

Titre:	Les effets de la température lors de la fabrication additive par FDM de composites thermoplastiques renforcés et leurs propriétés mécaniques
Title:	
Auteur:	Chloé Hérard
Author:	
Date:	2017
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence:	Hérard, C. (2017). Les effets de la température lors de la fabrication additive par FDM de composites thermoplastiques renforcés et leurs propriétés mécaniques [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/2681/
Citation:	

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/2681/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Daniel Therriault
Advisors:

Programme: Génie mécanique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

LES EFFETS DE LA TEMPÉRATURE LORS DE LA FABRICATION ADDITIVE PAR FDM
DE COMPOSITES THERMOPLASTIQUES RENFORCÉS ET LEURS PROPRIÉTÉS
MÉCANIQUES

CHLOÉ HÉRARD

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)

JUILLET 2017

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

LES EFFET DE LA TEMPÉRATURE LORS DE LA FABRICATION ADDITIVE PAR FDM
DE COMPOSITES THERMOPLASTIQUES RENFORCÉS ET LEURS PROPRIÉTÉS
MÉCANIQUES

présenté par : HÉRARD Chloé

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

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

M. LÉVESQUE Martin, Ph. D., président

M. THERRIAULT Daniel, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. VIRGILIO Nick, Ph. D, membre

REMERCIEMENTS

Dans un premier temps, j'aimerais remercier chaleureusement le Professeur Daniel Therriault pour m'avoir acceptée en tant qu'étudiante à la maîtrise sous sa direction, malgré les conditions délicates dans lesquelles nous étions. Je tiens à le remercier pour son implication, ses conseils et son sourire qui m'ont permis de m'investir pleinement dans mon projet et d'y prendre du plaisir. De plus, je le remercie sincèrement d'avoir finalement réussi à me verser une aide financière, qui va me permettre de rembourser plus facilement mon prêt réalisé en France pour financer ces deux années d'études à Montréal.

Je tiens aussi à remercier tous les membres du Laboratoire de Mécanique Multi-échelles (LM²), qui se sont toujours rendu disponible pour me former sur un équipement, m'aider, me conseiller ou simplement m'écouter. Un grand merci spécialement à Yahya Abderrafai pour son partage de connaissances sur la technologie de fabrication par déposition de filament fondu (FDM) et son épaullement lors de mes travaux au laboratoire. Merci aussi à Ilyass Tabiai pour son aide efficace lorsque j'avais besoin au cours de mes essais.

Je souhaite également remercier l'École des Mines d'Albi et l'École Polytechnique de Montréal pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser ce double diplôme.

Enfin, j'aimerais remercier mon conjoint et mes colocataires, qui m'ont apporté un très grand support moral et m'ont permis de vivre deux années de maîtrise inoubliables à Montréal.

RÉSUMÉ

La Fabrication Additive se développe rapidement dans de nombreux domaines, allant du médical à l'aérospatial, car elle permet la fabrication de pièces aux formes complexes, difficilement réalisables par les méthodes conventionnelles. Cependant, les pièces obtenues, notamment avec la technologie de fabrication par déposition de filaments fondus (FDM), ne sont pas encore aussi performantes que souhaitées. En effet, le procédé implique une perte en propriétés mécaniques comparée à la matière première utilisée, qui plus est limitée aux thermoplastiques. Avec la maturité des matériaux composites, le renforcement des filaments permet d'améliorer ses propriétés et des efforts sont réalisés afin de maîtriser au mieux la technologie. D'autre part, des thermoplastiques hautes températures, résistants à des températures plus élevées que les plastiques techniques, sont désormais disponibles sous forme de filaments. Le défi d'obtenir par FDM des pièces fonctionnelles et idéalement capables de garder de bonnes propriétés à hautes températures, comme le requiert le secteur de l'aéronautique, reste à relever.

Ce mémoire présente d'abord une étude de l'effet d'une élévation de la température environnementale d'impression sur les propriétés mécaniques des pièces obtenues à partir d'un thermoplastique et de composite-thermoplastiques. Des filaments de plusieurs teneurs massiques en deux types de fibres de carbones courtes, des *milled* (m-CF) et des *chopped* (c-CF), ont été utilisés pour imprimer des éprouvettes dans deux configurations, l'une avec une orientation des filaments dans le sens de la longueur (FL) et l'autre dans la largeur (FW). Une chambre chauffante a permis d'imprimer à une température modérée (35°) et à des températures plus élevées (50°C et 60°C), et des tests en traction assistés par corrélation d'images digitales ont été réalisés. Des gains de 36%, 34% et 68% sur le module d'Young (E), la résistance élastique (σ_y) et la résistance ultime en traction (S_u), respectivement, ont été obtenus en chauffant à 35°C lors de l'impression des échantillons de configuration FW en Nylon renforcé à 35% de fibres m-CF. Chauffer aux plus hautes températures a permis des gains légèrement supérieurs et une meilleure reproductibilité des propriétés. Une tendance similaire a été relevée avec un filament renforcé à 40% des mêmes fibres, ce qui n'a pas été le cas avec du Nylon pur. Les effets de la teneur et du type de fibres sur les propriétés mécaniques ont aussi été étudiés. Les meilleures performances ont été obtenues sur les échantillons imprimés en configuration FL avec le filament de Nylon renforcé à 35% de c-CF, soient les plus longues. Un E de 8,8 GPa, une σ_y de 64 MPa et une S_u de

89,4 MPa ont été alors atteints, comparés à des valeurs de 5,2 GPa, 36,8 MPa et 46,4 MPa, respectivement, avec le filament renforcé à 35% de m-CF. Même à une teneur de 40% de ces dernières, des performances inférieures à celles obtenues avec 35% de c-CF ont été relevées.

Des travaux d'impression de filaments de PC, PEI et PEEK, des thermoplastiques à moyennes et hautes températures, sont ensuite présentés. La méthode utilisée a permis de suggérer des températures d'impression permettant d'obtenir une bonne qualité. Elle passe par l'impression de différents modèles de barres et leur observation au microscope optique. Une température d'extrusion de 280°C et un lit à 120°C sont finalement suggérés pour imprimer du PC avec notre imprimante de Type Prusia i3, et de 360°C et 130°C, respectivement, dans le cas de filament de PEI.

Enfin, les résultats de ce projet pourraient servir de références aux travaux qui vont suivre, appuyer le choix d'un thermoplastique haute température à renforcer et aider à définir les paramètres à utiliser afin d'imprimer par FDM des pièces à partir de ces filaments renforcés.

ABSTRACT

Additive Manufacturing is rapidly developing in many fields ranging from medicine to aerospace because it allows the manufacture of parts with complex shapes not easily realizable by conventional methods. However, the parts obtained, in particular by Fused Deposition Modeling (FDM), are not yet as efficient as desired, since the process involves a loss of mechanical properties compared to the raw material used, furthermore limited to thermoplastics. With the maturity of composite materials, filaments reinforcement makes it possible to enhance its properties and efforts are made in order to better master the technology. Besides, high temperature thermoplastics, which are more resistant at higher temperatures than technical plastics, are now available as filaments. The challenge of obtaining by FDM functional parts and ideally capable of maintaining good properties at high temperatures, as required in aeronautics, remains to be taken.

This master's thesis first presents a study on the effect of an increase in the environmental printing temperature on the mechanical properties of parts obtained from thermoplastics and reinforced thermoplastic-based composites. Filaments of several weight contents of two short carbon fiber types, milled (m-CF) and chopped (c-CF), were used to print test specimens in two configurations, one with filament orientation in the direction of the length (FL) and the other in the width (FW). A heated chamber allowed printing at a moderate temperature (35°C) and higher temperatures (50°C and 60°C) and tensile tests assisted by digital images correlation were performed. Gains of 36%, 34% and 68% on Young modulus (E), yield strength (σ_y) and ultimate tensile strength (S_u), respectively, were obtained by heating at 35°C upon printing of specimens with the 35% m-CF reinforced Nylon in FW configuration. Heating at higher temperatures allowed slightly higher gains and improved reproducibility of properties. A similar trend was observed with a filament reinforced to 40% of the same fibers, which was not the case with neat Nylon. The effects of contents and type of fibers on the mechanical properties have also been studied. The best performances were obtained on the samples printed in the FL configuration with the 35% c-CF reinforced Nylon filament, so the one reinforced with the longest fiber and at the highest content. An E of 8.8 GPa, a σ_y of 64 MPa and a S_u of 89.4 MPa are then reached, compared with values of 5.2 GPa, 36.8 MPa and 46.4 MPa, respectively, with the 35% m-CF

reinforced Nylon filament. Even at a 40% content of the latter, performances lower than those obtained with 35% c-CF are noted.

Printing works of PC, PEI and PEEK filaments, medium and high temperature thermoplastics, are then presented. A method of finding the print temperatures to be used in order to obtain the best quality is followed. It passes through the printing of different models of bars and their observation under an optical microscope. An extrusion temperature of 280°C and a bed set to 120°C are finally suggested to print PC with our Prusia Type i3 printer, and one of 360°C with the bed set to 130°C in the case of PEI filament.

Finally, the results of this project could serve as references to the work that will follow, guide the choice of a high temperature thermoplastic to be reinforced and help define the parameters to be used in order to print parts from these reinforced filaments by FDM.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT.....	VI
TABLE DES MATIÈRES	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES FIGURES	XIII
LISTE DES ANNEXES.....	XVI
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	4
2.1 Défis de la technologie de fabrication par dépôt de matière fondue (FDM).....	5
2.1.1 Matière première utilisée.....	5
2.1.2 Effets de la technique comparés aux autres méthodes de fabrication	6
2.1.3 Effets des paramètres d'impression.....	10
2.2 Amélioration des propriétés mécaniques des pièces imprimées	12
2.2.1 Filaments renforcés	12
2.2.2 Paramètres optimaux et propriétés obtenues	16
2.3 Effets des paramètres de température.....	20
2.3.1 Température de la buse d'extrusion	20
2.3.2 Température de la plateforme d'impression.....	21
2.3.3 Phénomènes thermiques et températures environnementales	22
2.4 Thermoplastiques Hautes Températures (THP)	24
2.4.1 Définitions et caractéristiques	24
2.4.2 Utilisation dans le procédé de FDM.....	27

2.4.3 Paramètres optimaux de températures et d'impression de PEI et PEEK	30
CHAPITRE 3 DÉMARCHE ET PERTINENCE DES TRAVAUX RÉALISÉS	37
3.1 Démarche du travail de recherche	37
3.2 Contexte et cohérence avec les objectifs de la recherche collaborative avec SAFRAN	38
CHAPITRE 4 EFFET DE LA TEMPÉRATURE ENVIRONNEMENTALE D'IMPRESSION ET PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES	40
4.1 Méthode expérimentale	40
4.1.1 Procédure d'impression.....	40
4.1.2 Essais de traction assistés par DIC	45
4.2 Résultats	50
4.2.1 Effets de la température environnementale d'impression ($T_{chambre}$)	51
4.2.2 Effets de différentes teneurs de deux types de CF à $T_{chambre}$ fixée	58
4.2.3 Observations au MEB	66
4.3 Synthèse et discussion.....	69
CHAPITRE 5 IMPRESSION DE FILAMENTS THP ET LEURS PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES.....	71
5.1 Procédure expérimentale	71
5.1.1 Matériaux	71
5.1.2 Impression par FDM	72
5.1.3 Plan d'expérimentation	75
5.1.4 Observations au microscope optique.....	75
5.1.5 Essais de traction assistés par DIC	76
5.2 Résultats	77
5.2.1 Cas du PC	77
5.2.2 Cas du PEI.....	81

5.2.3 Cas du PEEK.....	84
CHAPITRE 6 DISCUSSION GÉNÉRALE	88
6.1 Influence du contrôle de la température environnementale d'impression	88
6.2 Potentiel des filaments THP	89
CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	91
RÉFÉRENCES.....	93
ANNEXES.....	102

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1: Synthèse des filament-composites mis en forme et leurs effets	14
Tableau 2-1 (suite): Synthèse des filament-composites mis en forme et leurs effets	15
Tableau 2-2: Paramètres d'impression optimaux et propriétés mécaniques relevés dans la littérature	17
Tableau 2-2 (suite): Paramètres d'impression optimaux et propriétés mécaniques relevés dans la littérature	18
Tableau 2-2 (suite): Paramètres d'impression optimaux et propriétés mécaniques relevés dans la littérature	19
Tableau 2-3: Principales propriétés des THP courants [63].....	26
Tableau 2-4: Fabricants de filaments THP et leurs principales caractéristiques.....	29
Tableau 2-4 (suite): Fabricants de filaments THP et leurs principales caractéristiques	30
Tableau 2-5: Synthèse des paramètres d'impression évalués et des résultats obtenus par FDM avec des filaments de PEI.....	32
Tableau 2-6: Synthèse des paramètres d'impression évalués et des résultats obtenus par FDM avec des filaments de PEEK.....	33
Tableau 2-6 (suite): Synthèse des paramètres d'impression évalués et des résultats obtenus par FDM avec des filaments de PEEK.....	34
Tableau 4-1: Désignation et composition des filaments fabriqués	41
Tableau 4-2: Valeurs des températures et des paramètres du chemin d'impression.	43
Tableau 4-3: Récapitulatif des éprouvettes imprimées	45
Tableau 4-4 : Tableau-synthèse des propriétés obtenues avec les différents filaments dans des conditions spécifiées	69
Tableau 5-1: Températures d'impression recommandées pour chacun des matériaux	72
Tableau 5-2: Paramètres du chemin d'impression utilisés pour chaque barrette.....	74
Tableau 5-3: Températures d'impression utilisées pour les barrettes.....	75

