.November 2020 (2021), p. 544-556. ISSN : 15266125. DOI : 10.1016/j.jmapro.2021.02.019. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.02.019>.
- [89] Nabeel MAQSOOD et Marius RIMAŠAUSKAS. “Development and fabrication of continuous carbon fiber reinforced thermoplastic porous composite structures with different infill patterns by using additive manufacturing”. In : *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 0.0 (2022), p. 1-26. ISSN : 15307980. DOI : 10.1177/08927057221088468.
- [90] Ans AL RASHID, Hamid IKRAM et Muammer KOÇ. “Additive manufacturing and mechanical performance of carbon fiber reinforced Polyamide-6 composites”. In : *Materials Today : Proceedings* 62.P12 (2022), p. 6359-6363. ISSN : 22147853. DOI : 10.1016/j.matpr.2022.03.339. URL : <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.339>.
- [91] Elena Verdejo de TORO, Juana Coello SOBRINO, Alberto Martínez MARTÍNEZ, Valentín Miguel EGUÍA et Jorge Ayllón PÉREZ. “Investigation of a short carbon fibre-reinforced polyamide and comparison of two manufacturing processes : Fused Deposition Modelling (FDM) and polymer injection moulding (PIM)”. In : *Materials* 13.3 (2020). ISSN : 19961944. DOI : 10.3390/ma13030672.
- [92] O. S. CARNEIRO, A. F. SILVA et R. GOMES. “Fused deposition modeling with polypropylene”. In : *Materials and Design* 83 (2015), p. 768-776. ISSN : 18734197. DOI : 10.1016/j.matdes.2015.06.053. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.053>.
- [93] I. John SOLOMON, P. SEVVEL et J. GUNASEKARAN. “A review on the various processing parameters in FDM”. In : *Materials Today : Proceedings* 37.Part 2 (2020), p. 509-514. ISSN : 22147853. DOI : 10.1016/j.matpr.2020.05.484. URL : <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.484>.

- [94] Bastian BRENKEN, Eduardo BAROCIO, Anthony FAVALORO, Vlastimil KUNC et R. Byron PIPES. “Fused filament fabrication of fiber-reinforced polymers : A review”. In : *Additive Manufacturing* 21.February (2018), p. 1-16. ISSN : 22148604. DOI : 10.1016/j.addma.2018.01.002. URL : <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.01.002>.
- [95] Beibit ZHARYLKASSYN, Asma PERVEEN et Didier TALAMONA. “Effect of process parameters and materials on the dimensional accuracy of FDM parts”. In : *Materials Today : Proceedings* 44 (2021), p. 1307-1311. ISSN : 22147853. DOI : 10.1016/j.matpr.2020.11.332. URL : <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.332>.
- [96] Xingshuang PENG, Miaomiao ZHANG, Zhengchuan GUO, Lin SANG et Wenbin HOU. “Investigation of processing parameters on tensile performance for FDM-printed carbon fiber reinforced polyamide 6 composites”. In : *Composites Communications* 22.September (2020), p. 100478. ISSN : 24522139. DOI : 10.1016/j.coco.2020.100478. URL : <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100478>.
- [97] Mahdi MOHAMMADIZADEH et Ismail FIDAN. “Tensile performance of 3d-printed continuous fiber-reinforced nylon composites”. In : *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 5.3 (2021). ISSN : 25044494. DOI : 10.3390/jmmp5030068.
- [98] Xia GAO, Shunxin QI, Xiao KUANG, Yunlan SU, Jing LI et Dujin WANG. “Fused filament fabrication of polymer materials : A review of interlayer bond”. In : *Additive Manufacturing* 37.2 (2021), p. 101658. ISSN : 22148604. DOI : 10.1016/j.addma.2020.101658. URL : <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101658>.
- [99] M. S. IRFAN, S. PATEL, R. UMER, M. A. ALI et Y. DONG. “Thermal and morphological analysis of various 3D printed composite honeycomb cores”. In : *Composite Structures* 290.March (2022), p. 115517. ISSN : 02638223. DOI : 10.1016/j.compstruct.2022.115517. URL : <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115517>.