Tableau 5-4: Observations MO des barrettes de PC imprimées à différentes T_{extr}	78
Tableau 5-4 (suite): Observations MO des barrettes de PC imprimées à différentes T_{extr}	79
Tableau 5-5: Températures d'impression suggérées pour le PC	80
Tableau 5-6 : Observations MO des barrettes de PEI imprimées à différentes T_{extr}	82
Tableau 5-6 (suite) : Observations MO des barrettes de PEI imprimées à différentes T_{extr}	83
Tableau 5-7: Températures d'impression suggérées pour le PEI	84
Tableau 5-8: Observations MO des barrettes de PEEK imprimées à différentes T_{extr}	86
Tableau 5-8 (suite): Observations MO des barrettes de PEEK imprimées à différentes T_{extr}	87

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1: Courbes contrainte-déformation à température ambiante et sous une atmosphère sèche [19]	7
Figure 2-2: Micrographies MEB de surfaces de fracture d'un échantillon a) d'ABS et b) d'ABS renforcé de 10 wt.% de fibres carbone imprimés par FDM [17]	8
Figure 2-3: a) Processus d'impression 3D b) Séquence de fabrication par système de dépôt de nanocomposite [22] et c) Procédé de FDM [21]	9
Figure 2-4: a) Les trois directions d'impression possibles et b) principaux paramètres du chemin d'impression [23, 24]	10
Figure 2-5: Effet de la température de la buse sur a) les courbes contrainte-déformation des structures imprimées en ABS et b) la viscosité de l'ABS [49]	21
Figure 2-6: Profil de température d'un filament déposé dans un environnement d'impression chauffé à 50°C, 60°C et 70°C [58]	23
Figure 2-7: Classification des principaux thermoplastiques	25
Figure 2-8: Schémas des dispositifs d'impression 3D de PEEK par a) seringue et b) FDM utilisés [61]	27
Figure 2-9: a) Schéma de principe de l'extrudeuse utilisée pour l'extrusion réactive, b) réaction de polymérisation continue et c) filament PI obtenu [62]	28
Figure 2-10: a) Exemple de BAAM et b) moule d'autoclave imprimé avec du PPS/50%CF [66]	29
Figure 2-11: Influence de a) la température de l'extrudeur et b) la température de la chambre sur la déformation et c) imprimante fabriquée et ses constituants [71]	36
Figure 4-1: a) Nylon PA 12 sous forme de granulés et fibres de carbone courtes de type b) moulues ou <i>milled</i> et c) hachées ou <i>chopped</i> [44]	41
Figure 4-2: L'imprimante FDM de Leapfrog utilisée et ses principaux constituants	42
Figure 4-3: Configurations a) FL et b) FW des échantillons imprimés	43
Figure 4-4: La chambre chauffante fabriquée au LM ² et ses composants a) porte ouverte b) porte fermée	44

Figure 4-5: Une éprouvette a) avant préparation b) après préparation	46
Figure 4-6: Ensemble du dispositif utilisé lors des tests de traction assistés par DIC	47
Figure 4-7: Exemple de photos de calibration dans 4 orientations différentes	48
Figure 4-8: Schéma explicatif du montage des éléments du système DIC	48
Figure 4-9: Analyse par DIC avec le déplacement V comme variable affichée et positions des extensomètres virtuels sur la première image analysée.	49
Figure 4-10: Exemple de courbe contrainte-déformation (σ - ϵ) et représentation graphique de E , σ_Y et S_u	50
Figure 4-11: Effets d'une élévation de la température de l'environnement d'impression sur les propriétés de traction d'éprouvettes imprimées en a) configuration FL et b) configuration FW (valeurs normalisées par rapport à celles à 25°C)	52
Figure 4-12: Effet d'une élévation de la température environnementale d'impression sur les valeurs de a) et b) E , c) et d) σ_Y et e) et f) S_u des échantillons de configuration FL et FW, respectivement.....	54
Figure 4-13: Effets d'une élévation de la température de l'environnement d'impression sur les propriétés de traction d'éprouvettes de configuration FW en a) Nylon pur et b) Nylon renforcé de 40% de m-CF (valeurs normalisées par rapport à celles obtenues à 25°C)	56
Figure 4-14: Effets d'une élévation de la température environnementale d'impression sur les valeurs de a) E , b) σ_Y et c) S_u des éprouvettes de configuration FW imprimées avec du 40% m-CF / Nylon	57
Figure 4-15: Effets de la teneur massique en m-CF sur a) et b) les propriétés d'échantillons imprimés à $T_{ambiante}$ en configuration FL et FW respectivement (valeurs normalisées par rapport à celles du Nylon pur) et c), d) et e) les valeurs de E , σ_Y et S_u dans les deux configurations, respectivement.....	59
Figure 4-15 (suite): Effets de la teneur massique en m-CF sur a) et b) les propriétés d'échantillons imprimés à $T_{ambiante}$ en configuration FL et FW respectivement (valeurs normalisées par rapport à celles du Nylon pur) et c), d) et e) les valeurs de E , σ_Y et S_u dans les deux configurations, respectivement.....	60

Figure 4-16: Effet de la teneur en a) m-CF et b) c-CF sur les propriétés mécaniques (valeurs normalisées par rapport à celles du Nylon) et sur les valeurs de c) E , d) σ_Y et e) S_u	62
Figure 4-16 (suite): Effet de la teneur en a) m-CF et b) c-CF sur les propriétés mécaniques (valeurs normalisées par rapport à celles du Nylon) et sur les valeurs de c) E , d) σ_Y et e) S_u	63
Figure 4-17: Effet du type de fibres sur les valeurs de a) et b) E , c) et d) σ_Y et e) et f) S_u des échantillons de configuration FL et FW, respectivement et imprimés à $T_{chambre} = 35^\circ C$	65
Figure 4-18: Images MEB des faciès de rupture d'éprouvettes a) et b) de Nylon imprimées à $25^\circ C$ en configuration FL et FW, respectivement; et c) et d) de 35% m-CF / Nylon imprimées à $35^\circ C$ en configuration FL et FW, respectivement.....	66
Figure 4-19: Images MEB des faciès de rupture d'éprouvettes de 40% m-CF / Nylon imprimées à a) $25^\circ C$ et b) et c) $35^\circ C$	67
Figure 4-20: Images MEB de a) et b) m-CF sur des faciès d'échantillons de 35% m-CF / Nylon de configurations FL et FW, respectivement et de c) et d) c-CF sur des faciès d'échantillons de 35% c-CF / Nylon de configurations FL et FW, respectivement et imprimés à $35^\circ C$	68
Figure 5-1: Bobines de filaments de a) PC et b) PPSU, PEI et PEEK	71
Figure 5-2: a) Imprimante de type Prusa i3 et b) sa tête extrudeuse Dyze Design avec système de refroidissement	73
Figure 5-3: Configurations a) FL et b) FW des barrettes 3 et 4 imprimées	74
Figure 5-4: Microscope optique Olympus SZX-12 et ses constituants.....	76
Figure 5-5: Valeurs de a) E , b) σ_Y et c) S_u des éprouvettes de PC dans les deux configurations... <td>80</td>	80
Figure A-1: Procédure choisie et mise en œuvre lors de travaux antérieurs [43, 44]	102
Figure B-1: Modèle CAO initial de la chambre chauffante avec possibilité de placer la bobine à l'intérieur ou à l'extérieur, en vue a) de devant b) de derrière. [72].....	101

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A – PROCÉDURE DE FABRICATION DES FILAMENTS.....	102
ANNEXE B – MODÈLE CAO INITIAL DE LA CHAMBRE.....	103

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

La fabrication additive apparaît dans le dernier quart du 20^{ème} siècle, avec la stéréolithographie (SLA) de C.Hull [2]. Depuis, de nombreuses techniques ont été développées, chacune ayant leurs avantages et leurs inconvénients. Les plus populaires aujourd’hui sont la modélisation par dépôt de fil en fusion (FDM ou FFF), la stéréolithographie (SLA) et le frittage sélectif par laser (SLS). Concernant les matériaux utilisés, les plastiques constituent la principale matière première. Au début, principalement limitée à l’Acrylonitrile Butadiène Styrene (ABS) et à l’Acide Polylactique (PLA), la gamme des plastiques disponibles pour l'impression en trois dimensions (3D) est considérable. De nombreuses options de couleurs et de propriétés sont proposées. Initialement réservée à des fins de prototypages, l'avancée des matériaux thermoplastiques et des composites permet désormais à la fabrication additive d'être utilisée pour la production de pièces fonctionnelles [2, 3]. Afin de développer ce champ d'application, la technologie de FDM se doit de concurrencer les autres procédés de fabrication plus conventionnels, en permettant d'obtenir des pièces présentant d'aussi bonnes, voire de meilleures propriétés mécaniques. Pour cela, d'une part une bonne maîtrise de la technique est nécessaire, ce qui passe par l'utilisation de paramètres d'impression optimaux ; et d'autre part la tendance est au choix de matériaux plus performants, tels que les composites thermoplastiques renforcés et les thermoplastiques hautes performances / hautes températures.

Cette dernière famille de thermoplastiques suscite l'intérêt depuis la fin des années 50, dans les secteurs de l'aéronautique et de l'électronique, car elle rassemble les polymères pouvant notamment résister à des températures plus élevées que les plastiques de commodité. Nombreuses sont les dénominations attribuées à ces matériaux : thermoplastiques hautes performances, polymères à hautes températures, matériaux d'ingénierie avancée, etc. Pour éviter toutes confusions, nous utiliserons dans la suite de ce présent document l'appellation de thermoplastiques hautes performances (THP). Leur développement a été sporadique, notamment freiné par leur prix élevé et les difficultés rencontrées lors de leur mise en forme. Les premiers Polyimides (PI) et Polyaryléthercétones (PAEK), comme le Polyéthercétone (PEK) et le Polyétheréthercétone (PEEK) sont commercialisés entre les années 60 et 70 [4]. À partir de 1993, la société Victrex, basée au Royaume-Uni, prend la tête du marché de la famille des PEAKs et en demeure aujourd’hui encore le leader mondial. Citons aussi l'entreprise de chimie allemande

Degussa et la compagnie belge Solvay, qui ont chacune participé au développement de la production de PEEK, puis GE Plastics qui commercialise à partir de 2007 des résines Thermoplastiques Polyimide (TPI) [5]. En 2009, la société Stratasys, qui a breveté la technologie de FDM, propose les premiers filaments de THP compatibles avec sa technique de fabrication additive [6]. En 2017, Stratasys élargit encore sa gamme de matériaux pour FDM en proposant un filament de Nylon renforcé en fibre de carbone [7]. Au cours des dernières années, d'autres entreprises se sont insérées dans ce marché du filament. Dans la recherche, des travaux ont été lancés afin de mieux maîtriser l'impression de filament THP et d'étudier les propriétés des pièces fabriquées avec ce type de filament.

Ce projet a pour objectif principal d'obtenir des pièces imprimées par FDM aux propriétés mécaniques améliorées. Pour y parvenir, deux approches différentes ont été investiguées. La première a été de poursuivre des travaux initiés au sein de notre laboratoire portant sur les effets d'une élévation de la température environnementale d'impression. Plus précisément, l'influence de la température de la chambre sur les propriétés mécaniques d'éprouvettes imprimées avec des filaments de Nylon PA12 pur et renforcés en fibres de carbone courtes, fabriqués en interne, a été étudiée. Plusieurs teneurs de deux types de fibres ont été testées, et les effets de cette teneur ont aussi été étudiés. La seconde approche a eu pour but d'investiguer l'impression de filaments de thermoplastiques moyennes et hautes températures, et plus particulièrement de polycarbonate (PC), polyétherimide (PEI) et PEEK. Pour cela, une recherche des paramètres de températures à utiliser lors de l'impression de ces filaments afin d'obtenir des pièces de bonne qualité a été menée. Dans le cas du PC, des éprouvettes ont alors pu être imprimées et caractérisées mécaniquement.

Les travaux présentés dans ce mémoire s'inscrivent dans une collaboration de recherche sur la fabrication additive de composites réalisée en collaboration entre le Laboratoire de Mécaniques Multi-échelles (LM²) et le groupe industriel et technologique français SAFRAN. Des travaux ont déjà été réalisés au sein de cette collaboration, comme notamment la fabrication de filament-composites et d'une chambre chauffante capable d'accueillir une imprimante FDM.

Tout d'abord, une revue de littérature est présentée au Chapitre 1, abordant à la fois les enjeux de la technologie de FDM et l'impression de THP. Ensuite, la méthodologie employée et la pertinence des travaux réalisés sont discutées au Chapitre 2. Le Chapitre 3 est consacré à l'étude

de l'effet de la température environnementale d'impression, suivi par le Chapitre 4 où l'impression de PC, PEI et PEEK par FDM est mise à l'étude. Au Chapitre 5, une discussion sur les perspectives qu'apportent ces travaux est proposée. Enfin, les conclusions tirées sont rassemblées dans la dernière partie et des recommandations pour les travaux futurs sont suggérées.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

La technologie de FDM est un procédé de mise en forme de matières plastiques par dépôt de filaments fondus couche par couche jusqu'à l'obtention de la pièce souhaitée. Celle-ci est préalablement créée à l'aide d'un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO), puis le modèle 3D obtenu est découpé en plusieurs couches par un « slicer » avant d'être envoyé à l'imprimante [8]. De nombreux paramètres d'impressions doivent alors être réglés, allant de la température de la tête extrudeuse et de la plateforme sur laquelle les couches successives sont déposées, aux spécificités du chemin d'impression. Parmi ces dernières, citons la distance entre deux filaments voisins sur une même couche ou encore leur angle d'orientation par rapport au repère de la plateforme d'impression. Tous ces paramètres ont évidemment un impact sur le temps d'impression et la qualité de la pièce fabriquée. Ainsi, de nombreux travaux ont été réalisés afin de caractériser l'effet de ces paramètres d'impression, notamment sur les propriétés mécaniques des pièces imprimées. Des paramètres optimaux pour chaque type de polymères thermoplastiques utilisés comme matière première ont été obtenus.

Ce chapitre présente une revue de littérature en lien avec le projet de recherche. En premier lieu, les défis qu'implique la technologie de FDM sont exposés, en se penchant sur l'étendue des matériaux compatibles, en la comparant à d'autres procédés de mise en forme et en étudiant les effets des paramètres d'impression. En second lieu, les résultats de travaux ayant pour but de rendre ce procédé plus efficient par renforcement de la matière première utilisée ou par obtention de paramètres optimaux d'impression sont évoqués. Ensuite, une revue des recherches portant sur les effets des différentes températures du procédé, contrôlées ou non, est réalisée. Enfin, une présentation de la classe des thermoplastiques à hautes températures est proposée et les études portant sur leur utilisation dans la technologie de FDM sont rassemblées.

2.1 Défis de la technologie de fabrication par dépôt de matière fondu (FDM)

L'idée de cette technologie de fabrication par dépôt de filament en fusion provient de S. Scott Crump, qui déposa un brevet et fonda en 1989 avec sa femme la compagnie Stratasys. Trois ans plus tard, la première machine d'impression est proposée sur le marché et en 1996, la compagnie possède déjà 25% du marché de la fabrication additive [9]. L'abréviation FDM est une marque déposée par Stratasys, et pour cette raison, l'abréviation FFF qui signifie « fabrication par fusion de filament » est aussi employée pour évoquer cette technologie [10]. Elle possède l'avantage de permettre une fabrication des pièces de façon plus efficace, en offrant un cycle de conception plus court et souvent à moindre coût comparé aux méthodes soustractives traditionnelles. Elle génère aussi moins de déchets, permet la réalisation d'objets aux formes complexes, et rend la personnalisation possible. Cependant, elle n'est pas encore réalisable avec autant de matériaux que les méthodes conventionnelles, ce qui limite considérablement son utilisation [11, 12]. En effet, seul certains polymères thermoplastiques, dont les caractéristiques seront décrites dans la section 2.1.1, sont compatibles avec cette technologie, qui doit alors pouvoir concurrencer la méthode de moulage plus couramment utilisée pour mettre en forme ces polymères. Or, la nature même du procédé de fabrication par couche rend l'obtention de bonnes propriétés mécaniques plus délicate, d'autant plus que des paramètres d'impressions inadaptés altèrent aussi la qualité obtenue, ce qui est démontré dans les sections 2.1.2 et 2.1.3.

2.1.1 Matière première utilisée

Les polymères, appelés plus couramment les plastiques, peuvent être divisés en deux grandes familles : les thermodurcissables et les thermoplastiques. Leur principale différence est leur transformation face à la température : les premiers sont infusibles donc non transformables et solidifieront de manière irréversible suite à un chauffage ou une réaction chimique, tandis que les seconds possèdent une température de fusion (T_f) mais aussi une température de transition vitreuse (T_g). Au-dessus de cette température, inférieure à leur T_f , les thermoplastiques se ramollissent, et en dessous, ils redeviennent solides et ceci de manière réversible. Ils ont donc l'avantage de pouvoir être mis en forme plus d'une fois, et de ce fait sont considérés comme recyclables [13]. La technologie de FDM est principalement compatible avec cette catégorie de matériaux, bien qu'il soit aussi possible d'imprimer avec des filaments de bois, de pierre, de

céramiques ou encore des matières alimentaires, moyennant quelques adaptations sur la tête d'extrusion [8]. Par contre, tous les thermoplastiques ne peuvent pas être imprimés, seulement ceux ayant une viscosité appropriée à l'état fondu. En effet, ils doivent être suffisamment visqueux pour fournir un support structurel mais assez fluide pour permettre leur extrusion. De plus, ils doivent nécessairement être sous forme de filament afin de pouvoir être extrudés [12]. Les filaments thermoplastiques d'ABS, de PLA et de Nylon sont les plus couramment utilisés, car ils possèdent une température de fusion basse, ce qui permet leur extrusion à des températures voisines de 220°C, facilement atteignables par les imprimantes 3D. La plupart des travaux évoqués par la suite dans cette section sont réalisés avec l'un de ces matériaux.

Naturellement, la compagnie Stratasys a été la première à proposer une gamme de filaments compatibles avec sa technologie. Par contre en 2009, l'expiration de son brevet entraîne la création d'un nouveau marché : celui des filaments thermoplastiques, la matière première du procédé de FDM [14]. De nombreux fabricants de matières plastiques y voient une occasion d'affaires et, entre 2009 et 2014, plus d'une centaine de filaments différents sont proposés sur le marché. En effet, bien que le procédé soit limité par cette catégorie de matériaux, un large choix est tout de même possible en termes de couleurs, de propriétés et de prix [8]. Cependant, un nombre encore limité est imprimable, soit moins de 20 thermoplastiques disponibles sous forme de filaments, alors qu'il existe plus de 12 000 thermoplastiques industriels [3].

Aujourd'hui, le marché des filaments d'impression 3D peut être considéré comme mature, et la tendance est à l'amélioration de leurs propriétés mécaniques, afin de permettre une augmentation de celles des pièces obtenues après impression [15].

2.1.2 Effets de la technique comparés aux autres méthodes de fabrication

Dans la mesure où la technologie de FDM est une méthode de mise en forme de matières plastiques, elle doit permettre d'obtenir des résultats faisant concurrence aux autres méthodes. Ainsi, nombreux sont les travaux qui comparent les propriétés des pièces imprimées par FDM à celles obtenues par moulage par injection ou compression [16-19]. S. H. Ahn et al. [16] ont notamment testé en tension et en compression des échantillons fabriqués à partir du même matériau, l'ABS P400, les uns moulés par injection et les autres imprimés par FDM. Les résultats montrent que, même avec les paramètres d'impression les plus adaptés, la résistance en traction (S_u) des éprouvettes imprimées est inférieure celle des éprouvettes moulées, atteignant au

minimum 28% et au maximum 35% de sa valeur ($= 26 \text{ MPa}$). De même, la résistance en compression (S_c) des pièces imprimées est plus faible, mais seulement de 10%-20%, et s'avère avoir une valeur beaucoup plus élevée que celle en traction. Toujours avec l'ABS P400, d'autres chercheurs [19] ont aussi comparé les propriétés mécaniques de pièces imprimées et moulées par injection, mais en rajoutant des conditions de température et d'humidité. La Figure 2-1 représente les courbes de contrainte-déformation obtenues à température ambiante et en l'absence d'humidité pour des échantillons moulés (en noir) et des échantillons imprimés avec trois différentes orientations.

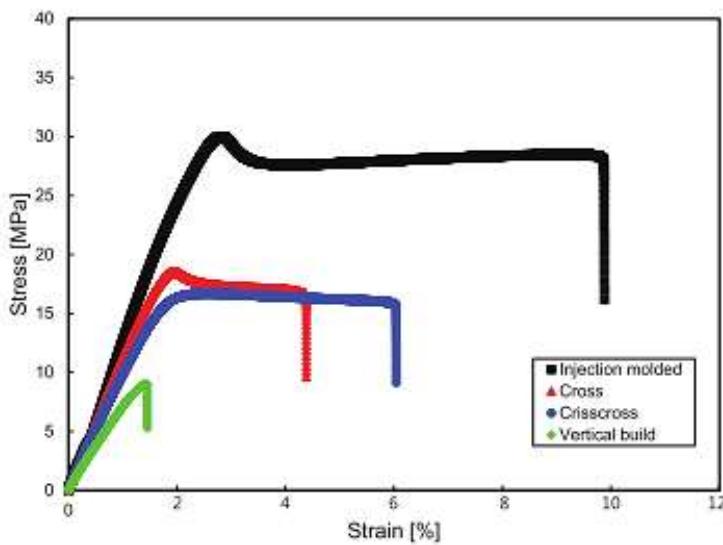


Figure 2-1: Courbes contrainte-déformation à température ambiante et sous une atmosphère sèche [19]

La valeur de la résistance en traction obtenue par impression varie, dépendamment des paramètres d'impression. Elle atteint une valeur équivalente à entre 26% et 56% la valeur de celle obtenue par moulage, qui s'élève à 32,6 MPa. Concernant les modules d'Young (E), ceux obtenus par impression valent entre 55% et 70% celui obtenu par moulage ($= 1,53 \text{ GPa}$). Un taux d'absorption de l'humidité des pièces fabriquées par FDM largement supérieur à celui des pièces moulées a aussi été relevé dans cette étude. Ceci témoigne de la présence de cavités dans les pièces imprimées, de porosités, aussi relevées par H. L. Tekinalp et al. [17] dont la Figure 2-2 montre des profils de rupture observés par MEB. La formation de creux de vide est nettement visible.

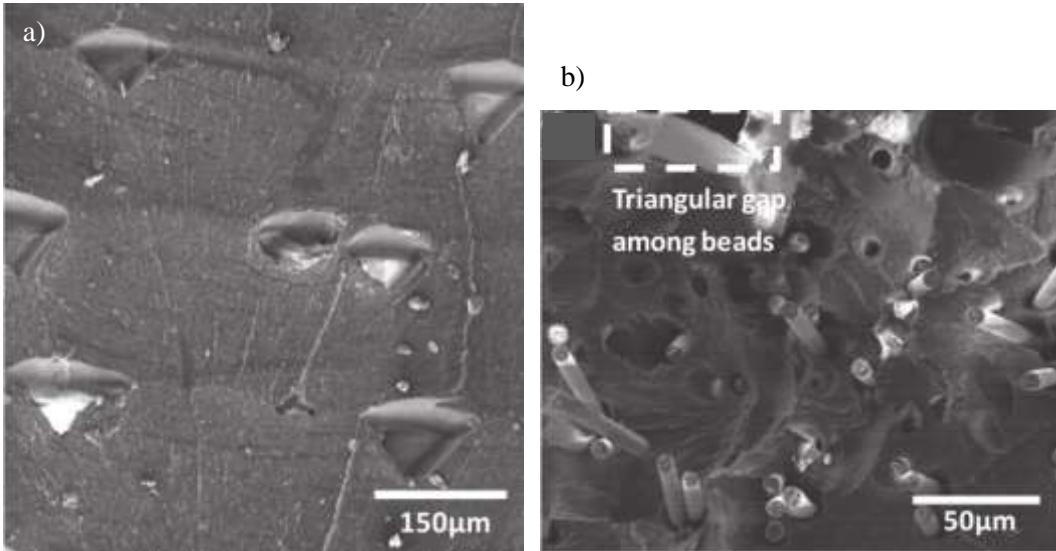


Figure 2-2: Microographies MEB de surfaces de fracture d'un échantillon a) d'ABS et b) d'ABS renforcé de 10 wt.% de fibres carbone imprimés par FDM [17]

Ces chercheurs ont aussi comparé les propriétés en tension d'échantillons imprimés par FDM à celles d'échantillons moulés par compression. La résistance en traction est supérieure avec le procédé de FDM, et le module d'Young équivalent. L'explication semblerait provenir d'une meilleure orientation des fibres par extrusion, qui sont alors alignées avec l'axe d'application de la force. Cependant, d'autres travaux [18] ayant pour but d'évaluer la performance de la FDM comparée au moulage par compression, de la fabrication du filament aux pièces finales, ne sont pas en accord avec cette amélioration ou équivalence de propriétés. En effet, une perte en performance mécanique des échantillons imprimés s'élève à environ 20 à 30% est relevée, selon les valeurs des paramètres d'impression utilisées, par rapport à celle des échantillons produits par moulage par compression. Ceci s'expliquerait par la présence de porosités dans les pièces imprimées. Toutefois, en optimisant les paramètres d'impression, cette perte de propriétés peut être minimisée.