- [100] Seyed Hamid Reza SANEI et Diana POPESCU. “3d-printed carbon fiber reinforced polymer composites : A systematic review”. In : *Journal of Composites Science* 4.3 (2020). ISSN : 2504477X. DOI : 10.3390/jcs4030098.
- [101] Carlos BELEI, Jana JOERESSEN et Sergio T. AMANCIO-FILHO. “Fused-Filament Fabrication of Short Carbon Fiber-Reinforced Polyamide : Parameter Optimization for Improved Performance under Uniaxial Tensile Loading”. In : *Polymers* 14.7 (2022). ISSN : 20734360. DOI : 10.3390/polym14071292.
- [102] Ahmed ELKASEER, Stella SCHNEIDER et Steffen SCHOLZ. “Experiment-Based Process Modeling and Optimization for High-Quality and Resource-Efficient FFF 3D Printing”. In : *Applied Sciences* (2020).

- [103] Kaushal SHARMA et Raghavan JAYARAMAN. “Effect of FDM Printing Parameters on the Properties of Carbon Fiber Reinforced PET-G Composite”. In : *Proceeding of the Canadian Society for Mechanical Engineering Internation Congress* (2020). DOI : 10.32393/csme.2020.1285.
- [104] Peng WANG, Bin ZOU, Shouling DING, Lei LI et Chuanzhen HUANG. “Effects of FDM-3D printing parameters on mechanical properties and microstructure of CF/PEEK and GF/PEEK”. In : *Chinese Journal of Aeronautics* 34.9 (2021), p. 236-246. ISSN : 10009361. DOI : 10.1016/j.cja.2020.05.040. URL : <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.05.040>.
- [105] Ismail DURGUN et Rukiye ERTAN. “Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost”. In : *Rapid Prototyping Journal* 20.3 (2014), p. 228-235. ISSN : 13552546. DOI : 10.1108/RPJ-10-2012-0091.
- [106] J. NAGENDRA, M. K. SRINATH, S. SUJEETH, K. S. NARESH et M. S. GANESHA PRASAD. “Optimization of process parameters and evaluation of surface roughness for 3D printed nylon-aramid composite”. In : *Materials Today : Proceedings* 44 (2021), p. 674-682. ISSN : 22147853. DOI : 10.1016/j.matpr.2020.10.609. URL : <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.609>.
- [107] Pooja PATIL, Dharmendra SINGH, Sunil J. RAYKAR et Jaiprakash BHAMU. “Multi-objective optimization of process parameters of Fused Deposition Modeling (FDM) for printing Polylactic Acid (PLA) polymer components”. In : *Materials Today : Proceedings* 45 (2021), p. 4880-4885. ISSN : 22147853. DOI : 10.1016/j.matpr.2021.01.353. URL : <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.353>.
- [108] Qingjun DING, Xinyu LI, Denghui ZHANG, Gai ZHAO et Zhijun SUN. “Anisotropy of poly(lactic acid)/carbon fiber composites prepared by fused deposition modeling”. In : *Journal of Applied Polymer Science* 137.23 (2020), p. 1-11. ISSN : 10974628. DOI : 10.1002/app.48786.
- [109] P. ARJUN, V. K. BIDHUN, U. K. LENIN, V. P. AMRITHA, Ribin Varghese PAZHAMANNIL et P. GOVINDAN. “Effects of process parameters and annealing on the tensile strength of 3D printed carbon fiber reinforced polylactic acid”. In : *Materials Today : Proceedings* 62.P14 (2022), p. 7379-7384. ISSN : 22147853. DOI : 10.1016/j.matpr.2022.02.142. URL : <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.142>.
- [110] N. VIDAKIS, J. D. KECHAGIAS, M. PETOUSIS, F. VAKOFTSI et N. MOUNTAKIS. “The effects of FFF 3D printing parameters on energy consumption”. In : *Materials and Manufacturing Processes* 00.00 (2022), p. 1-18. ISSN : 15322475. DOI : 10.1080/

- 10426914.2022.2105882. URL : <https://doi.org/10.1080/10426914.2022.2105882>.