Afin de mieux comprendre les effets du procédé de FDM en lui-même, une comparaison des propriétés de traction du filament, la matière première, avec celles des échantillons imprimés a été réalisée par J.F. Rodríguez et al. [20]. Alors que le filament d'ABS a révélé une résistance (S_u) de 31,2 MPa et un module (E) de 2,23 GPa, les pièces imprimées avec ce même filament atteignent au plus 78% de la valeur en résistance et 89% de celle en module. Incontestablement, le procédé induit une perte en propriétés, qui peut encore être expliquée par la présence de vide dans les structures imprimées, mais aussi dans ce cas-ci par une perte de l'orientation exclusive

du filament dans la direction de la charge, conséquente à l'extrusion. Toutefois, comparé à deux autres processus de prototypage rapide similaires, illustrés à la Figure 2-3 a) et b) et nommés « processus d'impression 3D » à partir de poudre plastique et « système de dépôt de nanocomposite », le procédé de FDM [21] présenté à la Figure 2-3 c) est celui qui confère la meilleure résistance en compression (S_c) aux pièces fabriquées, avec une valeur de 41,26 MPa [22].

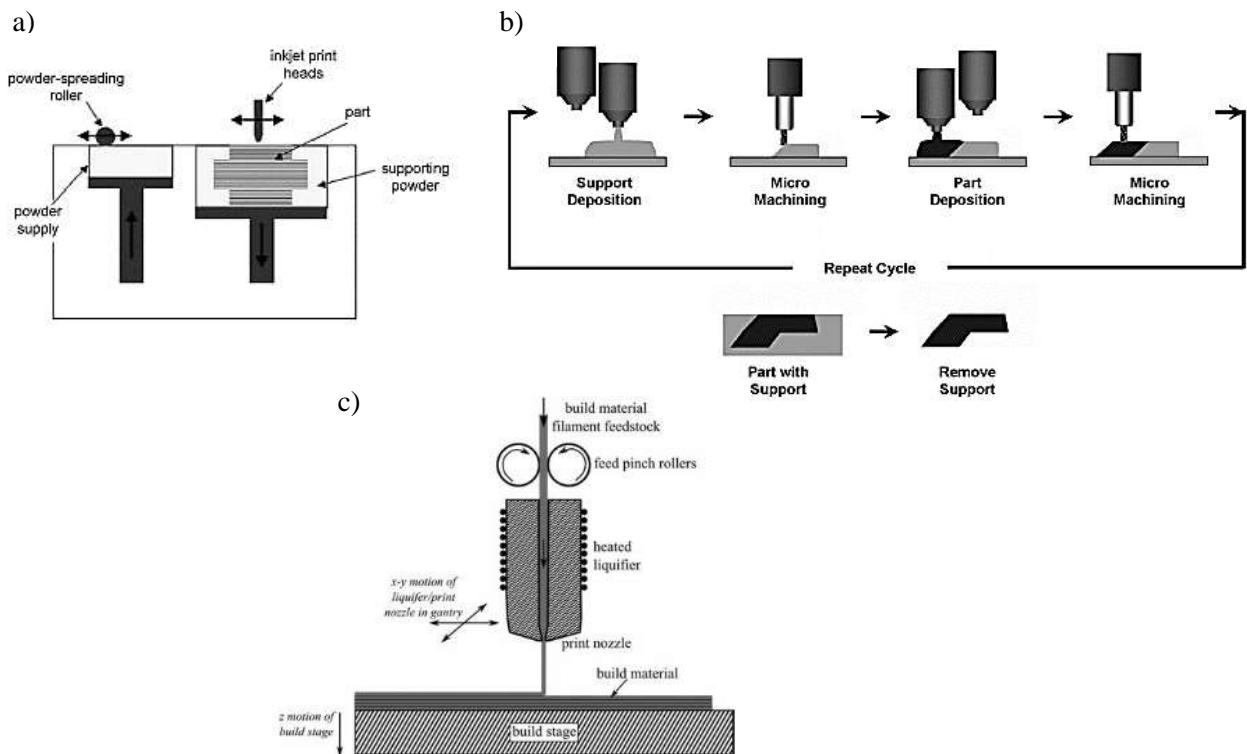


Figure 2-3: a) Processus d'impression 3D b) Séquence de fabrication par système de dépôt de nanocomposite [22] et c) Procédé de FDM [21]

Ces trois procédés ont un effet commun : les échantillons fabriqués possèdent des propriétés anisotropiques, c'est-à-dire qui diffèrent en fonction de l'orientation du matériau.

Ainsi, les propriétés mécaniques des échantillons imprimés par FDM atteignent difficilement celles obtenues par moulage avec le même matériau, que ce soit par injection ou par compression et ceci à cause des défauts qu'engendrent la technique, tels que la porosité.

2.1.3 Effets des paramètres d'impression

Dans la technologie de FDM, un grand nombre de paramètres d'impression est à définir. Les principaux sont la direction d'impression de la pièce, ceux caractérisant le chemin d'impression d'un filament, la température de la plateforme sur laquelle la pièce s'imprime, appelée plus couramment le lit, celle de la buse d'extrusion (ou extrudeur) et enfin la température environnementale d'impression. Dans cette section, seulement les effets de la direction d'impression et des paramètres du chemin d'impression sont analysés, les différents paramètres de température faisant l'objet de la section 2.3. La Figure 2-4 a) [23] montre les trois directions

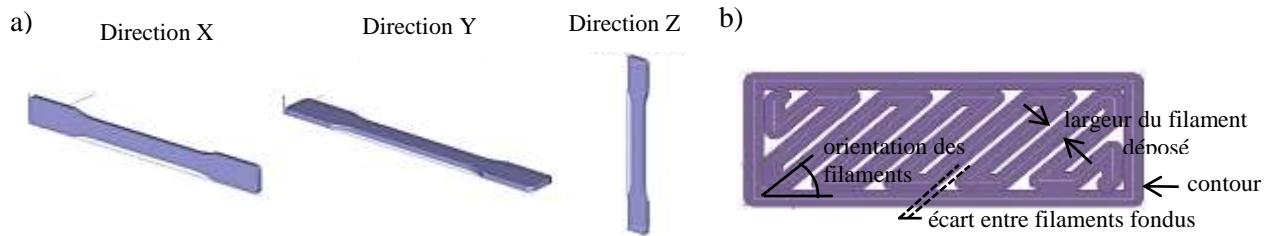


Figure 2-4: a) Les trois directions d'impression possibles et b) principaux paramètres du chemin d'impression [23, 24]

d'impression possibles, nommées en fonction de l'axe coïncidant avec la longueur de l'échantillon. Sur la Figure 2-4 b) [23, 24], les principaux paramètres du chemin d'impression sont illustrés, hormis l'épaisseur de couches, qui correspond à la hauteur d'une seule couche.

Dans la littérature, plusieurs méthodes ont été employées afin de rendre compte des effets de ces paramètres sur plusieurs aspects des pièces imprimées, tels que leur qualité et leur performance. La Méthode de Taguchi, un outil d'optimisation de la qualité en conception, a été utilisée par plusieurs chercheurs [25-27] et a abouti aux résultats suivants :

- L'épaisseur de couche, l'orientation des filaments et l'écart entre eux affectent de manière significative les performances élastiques de prototypes imprimés en ABS [26];
- Parmi ces trois paramètres, l'épaisseur de couche semble être le paramètre ayant de plus d'influence sur la qualité de la pièce (absence de rugosité) [25];
- Il est impossible de trouver des paramètres optimaux communs pour minimiser la précision dimensionnelle à la fois dans la largeur, la longueur et l'épaisseur de

l'échantillon, mais la Méthode Grise de Taguchi, permet d'obtenir des paramètres optimaux pour une amélioration globale de la stabilité dimensionnelle [27].

D'autres études ont développé des modèles empiriques ou analytiques à partir d'analyse de réponses de surfaces et les ont validés grâce à des analyses de la variance (ANOVA) ou des expériences [28-30]. Comme l'avaient déjà remarqué A. K. Sood et al. [27] dans leur article précédent concernant la stabilité dimensionnelle, optimiser plusieurs paramètres d'impression afin d'obtenir de meilleures propriétés mécaniques ne donne pas les mêmes valeurs de ces paramètres que lorsque qu'ils sont optimisés de façon indépendante. Ainsi, une forte interaction existe entre ces paramètres. De plus, en fonction du type de propriétés que l'on souhaite améliorer, les valeurs optimales de chaque paramètre peuvent différer : c'est le cas pour la résistance en traction et la résistance à l'impact [28]. D'autre part, les deux autres modèles [29, 30] semblent s'accorder sur le fait que plus le nombre de contours est élevé, meilleures sont les propriétés de traction (S_u et E) d'échantillons imprimés dans la direction X. Un effet de cette direction d'impression sur les propriétés mécaniques est aussi observé dans ces travaux, tout comme un effet de l'orientation des filaments fondus déposés.

Au vu du grand nombre de paramètres et donc de variables possibles, des recherches par plans d'expérience ont été investiguées [16, 31]. Sur des structures en échafaudage d'ABS, l'écart entre les filaments et leur largeur une fois déposés sont des paramètres importants d'influence sur la porosité et les propriétés mécaniques [31]. Que ce soit sur des échantillons unidirectionnels (i.e., toutes les couches ont la même orientation des filaments) ou entrecroisés (i.e., les filaments d'une couche sont à 90° par rapport à celles de la couche inférieure), l'angle ou les angles d'orientation affectent considérablement la résistance en traction de l'échantillon obtenue. L'écart entre les filaments a aussi une grande influence, ce qui n'est pas le cas de leur largeur une fois déposés et la couleur du filament utilisé en tant que matière première. Concernant la résistance en compression d'échantillon d'orientation [$\pm 45^\circ$], une direction d'impression transverse ou axiale change peu la valeur obtenue [16, 22].

Enfin, des travaux basés simplement sur de résultats de tests en traction et flexion ont aussi été menés [32-36]. En fonction des paramètres fixés et de leur valeurs, certains ont obtenu l'orientation des filaments comme paramètre critique [34], d'autres l'écart entre eux [35], qui si l'est fixé à une valeur optimale annulerait les effets de l'orientation. Une influence importante de

l'épaisseur des couches a été démontrée par plusieurs de ces travaux [33, 34]. De manière plus globale, les propriétés mécaniques des pièces finales dépendent considérablement de la direction d'impression et de plusieurs paramètres du chemin d'impression [32].

2.2 Amélioration des propriétés mécaniques des pièces imprimées

Afin d'améliorer les propriétés mécaniques des pièces fabriquées par FDM, deux voies sont employées. La première passe par l'amélioration des propriétés de la matière première, en ajoutant des renforts de différentes natures dans les filaments thermoplastiques. La seconde, devenue presque indispensable lorsque l'on aspire à de bonnes propriétés, est de trouver les paramètres optimaux d'impression de notre filament avec notre imprimante FDM.

2.2.1 Filaments renforcés

Des ajouts de diverses natures ont été investigues pour une amélioration des propriétés mécaniques statiques : des fibres de verre [18, 37], de carbone [17, 38-44], de kevlar [45], de jute [46] ou encore des poudres métalliques (e.g.,cuivre, fer, oxydes de titane ou de zirconium) [46-50]. Les fibres peuvent être courtes ou continues, hachées ou réduites en poudre. Concernant le thermoplastique utilisé, la plupart des chercheurs a employé l'ABS, sous forme de résine [17, 37, 46], de granulés [38-40] ou de filament [47]. Du PLA [41, 42], du Nylon PA12 [43-45, 48, 50] et du Polypropylène (PP) [18] ont aussi été investigues en tant que matrice.

Dans de nombreux travaux, les ajouts sont mélangés au polymère dans une extrudeuse co-rotative à double vis, à des températures voisines de 180-200°C, puis le produit en résultant est coupé en granulés [37, 43, 44, 46, 50]. Dans d'autres cas, le mélange est réalisé dans un mélangeur à fort cisaillement à 220°C [17, 39]; ou dans un mélangeur Banbury, suivis d'un moulage par compression sous forme de feuille par la suite coupées en granulés [38]; ou encore dans un homogénéisateur à vitesse variable des deux produits réduits préalablement en poudres par broyage cryogénique [48]; ou plus simplement dans un malaxeur [40]. La seconde étape, la mise en forme de filament, est souvent réalisée à l'aide d'une extrudeuse à simple vis et à vitesse de rotation, pression et température ajustables, de sorte à pouvoir obtenir le diamètre désiré (1,75mm le plus couramment) [37, 38, 41, 47, 48, 50]. Des unités d'extrusion par lot, composées de filière cylindrique de diamètre 1,75mm ont aussi été employées [17, 39], et même une

Filastruder [49], une machine qui permet de faire des bobines de filaments à partir de granulés de plastique.

Une bonne répartition des ajouts dans les filaments est nécessaire, tout comme une bonne adhésion de ces renforts avec la matrice. En cassant par pliage le filament au préalable trempé dans de l'azote liquide, puis en observant au microscope électronique à balayage (MEB) les profils de rupture ainsi obtenus, cette répartition et cette adhésion peuvent par exemple être contrôlées [43]. Dans certains cas, un prétraitement de surface est réalisé sur les ajouts afin d'améliorer leur adhésion à la matrice [41, 43].

Concernant les effets de ces ajouts, le Tableau 2-1, intitulé Synthèse des filament-composites mis en forme et leurs effets, répertorie les résultats rapportés de la littérature. Les principaux constats sont les suivants :

- La teneur en ajout est un paramètre important à considérer, qui influence directement les effets et pas forcément de façon linéaire ;
- Les ajouts de nature carbonée semblent les plus efficaces en termes de gain de résistance en traction (S_u) et module (E) ;
- Une amélioration de S_u et E s'accompagne souvent d'une perte de ductilité et dureté.

Les derniers travaux présentés dans ce tableau ont été réalisés dans notre laboratoire. Le processus de fabrication des filaments est présenté en Annexe 1. Les fibres de carbones courtes, fournies par Zoltek, étaient composées de 99% de carbone et possédaient une longueur de 150 μm et un diamètre de 7,2 μm . Le Nylon PA12 était du *Grilamid L20 nat* en granulés, fabriqué par EMS-Grivory. Avec 35wt.% de ces fibres, un E de 5,2 GPa et une S_u de 56,3 GPa ont été atteints en testant les éprouvettes imprimées.

Tableau 2-1: Synthèse des filament-composites mis en forme et leurs effets

Auteurs	Polymère	Ajout(s)	Teneur(s) testée(s) (wt.%)	Effets observés*	Teneurs optimales et/ou gain(s) obtenu(s)
W. H. Zhong et al. [37]	ABS	Fibres de verre courtes (GF) Plastifiant (P) Compatibilisateur (C)	0 ; 10,2 ; 13,2 ; 18	Avec GF : S_u (filament) ↑ Avec P + C : flexibilité, maniabilité ↑	18 wt.% GF avec P + C
M. L. Shofner et al. [38]	ABS	Fibres de carbone (\varnothing 100 nm L 100 μm)	10	Mode de rupture changé: ductile → fragile S_u et E ↑	S_u + 39% E + 60%
M. Nikzad et al. [47]	ABS	Poudres de Fer (45 μm) Poudres de Cuivre (45 μm)	10	E ↑ mais S_u ↓	Filaments Fe/ABS et Cu/ABS fabriqués et imprimables
S. Hwang et al. [49]	ABS	Particules de Fer (< 43 μm) Particules de Cuivre (< 24 μm)	10 et 30	S_u et E ↓ lorsque teneur ↑	-
L. J. Love et al. [39]	ABS	Fibres de carbone hachées (L 3.2 mm)	13	S_u et E ↑	S_u + \approx 200% E + \approx 400%
H. L. Tekinalp et al. [17]	ABS	Fibres de carbone courtes hachées (L 3.2 mm)	10 ; 20 ; 30 et 40	Lorsque teneur ↑ : -Porosité ↑ -Longueur moyenne des fibres ↓ - S_u et E ↑	S_u + \approx 80% à 40 wt.% E + \approx 600% à 30 wt.%
A. R. Torrado Perez et al. [46]	ABS	Fibres de jute TiO_2 (\varnothing 50 nm)	5 chacun	S_u et E ↑ + avec TiO_2	S_u + 13.2% E + 30%

Tableau 2-1 (suite): Synthèse des filament-composites mis en forme et leurs effets

O. S. Carneiro et al. [18]	PP	Fibres de verre	30	S_u et $E \uparrow$	$S_u + \approx 30\%$ $E + \approx 40\%$
F. Ning et al. [40]	ABS	Fibres de carbone de 2 longueurs différentes (+: 150µm / - : 100 µm)	3 ; 5 ; 7,5 ; 10 et 15	S_u et $E \uparrow$ σ_y , dureté et ductilité ↓ $E, S_u(+) > E, S_u(-)$ S_f, E_f et dureté en flexion ↑	$S_u + 22.5\%$ à 5wt.% $E + 30.5\%$ à 7.5wt% $S_f + 11.82\%$ à 5wt.% $E_f + 16.82\%$ à 5wt.% Dureté en flexion + 21.86% à 5wt.%
N. Li et al. [41]	PLA	Fibre continue de carbone prétraitée	-	S_u et $S_f \uparrow$ Meilleure adhésion fibre/matrice grâce au prétraitement	$S_u + 225\%$ /sans fibre $S_f + 194\%$ /sans fibre $S_u + 13.8\%$ /sans traitement (st) $S_f + 164\%$ /st
G. W. Melenka et al. [45]	Nylon	Fibres de Kevlar	4,04 ; 8,08 et 10,1	S_u et $E \uparrow$ lorsque teneur ↑	Modèle de prédiction des propriétés de traction développé
X. Tian et al. [42]	PLA	Fibre de carbone continue	≈27%	S_f et $E_f \uparrow$	-
H. Mahdavi et al. [43]	Nylon	Fibres de carbone courtes	29 et 35	S_u et $E \uparrow$ lorsque teneur ↑	$S_u + \approx 57\%$ à 35 wt.% $E + \approx 270\%$ à 35 wt.%

* ↑ et ↓ représentent une augmentation et une diminution, respectivement.

2.2.2 Paramètres optimaux et propriétés obtenues

Comme cela a été mentionné à la section 2.1.3, les paramètres d'impression influencent de façon significative les propriétés mécaniques des pièces. Le Tableaux 2-2 répertorient les paramètres trouvés optimaux dans plusieurs travaux de la littérature, ainsi que les propriétés mécaniques obtenues avec ces derniers. Afin d'obtenir la meilleure résistance, les résultats semblent s'accorder sur une orientation d'impression maximisant les filaments à 0° , c'est-à-dire alignés avec la direction de charge lors d'essais en traction notamment [33, 34, 38, 43]. Ceci a été relevé lors des travaux antérieurs réalisés dans notre laboratoire [43], où les performances d'éprouvettes imprimées avec deux filaments renforcés en faisant seulement varier l'orientation des filaments ont été comparées. Avec une orientation à 0° , un E de 1,5 GPa et une S_u de 31,4 MPa ont été obtenus avec le 29% CF/ Nylon et un E de 1,9 GPa et une S_u de 35,2 MPa avec le 35% CF/ Nylon, ce qui est bien inférieur aux performances mentionnées dans le tableau et obtenues avec une orientation à 0° . Cependant, K. J. Christyan et al. [33] ont obtenu un module E plus élevé avec une orientation à 45° pour les deux épaisseurs de couches testées, et la valeur la plus élevée étant avec celle de 0,254mm, alors que la meilleure résistance obtenue l'est avec une épaisseur de 0,33mm. Ainsi, les valeurs des paramètres optimisés pour une caractéristique ne sont pas forcément les mêmes que pour une autre. B. M. Tymrak et al. [36] ajoutent que ces paramètres optimaux peuvent aussi dépendre de l'imprimante utilisée. En effet, en imprimant sur 4 machines de conceptions mécaniques différentes (châssis, moteurs pas à pas, tête de l'extrudeuse, microprogramme) avec les mêmes paramètres, la résistance des pièces obtenues varie. Ceci peut s'expliquer par l'absence d'une normalisation des caractéristiques d'une imprimante 3D. Ensuite, selon M. Dawoud et al. [35], l'écart entre filaments est un paramètre crucial dont la valeur doit être de préférence négative, c'est-à-dire que les filaments d'une même couche doivent légèrement se chevaucher. Dans ce cas, la pièce obtenue est alors plus dense et l'orientation des filaments influence moins les propriétés mécaniques. De leur côté, K. J. Christyan et al. [33] constatent aussi une forte influence de l'épaisseur de couche comparée à celle de l'orientation des filaments. Néanmoins, K. Savvakis et al. [34] considèrent que ce dernier paramètre est celui qui impacterait le plus la résistance en traction des pièces imprimées. Ainsi, l'obtention des paramètres optimaux n'apparaît pas évidente car une forte interaction existe entre eux. L'influence de chaque paramètre est alors plus ou moins importante en fonction des valeurs fixées des autres paramètres.

Tableau 2-2: Paramètres d'impression optimaux et propriétés mécaniques relevés dans la littérature

Auteurs (date)	Filament	Paramètre évalué	Valeurs testées	Conditions d'impression fixées notables	Valeur optimale obtenue	Valeurs des propriétés mécaniques obtenues
M. L. Shofner et al. [38] (2003)	ABS	orientation des filaments	[10°/90°] [0°]	forme échantillons	[0°]	$S_u = 26,9 \text{ MPa}$ $E = 0,49 \text{ GPa}$
	10%CF/ ABS		[0°/90°] [+45°/-45°]		[+45°/-45°]	Non renseigné (NR)
D. Croccolo et al. [29] (2013)	ABS	direction d'impression	X et Y	orientation [±45°]	1 contour	$S_u = 29,7 \text{ MPa}$ $E = 2,12 \text{ GPa}$
		nombre de contours	1 ; 4 ; 7 et 10	écart entre filaments nul	direction Y	$S_u = 25,4 \text{ MPa}$ $E = 1,99 \text{ GPa}$
K. J. Christiyan et al. [33] (2014)	ABS	orientation des filaments	0°, 45°, 60° et 90°	NR	0°	$S_u = 21,71 \text{ MPa}$
		épaisseur des couches	0.254 et 0.331 mm		0.331 mm	
K. Savvakis et al. [34] (2014)	ABS et ABS Plus ¹	orientation des filaments	0° et 45°	remplissage à 97%	0°	$S_u(\text{ABS}) = 21,44 \text{ MPa}$
		épaisseur des couches	0.17, 0.25, 0.33 mm	direction d'impression Y	0.25 mm	$S_u(\text{ABS+}) = 20,68 \text{ MPa}$

¹ ABS Plus : polymère aux propriétés améliorées comparé à l'ABS standard.

Tableau 2-2 (suite): Paramètres d'impression optimaux et propriétés mécaniques relevés dans la littérature

A. R. Torrado Perez et al. [46] (2014)	5% TiO ₂ /A BS	direction d'impression	Y et Z	remplissage à 100% épaisseur de couche = 0,27mm orientation : 0°	direction Y	$S_u = 32,2 \text{ MPa}$ $E = 1,71 \text{ GPa}$
B. M. Tymrak et al. [36] (2014)	ABS et PLA	orientation des filaments	[0°/90°] [+45°/-45°]	remplissage à 100%	[0°/90°]	$S_u (\text{ABS}) \approx 34 \text{ MPa}$ $S_u (\text{PLA}) \approx 60 \text{ MPa}$
A. Lanzotti et al. [30] (2015)	PLA	épaisseur des couches	0,1 ; 0,12 ; 0,15 ; 0,18 et 0,2 mm	remplissage à 100% direction d'impression Y	0,15 mm	$S_u = 53,59 \text{ MPa}$
M. Dawoud et al. [35] (2016)	ABS	orientation des filaments	[0°/90°] [+30°/-60°] [+45°/-45°] [+75°/-15°]	structure en échafaudage épaisseur de couche = 0,5 mm	[+45°/- 45°] [0°/90°]	$S_u (\pm 45^\circ) = 34,3 \text{ MPa}$ $S_f^2 (0^\circ/90^\circ) = 68,8 \text{ MPa}$ $S_i^3 (\pm 45^\circ) = 41,8 \text{ kJ/m}^2$
		écart entre filaments	-0,05 et +0,05 mm		-0,05 mm	

² S_f : résistance en flexion³ S_i : résistance à l'impact

Tableau 2-2 (suite): Paramètres d'impression optimaux et propriétés mécaniques relevés dans la littérature

F. Ning et al. [51] (2015)	ABS	épaisseur des couches	0,15 ; 0,2 ; 0,35 mm	orientation : [0°/90°] remplissage 100% 3 contours	0,15 mm	$S_u = 36,8 \text{ MPa}$ $E = 1,1 \text{ GPa}$ $\sigma_y = 24,4 \text{ MPa}$
X. Tian et al. [42] (2016)	27% CF/PLA	épaisseur des couches	0,3 et 0,8 mm	orientation: 0°	écart entre filaments : 0,3 mm -0,8	$S_f = 240 \text{ MPa}$ $E_f^4 \approx 20,5 \text{ GPa}$
		écart entre filaments	-1,6 et -0,2 mm	Ø buse: 2 mm	épaisseur de couche : -1,6 mm 0,5 mm	$S_f = 335 \text{ MPa}$ $E_f = 30 \text{ GPa}$
H. Mahdavi et al. [43] (2016)	29% CF/ Nylon	Orientation des filaments	[0°] et [90°]	Remplissage à 100% Direction d'impression Y	[0°]	$S_u = 47,1 \text{ MPa}$ $E = 3,9 \text{ GPa}$ $S_u = 56,3 \text{ MPa}$ $E = 5,2 \text{ GPa}$
	35% CF/ Nylon					

⁴ E_f : module de flexion

2.3 Effets des paramètres de température

Parmi les paramètres d'impression, les paramètres de température ont aussi des effets non négligeables. La température de la buse d'extrusion et celle de la plateforme d'impression notamment doivent être adaptées au matériau utilisé et impactent directement la qualité de la pièce imprimée. Une élévation de la température environnementale ou l'ajout d'un système local de chauffe du matériau dans le procédé de FDM peuvent aussi avoir une influence sur les objets imprimés.