- [111] Xu ZHANG, Wei FAN et Tianxi LIU. “Fused deposition modeling 3D printing of polyamide-based composites and its applications”. In : *Composites Communications* 21.July (2020), p. 100413. ISSN : 24522139. DOI : 10.1016/j.coco.2020.100413. URL : <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100413>.
 - [112] Jikai LIU, Qian CHEN, Xuan LIANG et Albert C. TO. “Manufacturing cost constrained topology optimization for additive manufacturing”. In : *Frontiers of Mechanical Engineering* 14.2 (2019), p. 213-221. ISSN : 20950241. DOI : 10.1007/s11465-019-0536-z.
 - [113] Malte SCHRÖDER, Björn FALK et Robert SCHMITT. “Evaluation of cost structures of additive manufacturing processes using a new business model”. In : *Procedia CIRP* 30 (2015), p. 311-316. ISSN : 22128271. DOI : 10.1016/j.procir.2015.02.144. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.144>.
 - [114] G. COSTABILE, M. FERA, F. FRUGGIERO, A. LAMBIASE et D. PHAM. “Cost models of additive manufacturing : A literature review”. In : *International Journal of Industrial Engineering Computations* 8.2 (2016), p. 263-282. ISSN : 19232934. DOI : 10.5267/j.ijiec.2016.9.001.
 - [115] Manu SRIVASTAVA et Sandeep RATHEE. “Additive manufacturing : recent trends, applications and future outlooks”. In : *Progress in Additive Manufacturing* 7.2 (2021), p. 261-287. ISSN : 23639520. DOI : 10.1007/s40964-021-00229-8. URL : <https://doi.org/10.1007/s40964-021-00229-8>.
 - [116] N. HOPKINSON et P. DICKENS. “Analysis of rapid manufacturing - Using layer manufacturing processes for production”. In : *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C : Journal of Mechanical Engineering Science* 217.1 (2003), p. 31-40. ISSN : 09544062. DOI : 10.1243/095440603762554596.
 - [117] Martin BAUMERS, Phill DICKENS, Chris TUCK et Richard HAGUE. “The cost of additive manufacturing : Machine productivity, economies of scale and technology-push”. In : *Technological Forecasting and Social Change* 102 (2016), p. 193-201. ISSN : 00401625. DOI : 10.1016/j.techfore.2015.02.015. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2015.02.015>.
 - [118] Vincenzo LUNETTO, Paolo C. PRIARONE, Sami KARA et Luca SETTINERI. “A comparative LCA method for environmentally friendly manufacturing : Additive manufacturing versus Machining case”. In : *Procedia CIRP* 98 (2021), p. 406-411. ISSN :

22128271. DOI : 10.1016/j.procir.2021.01.125. URL : <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.125>.
- [119] Paul ALEXANDER, Seth ALLEN et Debasish DUTTA. “Part orientation and build cost determination in layered manufacturing”. In : *CAD Computer Aided Design* 30.5 (1998), p. 343-356. ISSN : 00104485. DOI : 10.1016/S0010-4485(97)00083-3.
 - [120] Giuseppe INGARAO et Paolo C. PRIARONE. “A comparative assessment of energy demand and life cycle costs for additive- and subtractive-based manufacturing approaches”. In : *Journal of Manufacturing Processes* 56.June (2020), p. 1219-1229. ISSN : 15266125. DOI : 10.1016/j.jmapro.2020.06.009. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.06.009>.
 - [121] Thibault LE GENTIL, Daniel THERRIAULT et Olivier KERBRAT. “A comprehensive methodology to support decision-making for additive manufacturing of short carbon-fiber reinforced polyamide 12 from energy, cost and mechanical perspectives”. In : *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 0123456789 (2023). ISSN : 14333015. DOI : 10.1007/s00170-023-11161-2. URL : <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11161-2>.
 - [122] Vincenzo TAGLIAFERRI, Federica TROVALUSCI, Stefano GUARINO et Simone VENETTACCI. “Environmental and economic analysis of FDM, SLS and MJF additive manufacturing technologies”. In : *Materials* 12.24 (2019). ISSN : 19961944. DOI : 10.3390/ma1224161.
 - [123] Marwan KHALID et Qingjin PENG. “Sustainability and environmental impact of additive manufacturing : A literature review”. In : *Computer-Aided Design and Applications* 18.6 (2021), p. 1210-1232. ISSN : 16864360. DOI : 10.14733/cadaps.2021.1210-1232.
 - [124] P. RAMESH et S. VINODH. “Analysis of factors influencing energy consumption of material extrusion-based additive manufacturing using interpretive structural modeling”. In : *Rapid Prototyping Journal* 27.7 (2021), p. 1363-1377. ISSN : 13552546. DOI : 10.1108/RPJ-05-2020-0100.
 - [125] Vincenzo LUNETTO, Paolo C PRIARONE, Manuela GALATI et Paolo MINETOLA. “On the correlation between process parameters and specific energy consumption in fused deposition modelling”. In : *Journal of Manufacturing Processes* 56.June (2020), p. 1039-1049. ISSN : 1526-6125. DOI : 10.1016/j.jmapro.2020.06.002.
 - [126] Carmita CAMPOSECO-NEGRETE, Julio VARELA-SORIANO et José Jorge ROJAS-CARREÓN. “The effects of printing parameters on quality, strength, mass, and processing time of polylactic acid specimens produced by additive manufacturing”. In : *Progress in Ad-*

- ditive Manufacturing* 6.4 (2021), p. 821-840. ISSN : 23639520. DOI : 10.1007/s40964-021-00198-y. URL : <https://doi.org/10.1007/s40964-021-00198-y>.
- [127] S. KARA et W. LI. “Unit process energy consumption models for material removal processes”. In : *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60.1 (2011), p. 37-40. ISSN : 00078506. DOI : 10.1016/j.cirp.2011.03.018.
 - [128] Vijaypal POONIA, Rishi KUMAR, Rakhee KULSHRESTHA et Kuldip Singh SANGWAN. “Optimization of Specific Energy, Scrap, and Surface Roughness in 3D Printing Using Integrated ANN-GA Approach”. In : *Procedia CIRP* 116 (2023), p. 324-329. ISSN : 22128271. DOI : 10.1016/j.procir.2023.02.055. URL : <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.055>.
 - [129] Mazyar YOSOFI, Olivier KERBRAT et Pascal MOGNOL. “Additive manufacturing processes from an environmental point of view- a new methodology for combining technical, economic, and environmental predictive models”. In : *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 102.Section 2 (2019), p. 4073-4085. ISSN : 14333015. DOI : 10.1007/s00170-019-03446-2.
 - [130] Martin BAUMERS, Chris TUCK, Ricky WILDMAN, Ian ASHCROFT et Richard HAGUE. “Energy inputs to additive manufacturing : does capacity utilization matter ?” In : *Eos* 1000.270 (2011), p. 30-40.
 - [131] Yanchun LUO, Zhiming JI, Ming C. LEU et Reggie CAUDILL. “Environmental performance analysis of solid freeform fabrication processes”. In : *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment* (1999), p. 1-6. DOI : 10.1109/isee.1999.765837.
 - [132] Pascal MOGNOL, Denis LEPICART et Nicolas PERRY. “Rapid prototyping : energy and environment in the spotlight”. In : *Rapid Prototyping Journal* 1.June 2005 (2006), p. 26-34. DOI : 10.1108/13552540610637246.
 - [133] Stefan JUNK et Samantha CÔTÉ. “A practical approach to comparing energy effectiveness of rapid prototyping technologies”. In : *Proceedings of AEPR'12* June (2012), p. 12-14.
 - [134] Hae Sung YOON, Jang Yeob LEE, Hyung Soo KIM, Min Soo KIM, Eun Seob KIM, Yong Jun SHIN, Won Shik CHU et Sung Hoon AHN. “A comparison of energy consumption in bulk forming, subtractive, and additive processes : Review and case study”. In : *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology* 1.3 (2014), p. 261-279. ISSN : 21980810. DOI : 10.1007/s40684-014-0033-0.

- [135] Vincent A BALOGUN, Neil KIRKWOOD et Paul T MATIVENGA. “Energy consumption and carbon footprint analysis of Fused Deposition Modelling : A case study of RP Stratasys Dimension SST FDM”. In : *International Journal of Scientific & Engineering Research* 6.8 (2015), p. 442-447.