2.3.1 Température de la buse d'extrusion

La température de la buse (T_n) est un des paramètres ayant le plus d'effets sur la qualité et la résistance de l'objet imprimé, car la viscosité du matériau extrudé en dépend directement [52]. En effet, en augmentant cette température entre 200 et 230°C lors de l'impression d'ABS, plusieurs chercheurs [49, 53] ont relevé une chute de la viscosité, qui induit alors des flux transversaux de la matière après déposition, réduisant de ce fait la rugosité. La qualité de la surface s'en trouve améliorée, mais aussi la force de liaison entre couches car il y a une meilleure diffusion à travers les interfaces. L'adhésion entre fibres augmente aussi lorsque T_n augmente, mais jusqu'à environ 222°C puis diminue, ce qui peut être expliqué par une dégradation du polymère lorsque la température dépasse cette dernière valeur. Selon une analyse de la variance (ANOVA), la température de la buse contribuerait de 24% à la force de liaison entre filaments déposés et de 21% à la qualité de la surface finie [53]. Comme l'illustrent les courbes de contrainte-déformation de structures d'ABS imprimées à différentes températures de buse de la Figure 2-5 a), une augmentation de T_n entraîne une amélioration de la résistance en traction, due à la meilleure adhésion des couches entre-elles, elle-même due à une diminution de la viscosité, montrée à la Figure 2-5 b) [49]. Cet effet de T_n sur les propriétés de traction a aussi été étudié au cours de travaux antérieurs réalisés dans notre laboratoire [44]. Des éprouvettes de Nylon renforcé à 35wt.% de CF ont été imprimées à 245°C, 255°C et 265°C. Une faible différence des valeurs de E et S_u a été obtenue entre les deux premières températures, mais un gain d'environ 10% a été relevé en augmentant T_n à 265°C comparé à 255°C.

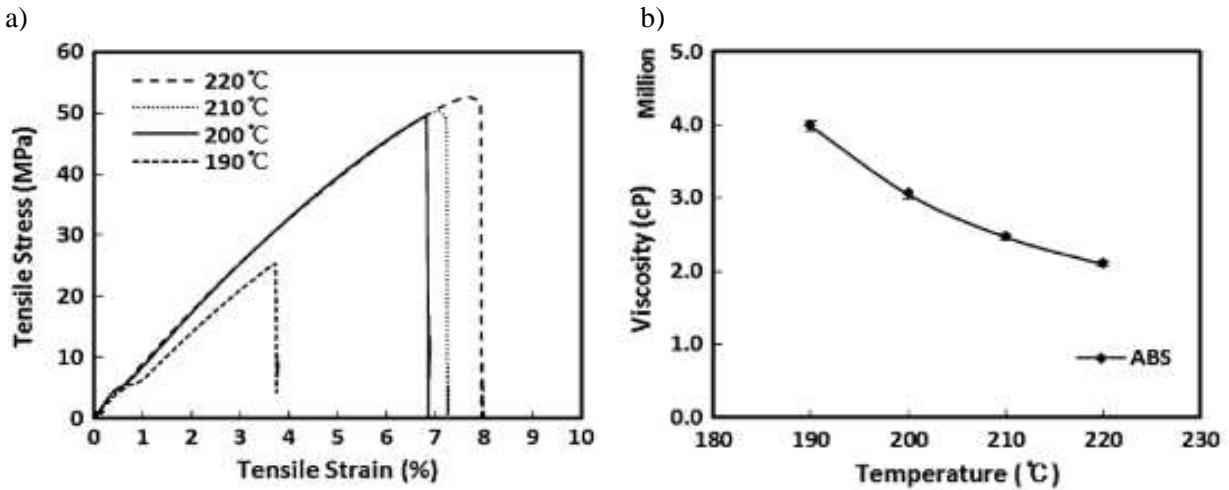


Figure 2-5: Effet de la température de la buse sur a) les courbes contrainte-déformation des structures imprimées en ABS et b) la viscosité de l'ABS [49]

M. Kaveh et al. [54] ont investigué les effets de T_n lors de l'impression d'un polystyrène et ont obtenu une température optimale de la buse à 210°C. En effet, à 220°C une mauvaise précision dimensionnelle a été reportée, et à 230°C une forte quantité de creux entre les filaments et entre les couches a été relevée. Avec la méthode de Taguchi, A. J. Qureshi et al. [55] ont aussi recherché à optimiser ce paramètre au profit des propriétés mécaniques des pièces imprimées. En imprimant à 218,5°C, 230°C et 241,5°C, l'effet d'une variation de cette température sur les propriétés a bien été relevé et la température optimale trouvée est 230°C. Ceci est en accord avec d'autres travaux, l'un utilisant du PLA renforcé de fibres de carbone [42] et l'autre un polymère à mémoire de forme [56]. Dans le premier, en augmentant T_n de 180°C à 240° par incrément de 10°C, les températures permettant à la fois une bonne résistance en flexion et une bonne précision dimensionnelle sont celles comprises entre 200 et 230°C. Dans le second, en considérant la qualité de surface, la densité et la précision dimensionnelle obtenue lorsque T_n varie de 210 à 250°C, la gamme de températures les optimisant est 220-235 °C.

2.3.2 Température de la plateforme d'impression

La température de la plateforme d'impression (T_l), plus communément appelé le lit, est aussi un paramètre à considérer. En effet, si elle est trop basse, par exemple inférieure à 80°C dans le cas de l'ABS, la première couche n'adhère pas ou très peu et l'adhésion entre les couches et entre les filaments déposés n'est pas bonne. À l'inverse, si elle est trop haute, par exemple supérieure à 100°C, une mauvaise précision dimensionnelle est obtenue. Ses contributions sur la force de

liaison interfilaments et la qualité de surface ont été estimées à 10% et 8%, respectivement. Entre 80°C et 100°C, plus elle est élevée, meilleure est la force de liaison entre filaments car elle permet de maintenir l'extrudé à une température élevée plus longtemps [53]. Le fait que cette température impacte les propriétés mécaniques de pièces imprimées avec les thermoplastiques courants a aussi été démontré grâce à la méthode de Taguchi, en lui attribuant les valeurs de 104,5°C, 110°C et 115,5 °C, et la valeur optimale trouvée a été 110°C [55].

2.3.3 Phénomènes thermiques et températures environnementales

Les phénomènes thermiques ayant lieu lors de l'impression ont aussi été étudiés, car ils influencent la qualité de la surface, la précision dimensionnelle et les propriétés mécaniques des pièces. Plusieurs approches ont été investiguées : une analyse de la contribution des différents transferts de chaleur par convection, conduction et radiation sur ABAQUS [57], une étude des profils de température du filament extrudé [58] et une étude de l'influence du temps de refroidissement entre deux couches consécutives sur les propriétés mécaniques [59]. En chauffant l'environnement d'impression à 70°C, les transferts par convection entre cet environnement et les filaments déposés apparaissent comme les plus importants. La contribution des échanges par conduction entre les filaments et la plateforme d'une part et interfilaments d'autre part est aussi non négligeable. Ces échanges convectifs et conductifs seraient donc ceux à prendre en compte lors d'une modélisation du procédé de FDM [57]. Concernant l'étude du profil de température du filament, en chauffant l'environnement d'impression à 50°C, 60°C et 70°C, il a été obtenu que plus l'environnement est chaud, plus la température minimale du profil est élevée, comme le montre la Figure 2-6. En d'autres termes, les filaments déposés restent plus longtemps à une température supérieure à leur T_g et y reviennent plus facilement lors du dépôt des filaments voisins (correspondant aux pics de la Figure 2-6). Ceci favorise les phénomènes de diffusion entre eux et améliore donc leur force de liaison. D'autre part, les profils de rupture obtenus ont manifesté des différences en fonction du lieu d'impression de la pièce sur le lit. Ceci peut s'expliquer par une circulation hétérogène de l'air dans l'espace d'impression, entraînant des conditions de convection différentes [58]. Enfin, un temps de refroidissement prolongé entre deux couches successives d'échantillons uniaxiaux imprimés dans la direction Z entraîne une diminution des propriétés mécaniques [59].

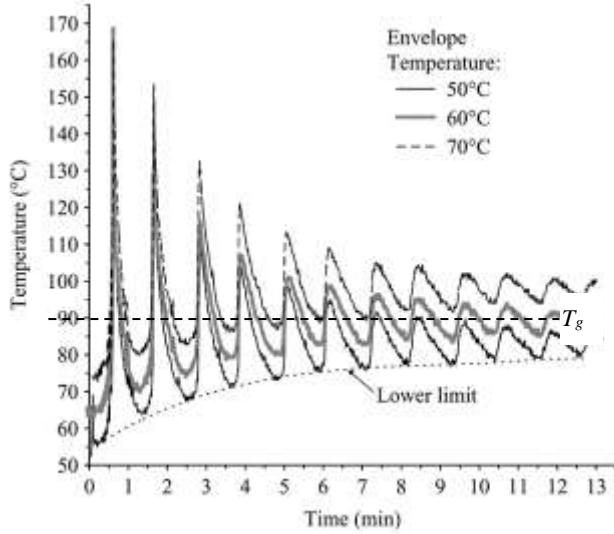


Figure 2-6: Profil de température d'un filament déposé dans un environnement d'impression chauffé à 50°C, 60°C et 70°C [58]

Globalement, un meilleur contrôle des conditions de refroidissement après extrusion pourrait permettre l'obtention de meilleures propriétés et qualité des pièces imprimées.

L'ajout d'un chauffage local par laser à proximité de la buse lors de la déposition de l'extrudé a été investigué par deux groupes de chercheurs [60, 61]. Dans un cas [61], le laser a été positionné de sorte à chauffer le filament de la couche de substrat inférieure juste avant déposition d'un nouveau filament par-dessus. La force de liaison entre couches s'en est retrouvée augmentée de 50% et le mode de rupture intercouches est devenu plus ductile, avec une présence visible de zone de déformation plastique. Dans l'autre cas [60], deux configurations de position de deux lasers ont été étudiées : une configuration latérale, chauffant le filament extrudé avant déposition de chaque côté; et une configuration pré et post déposition, où les deux lasers sont placés selon un axe parallèle au chemin d'impression. La plus efficiente des configurations a été la latérale, permettant une meilleure adhésion entre les couches, une amélioration de la précision et une augmentation de 195% de la résistance en traction de la pièce imprimée. Au sein de notre laboratoire, l'effet d'un chauffage global de l'environnement d'impression à des températures élevées (i.e., $\geq 50^\circ\text{C}$) a été investigué grâce à une chambre chauffante capable d'accueillir l'imprimante FDM, dont le modèle CAO est présenté en Annexe 2. En imprimant des éprouvettes de 35% CF/ Nylon à 65°C , un gain de 93% et 46% a été obtenu comparé à sans chauffe la chambre sur S_u et E , respectivement et dans le cas où les filaments ont une orientation de 0° [44].

2.4 Thermoplastiques Hautes Températures (THP)

La commercialisation de filaments thermoplastiques hautes températures (THP) a permis d'étendre la gamme des plastiques disponibles pour la technologie de FDM et surtout d'élargir les possibilités en termes de propriétés mécaniques des pièces imprimées. En effet, les propriétés de la matière première conditionnent celle du produit fini, et cette famille de thermoplastiques surpassant les autres plastiques en termes de résistances, les filaments THP vont permettre une amélioration des performances des pièces obtenues par FDM.

2.4.1 Définitions et caractéristiques

Les critères de définitions de ces thermoplastiques peuvent varier en fonction de l'application à laquelle ils servent, ou d'un fabricant à l'autre. Nous nous concentrerons ici sur les critères liés à leur capacité à hautes températures, comme les suivants :

- Une T_g élevée, soit supérieure à 200°C;
- Une faible perte en masse à des températures élevées;
- Une longue viabilité à 177°C, c'est-à-dire un maintien de leur propriété pendant plus de 10 000h d'exposition.

Dans le cadre de ce mémoire, nous adopterons la définition suivante : un THP est un thermoplastique qui, même après une courte ou longue durée d'exposition à des radiations, des fluides, une action mécanique, chimique ou électrique – ces conditions pouvant être combinées-, conserve des propriétés de service à des températures élevées ($>177^\circ\text{C}$) [2, 4].

Au niveau de leur structure chimique, ils sont constitués de nombreux groupes aromatiques et de liaisons C=C, ce qui est à l'origine de leur excellente stabilité et de leurs propriétés remarquables. Comme c'est le cas pour tous les thermoplastiques, ils peuvent présenter trois types de structures moléculaires: amorphes, semi-cristallins et cristallins. Les thermoplastiques les plus couramment utilisés font partie des deux premiers types, dont voici ci-dessous les principaux, classés en fonction de leur performance et température de service.

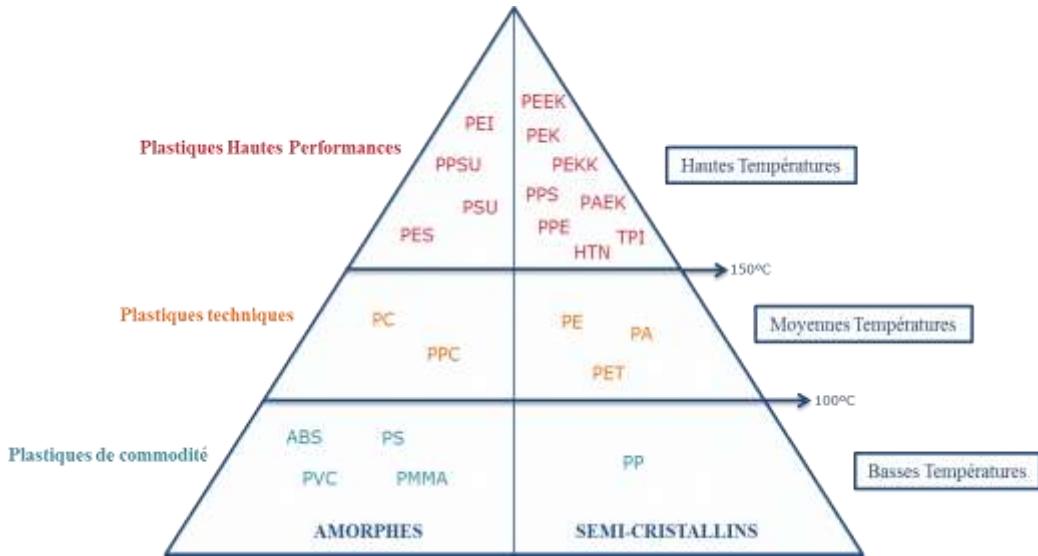


Figure 2-7: Classification des principaux thermoplastiques
Données extraites des réf. [1, 2].

La Figure 2-7 illustre la classification des principaux thermoplastiques en fonction de leur microstructure, cristallinité et résistance à la température. En particulier, les Polyaryléthercétones (PAEK), regroupant le Polyéthercétone (PEK), le Polyétheréthercétone (PEEK) et le Polyétheréthercétonecétone (PEKK), forment une famille importante de thermoplastiques hautes performances. En plus de leurs excellentes propriétés thermomécaniques et de leur bonne résistance chimique, ils offrent l'avantage de ne pas être hygroscopiques, c'est-à-dire qu'ils n'absorbent pas l'humidité lorsqu'ils sont exposés à celle-ci. En effet, l'hygroscopie rend la mise en forme plus délicate : lors d'un moulage par compression par exemple, bien que la pression soit constante et appliquée pendant une durée définie, si la teneur en humidité du polymère n'est pas sous contrôle, la pièce obtenue n'aura pas une densité uniforme, ce qui impactera négativement ces propriétés [62]. Les PAEK sont donc facilement mis en forme par les techniques conventionnelles à faible coût. Ils peuvent être obtenus par chauffage à partir de leur état vitreux, ou par refroidissement lent à partir de leur état fondu. Comme tout thermoplastique semi-cristallin, leurs propriétés mécaniques dépendent de leur degré de cristallinité et de la morphologie de leurs phases cristallines, qui sont liés aux antécédents thermiques du matériau. Le Tableau 2-3 présente leurs principales propriétés, ainsi que celle d'autres THP courants, à savoir le Polyphénylsulfone (PPS), le Polyétherimide (PEI) et le Polyéthersulfone (PES).

Tableau 2-3: Principales propriétés des THP courants [63]

Propriétés	PEEK	PEK	PEKK	PPS	PEI	PES
Densité (g/cm ³)	1,30	1.30	1,30	1,36	1,27	1.37
Cristallinité (%)	30	NR ⁵	26	36	-	-
T_g (°C)	143	165	156	85	217	192
Température de fusion (°C)	340	373	338	285	-	-
Température de mise en forme (°C)	380	400	370	320	343	330
E (GPa)	3,8	4,0	4,5	2,2	3,9	2,41
Résistance en traction (MPa)	103	105	102	80	104	76
Élongation à la rupture (%)	12	5	4	15	25	7
Température maximale de service (°C)	260	260	-	200	170	180

Remarquons que les PAEK se distinguent par leurs E élevé, autour de 3,5-4,5 GPa, soient les plus élevés des THP, mais aussi par une température de service allant jusqu'à 260°C [63].

⁵ Non renseigné

2.4.2 Utilisation dans le procédé de FDM

L'impression réussie de structures en PEEK par extrusion libre a été reportée pour la première fois par M.Vaezi et Y. Shoufeng, en 2015 [64]. Deux systèmes ont été testés, l'un utilisant de la poudre de PEEK chauffée et extrudée à travers une seringue, et l'autre, le procédé plus connu de dépôt de filament en fusion (FDM). Il en est ressorti qu'une bonne gestion du chauffage du matériau dans la tête extrudeuse est nécessaire afin d'éviter sa dégradation, de ne pas modifier son niveau cristallinité et de contrôler sa viscosité lors de l'extrusion. Ce contrôle n'est pas possible avec le procédé d'extrusion à travers une seringue. Une non uniformité des couches imprimées ainsi qu'une viscosité trop importante due à une surchauffe ont été constatées.

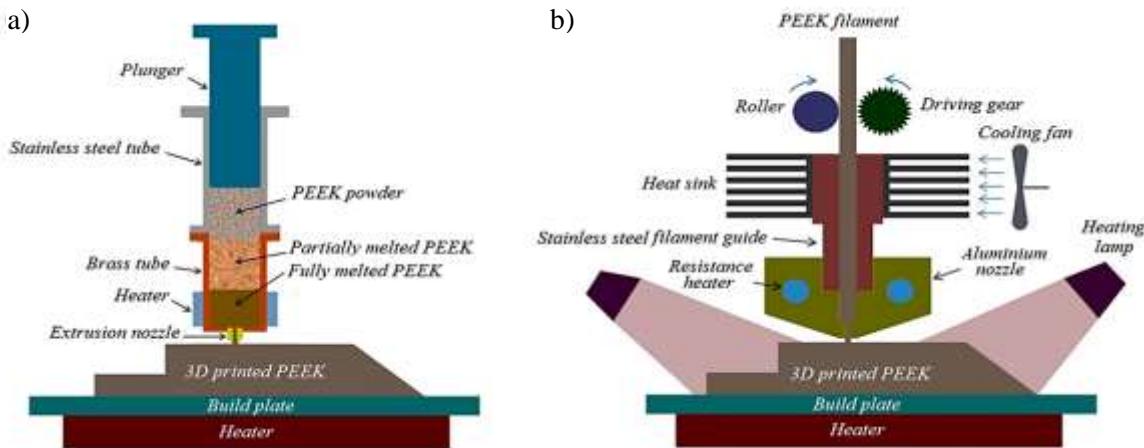


Figure 2-8: Schémas des dispositifs d'impression 3D de PEEK par a) seringue et b) FDM utilisés [61]

En revanche, un dissipateur de chaleur au niveau de la zone de chauffe de la tête extrudeuse a pu être mis en place sur le procédé de FDM, comme le montre la Figure 2-8 b). En utilisant une température d'extrusion comprise entre 410 et 430°C, ainsi qu'une plateforme d'impression à 130°C et en chauffant l'environnement d'impression à l'aide de lampes à environ 80°C, l'impression a été un succès. D'autres travaux antérieurs [65] ont réussi à former par extrusion réactive 4 différents types de filaments de TPI pouvant servir de matière première à cette technique d'impression 3D. Trois comonomères réduits en poudre ont été mixés dans une extrudeuse à double vis dont la température des différentes zones variait entre 280°C et 400°C et qui est présentée à la Figure 2-9 a). Ceci a donné lieu à une polymérisation continue, dont la réaction chimique est présentée à la Figure 2-9 b), et le copolymère ainsi obtenu a été extrudé. Un des filaments de Co-TPI fabriqués par ce procédé est présenté à la Figure 2-9 c).

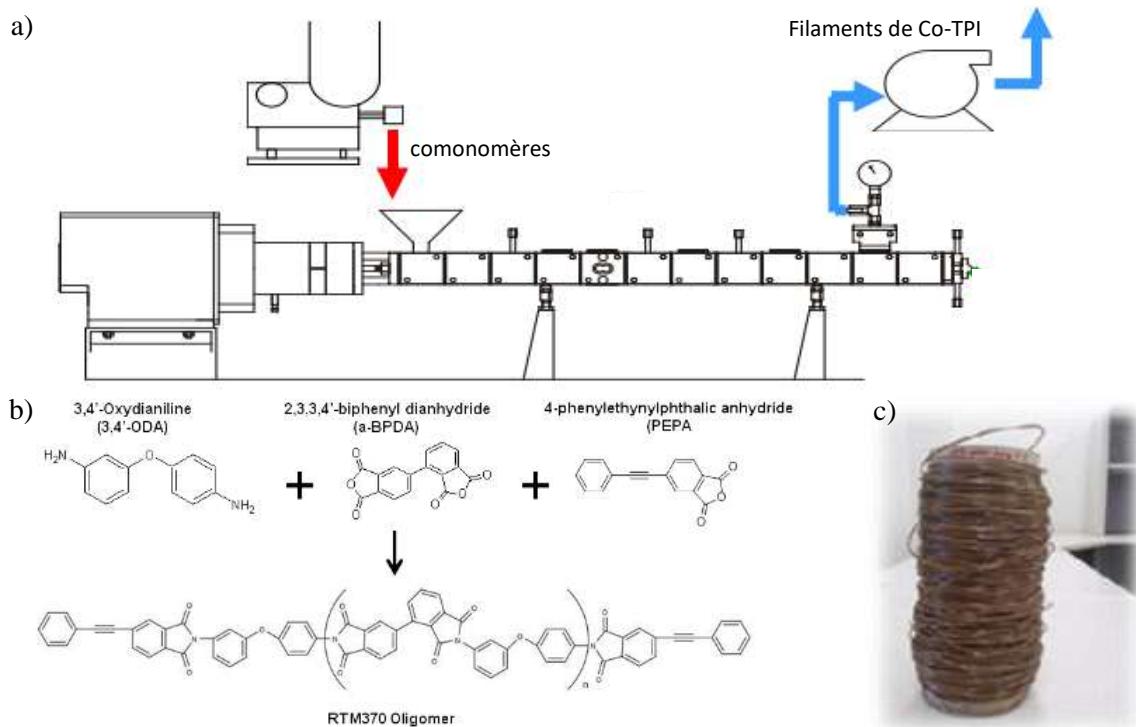


Figure 2-9: a) Schéma de principe de l'extrudeuse utilisée pour l'extrusion réactive, b) réaction de polymérisation continue et c) filament PI obtenu [62]

Ce procédé de production de TPI comporte de nombreux avantages, comme l'absence d'utilisation de solvants, contrairement aux techniques de polymérisation conventionnelles. De plus, il permet d'obtenir directement le thermoplastique sous forme de filament, adapté à la FDM. Des tests en traction et compression sur des échantillons imprimés avec leur filament Co-Pi-265 (celui dont la $T_g = 265^\circ\text{C}$) ainsi formé ont affiché d'excellentes propriétés mécaniques, avec notamment une S_u de 79 MPa et un E de 1,7 GPa. Plus récemment, A.A. Hassen et al. [66] se sont penchés sur la possibilité d'imprimer des moules, utilisés dans la fabrication de composites par autoclave, en Polysulfure de phénylène (PPS) renforcé de fibres de carbone grâce à un système de fabrication additive pour de grandes surfaces (BAAM- Big Area Additive Manufacturing), dont un exemple est présenté à la Figure 2-10 a). Plusieurs teneurs ont été testées et le meilleur résultat en terme de résistance et de mouillabilité des fibres dans la matrice a été obtenu avec le PPS/50%CF. En effet, pour une teneur supérieure, les filaments déposés présentent une surface rugueuse, observable au microscope, qui témoignerait d'une mauvaise imprégnation des fibres dans la matrice. La Figure 2-10 b) présente le moule d'autoclave final obtenu par ce système BAAM et le PPS/50%CF.

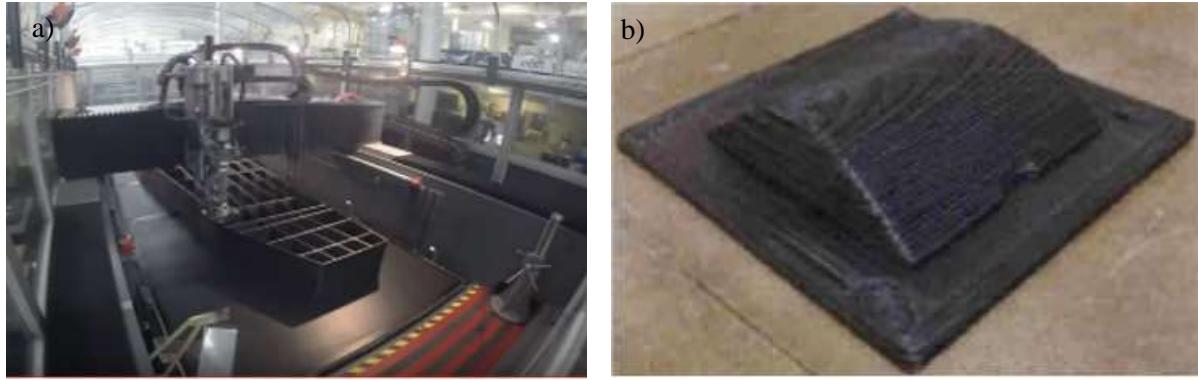


Figure 2-10: a) Exemple de BAAM et b) moule d'autoclave imprimé avec du PPS/50%CF [66]

Suite au développement de filaments THP commercialement disponibles, un plus grand nombre de chercheurs a réalisé des travaux sur l'impression par FDM de ces thermoplastiques. Le Tableau 2-4 répertorie les filaments commercialement disponibles utilisés dans ces recherches.