- [136] Mazyar YOSOFI, Olivier KERBRAT et Pascal MOGNOL. “Energy and material flow modelling of additive manufacturing processes”. In : *Virtual and Physical Prototyping* 13.2 (2018), p. 83-96. ISSN : 17452767. DOI : 10.1080/17452759.2017.1418900. URL : <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1418900>.
- [137] Jingchao JIANG, Xun XU et Jonathan STRINGER. “Optimization of process planning for reducing material waste in extrusion based additive manufacturing”. In : *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 59.April (2019), p. 317-325. ISSN : 07365845. DOI : 10.1016/j.rcim.2019.05.007. URL : <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.05.007>.
- [138] Li YI, Tianwen CHEN, Svenja EHMTEN, Christopher GLÄSSNER et Jan C. AURICH. “A study on impact factors of the energy consumption of the fused deposition modeling process using two-level full factorial experiments”. In : *Procedia CIRP* 93 (2020), p. 79-84. ISSN : 22128271. DOI : 10.1016/j.procir.2020.03.036.
- [139] Carmita CAMPOSECO-NEGRETE. “Optimization of printing parameters in fused deposition modeling for improving part quality and process sustainability”. In : *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 108.7-8 (2020), p. 2131-2147. ISSN : 14333015. DOI : 10.1007/s00170-020-05555-9.
- [140] Iacopo BIANCHI, Archimede FORCELLESE, Tommaso MANCIA, Michela SIMONCINI et Alessio VITA. “Process parameters effect on environmental sustainability of composites FFF technology”. In : *Materials and Manufacturing Processes* 37.5 (2022), p. 591-601. ISSN : 15322475. DOI : 10.1080/10426914.2022.2049300. URL : <https://doi.org/10.1080/10426914.2022.2049300>.
- [141] Constantine DAVID, Dimitrios SAGRIS, Markos PETOUSIS, Nektarios K NASIKAS, Amalia MOUTSOPOULOU, Evangelos SFAKIOTAKIS, Nikolaos MOUNTAKIS, Chrysa CHAROU et Nektarios VIDAKIS. “Operational Performance and Energy Efficiency of MEX 3D Printing with Polyamide 6 (PA6) : Multi-Objective Optimization of Seven Control Settings Supported by L27 Robust Design”. In : *Applied Sciences* 13.15 (2023). DOI : 10.3390/app13158819.

- [142] Morteza ALIZADEH, Mehrnaz Noroozi ESFAHANI, Wenmeng TIAN et Junfeng MA. “Data-Driven Energy Efficiency and Part Geometric Accuracy Modeling and Optimization of Green Fused Filament Fabrication Processes”. In : *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME* 142.4 (2020), p. 1-9. ISSN : 10500472. DOI : 10.1115/1.4044596.
- [143] M. F. ASHBY. “Multi-objective optimization in material design and selection”. In : *Acta Materialia* 48.1 (2000), p. 359-369. ISSN : 13596454. DOI : 10.1016/S1359-6454(99)00304-3.
- [144] Vincenzo LUNETTO, Manuela GALATI, Luca SETTINERI et Luca IULIANO. “Sustainability in the manufacturing of composite materials : A literature review and directions for future research”. In : *Journal of Manufacturing Processes* 85.December 2022 (2023), p. 858-874. ISSN : 15266125. DOI : 10.1016/j.jmapro.2022.12.020. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.12.020>.
- [145] Mohamed ZEMZEM, Ludwig VINCHES et Stéphane HALLÉ. *Exposition des travailleurs aux particules ultrafines et aux composés organiques volatils émis lors d'un processus d'impression 3D - État des lieux au Québec (2ème édition)*. Rapp. tech. Montréal : École de technologie supérieur de Montréal ; Université de Montréal, 2022, p. 83.
- [146] AFNOR. *ISO/ASTM 52902 :2023 - Fabrication additive — Pièces types d'essai — Évaluation de la capacité géométrique des systèmes de fabrication additive*. Rapp. tech. AFNOR, 2023.