Tableau 2-4: Fabricants de filaments THP et leurs principales caractéristiques

Fabricant	Nom commercial (prix)	Matériau	Caractéristiques clés	Températures notables	Références
Stratasys (USA)	PPSF (~ 300 USD /kg)	PPSU	Excellent résistance à la chaleur et aux produits chimiques Bonne résistance mécanique	$T_g = 230^\circ\text{C}$	-
	ULTEM 9085 (~ 190 USD /kg)	PEI / PC	Certifié FST Rapport (résistance / poids) élevé	$T_g = 186^\circ\text{C}$	[23, 24, 67-69]
Arevo Labs (USA)	ULTEM 1010 (~ 190 USD /kg)	PEI	Excellent résistance à la chaleur, aux produits chimiques et à la tension	$T_g = 215^\circ\text{C}$	-
	Quantevo	PAEK	Rapport (résistance / poids) excellent Non corrosif	N.R.	-
Zyex Co. Ltd. (UK)	Katevo	PEEK	Excellentes propriétés mécaniques Résistance à hautes températures ($>250^\circ\text{C}$)	N.R.	K. M. Rahman et al. [70]
	Victrex®PEEK 450G	PEEK	Excellente résistance aux produits chimiques Excellent biocompatibilité	$T_g = 143^\circ\text{C}$ $T_m = 343^\circ\text{C}$	M. Vaezi et Y. Shoufeng [64]

Tableau 2-4 (suite): Fabricants de filaments THP et leurs principales caractéristiques

Jilin University (Chine)	-	PEEK	$T_g = 143^\circ\text{C}$ $T_m = 334^\circ\text{C}$	W. Z. Wu et al. [71] et W. Wu et al. [72]
--------------------------------	---	------	--	--

La majorité des travaux emploie l'ULTEM 9085, qui est un mélange de PEI et de polycarbonate (PC) et possède la certification FST, c'est-à-dire qu'il satisfait aux normes de flamme, de fumée et de toxicité [69]. Ceci en fait un matériau adapté pour des applications dans l'aérospatiale, dans l'automobile et dans le domaine militaire.

Comme cela a été fait avec les plastiques classiques (ABS et PLA), ces travaux investiguent les effets des paramètres d'impression et de températures sur les propriétés mécaniques des pièces imprimées avec ces filaments THP, dont les résultats sont présentés et synthétisés dans la section suivante.

2.4.3 Paramètres optimaux de températures et d'impression de PEI et PEEK

Les Tableaux 2-5 et 2-6 synthétisent les résultats rapportés de la littérature sur les effets de ces paramètres lors de l'impression par FDM de PEI et de PEEK, respectivement. Dans le premier, tous les travaux ont été réalisés avec des filaments ULTEM 9085, que la majorité des auteurs considèrent comme du PEI. En comparant les résultats, la direction d'impression d'un échantillon selon l'axe X apparaît comme celle engendrant les meilleures propriétés mécaniques, avec une S_u allant de 63 MPa à 86 MPa [22, 23, 64-66]. Les deux premiers travaux ont sensiblement été réalisés par les mêmes auteurs. Dans la première publication, les expériences ont porté sur la recherche d'une direction favorable d'impression, en conservant les paramètres du chemin d'impression prédéfinis par le logiciel; puis dans la seconde, l'effet de ces paramètres est testé, et les plus favorables sont à leur tour sélectionnés. Un ensemble de paramètres d'impression optimisés est ainsi obtenu, et permet d'atteindre une S_u de 81 MPa, soit proche de celle d'échantillons similaires réalisés par moulage (84 MPa) [23, 67]. En rapprochant les résultats des travaux étudiant les différents paramètres du chemin d'impression, une amélioration des propriétés mécaniques des échantillons imprimés est remarquée lorsque l'écart entre les filaments déposés est diminué et le nombre de contours augmenté [24, 67]. Enfin, une orientation des filaments dans le sens d'application de la charge semble aussi permettre une résistance et un

E plus élevés. C'est le cas des échantillons ayant les filaments orientés à 0° , et de ceux unidirectionnels de type FL [67, 69].

Tableau 2-5: Synthèse des paramètres d'impression évalués et des résultats obtenus par FDM avec des filaments de PEI

Auteurs (année)	Paramètre(s) évalué(s)	Plan d'expérience	Test(s) réalisé(s)	Résultats
A. Bagsik et al. [23] (2010)	Direction d'impression	<ul style="list-style-type: none"> • 3 directions : X, Y et Z • 2 directions : XY et Z 	Traction ASTM D638 Compression ASTM D695	<ul style="list-style-type: none"> • $S_{u,\max} = S_{u,X} = 63 \text{ MPa}$ • $\varepsilon_{u,\max} = \varepsilon_{u,X} = 6,4\%$ • $S_{c,Z} > S_{c,XY}$ • $S_{u,\text{imprimé}}, \varepsilon_{u,\text{imprimé}} < S_{u,\text{moulé}}, \varepsilon_{u,\text{moulé}}$
A. Bagsik et V. Schöppner [67] (2011)	Chemin d'impression : <ul style="list-style-type: none"> • largeur des filaments (l.f.) • orientation et écart entre fibres 	<ul style="list-style-type: none"> • 3 directions • 2 largeurs : 0,5 et 0,75mm • 3 orientations : 0°, 30°, 45° • 3 écarts : ±0,0254 et 0mm 	Traction ASTM D638	$S_{u,\max} = S_{u,X} (0,75\text{mm}; 0^\circ; -0,0254\text{mm}) = 81 \text{ MPa}$
A. Bagsik et al. [68] (2014)	<ul style="list-style-type: none"> • direction d'impression • structure interne 	<ul style="list-style-type: none"> • 3 directions : X, Y et Z • 7 structures internes du composite sandwich 	Flexion 4 points ASTM C393	$S_{f,\max} = S_{f,X}$ (structure interne : 
E. Spišák et al. [24] (2014)	Chemin d'impression : <ul style="list-style-type: none"> • nombre de contours • écart entre filaments 	<ul style="list-style-type: none"> • 3 directions • 1, 2 et 3 contours • 4 écarts : 0, 25, 50,75% l.f. 	Traction uniaxiale TN ISO 527-2	$S_{u,\max} = S_{u,X} (3 \text{ contours ; } 25-50\%) = 86 \text{ MPa}$
T.Osborn et al. [69] (2015)	<ul style="list-style-type: none"> • direction d'impression • orientation des filaments 	<ul style="list-style-type: none"> • 3 types unidirectionnels : FL, FW et UW 	Traction ASTM D638	$E_{\text{fibre},\max} = E_{\text{fibre},\text{FL}} \approx 2,5 \text{ GPa}$

Tableau 2-6: Synthèse des paramètres d'impression évalués et des résultats obtenus par FDM avec des filaments de PEEK

Auteurs (année)	Paramètre(s) évalué(s)	Plan d'expérience	Test(s) réalisé(s)	Résultats
D. Deng et al. [31] (2012)	<ul style="list-style-type: none"> Températures: T_{lit}, T_{ext} et T_{env} Taux de remplissage (\mathcal{T}) 	<ul style="list-style-type: none"> $T_{\text{extr.}} = 350^{\circ}\text{C} - 450^{\circ}\text{C}$ $\mathcal{T} = 100\%$ et 80% 	Traction Flexion ISO 178 Compression ASTM D695	<ul style="list-style-type: none"> $T_{\text{lit}} = 130^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{env.}} \approx 80^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{extr.}} = 400-430^{\circ}\text{C}$ $S_u(100\%, 420^{\circ}\text{C}) = 75,06 \text{ MPa}$ $S_f(100\%, 420^{\circ}\text{C}) = 132,37 \text{ MPa}$ S_c^6 (poreux, 410°C) = $29,34 \text{ MPa}$
S. Xiaoyong et al. [73] (2017)	<ul style="list-style-type: none"> Températures: T_{lit} et T_{env} Taux de remplissage 	<ul style="list-style-type: none"> $T_{\text{lit}} = 130^{\circ}\text{C}, 110^{\circ}\text{C}, 25^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{env.}} = 60^{\circ}\text{C}, 25^{\circ}\text{C}$ $\mathcal{T} = 100\%, 50\%$ avec $T_{\text{extr.}} = 430^{\circ}\text{C}$ 	Traction ISO527	<ul style="list-style-type: none"> $S_{u,\text{max}} = S_t(130^{\circ}\text{C}, 60^{\circ}\text{C}, 100\%) = 71,2 \text{ MPa}$ $\mathcal{E}_{t,\text{max}} = \mathcal{E}_t(130^{\circ}\text{C}, 60^{\circ}\text{C}, 100\%) = 19,7\%$ $S_u(25^{\circ}\text{C}, 25^{\circ}\text{C}, 100\%) < S_u(25^{\circ}\text{C}, 25^{\circ}\text{C}, 50\%)$
W. Z. Wu et al. [71] (2014)	Températures : $T_{\text{env.}}$ et T_{extr}	<ul style="list-style-type: none"> $T_{\text{env.}} = 90^{\circ}\text{C} - 130^{\circ}\text{C} / 10^{\circ}\text{C}$ avec $T_{\text{extr.}} = 350^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{extr.}} = 340^{\circ}\text{C} - 360^{\circ}\text{C} / 5^{\circ}\text{C}$ avec $T_{\text{env.}} = 130^{\circ}\text{C}$ 	Scan 3D sans contact et comparaison avec modèle pour obtenir déformation	<ul style="list-style-type: none"> $T_{\text{env,optimale}} = 130^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{extr,optimale}} = 350^{\circ}\text{C}$ avec $T_{\text{lit}} = 150^{\circ}\text{C}$

⁶ S_c : résistance en compression

Tableau 2-6 (suite): Synthèse des paramètres d'impression évalués et des résultats obtenus par FDM avec des filaments de PEEK

K. M. Rahman et al. [70] (2015)	orientations des filaments	<ul style="list-style-type: none"> • Direction Y • $T_{\text{extr.}} = 340^\circ\text{C}$ • $T_{\text{lit}} = 230^\circ\text{C}$ • $0^\circ, 90^\circ$ et $0^\circ/90^\circ$ 	Traction	
			ASTM D638	
			Compression	$\bullet S_{u,\text{max}} = S_t(0^\circ) = 73 \text{ MPa}$
			ASTM D695	$\bullet S_{c,\text{max}} = S_c(0^\circ) = 80,9 \text{ MPa}$
			Flexion	$\bullet S_{f,\text{max}} = S_f(0^\circ) = 111,7 \text{ MPa}$
W. Wu et al. [72] (2015)	<ul style="list-style-type: none"> • hauteur de couches • orientation des filaments 	<ul style="list-style-type: none"> • Direction Y • 0,2 ; 0,3 et 0,4mm • $0^\circ/90^\circ, 30^\circ/-60^\circ, \pm 45^\circ$ 	ASTM D790	$\bullet e_{\text{impact}}^7(0^\circ) >> e_{\text{impact}}(90^\circ) > e_{\text{impact}}(0^\circ/90^\circ)$
			Impact	
			ASTM D6110	
			Traction	
			GB/T 6421-1996	
W. Wu et al. [72] (2015)	<ul style="list-style-type: none"> • hauteur de couches • orientation des filaments 	<ul style="list-style-type: none"> • Direction Y • 0,2 ; 0,3 et 0,4mm • $0^\circ/90^\circ, 30^\circ/-60^\circ, \pm 45^\circ$ 	Flexion	$\bullet S_{u,\text{max}} = S_t(0,3\text{mm}, 0^\circ/90^\circ) = 56,6 \text{ MPa}$
			GB/T 9341-2008	$\bullet S_{f,\text{max}} = S_t(0,3\text{mm}, 0^\circ/90^\circ) = 56,1 \text{ MPa}$
			Compression	$\bullet S_{c,\text{max}} = S_c(0,3\text{mm}) = 60,9 \text{ MPa}$
			GB/T 1041-2008	

⁷ e_{impact} : énergie absorbée à l'impact

Le Tableau 2-6 aborde l'impression de PEEK par FDM où les différentes températures du processus apparaissent comme les paramètres majoritairement évalués dans la littérature. En effet, les trois premiers articles portent sur la recherche des températures optimales de la tête extrudeuse (T_{ext}), du lit (T_{lit}) et de l'environnement d'impression (T_{env}) [64, 71, 73]. M. Vaezi et Y. Shoufeng, et S. Xiaoyong et al. [64, 73] semblent s'entendre sur une température de lit à 130°C et aussi sur la température de l'extrudeur, les uns considérant l'impression possible entre 400°C et 430°C et les autres la fixant à 430°C. En revanche, W. Z. Wu et al. [71] fixent à 150°C la température du lit et trouvent une déformation minimale avec une température d'extrusion de 350°C, comme le montre la Figure 2-11 a). Cette différence de température optimale d'extrusion peut être due à une élévation plus importante de la température environnementale d'impression dans ces travaux comparativement à ceux cités précédemment, où elle était à environ 60-80°C. En effet, W. Z. Wu et al. ont fabriqué une imprimante 3D constituée d'une chambre et d'un système de contrôle (voir Figure 2-11 c)) permettant d'atteindre des températures environnementales plus élevées, comprises entre 90°C et 130°C. Les échantillons de meilleure qualité ont alors été obtenus à la température de chambre la plus élevée (130°C), comme le montre la Figure 2-11 b) où la déformation de gauchissement (soulèvement des extrémités de l'échantillon) est réduite à mesure que cette température est augmentée. En comparant les courbes a) et b) de la Figure 2-11, les variations de la température environnementale s'avèrent plus d'influente sur la déformation des pièces imprimées que les variations de la température de l'extrudeur.

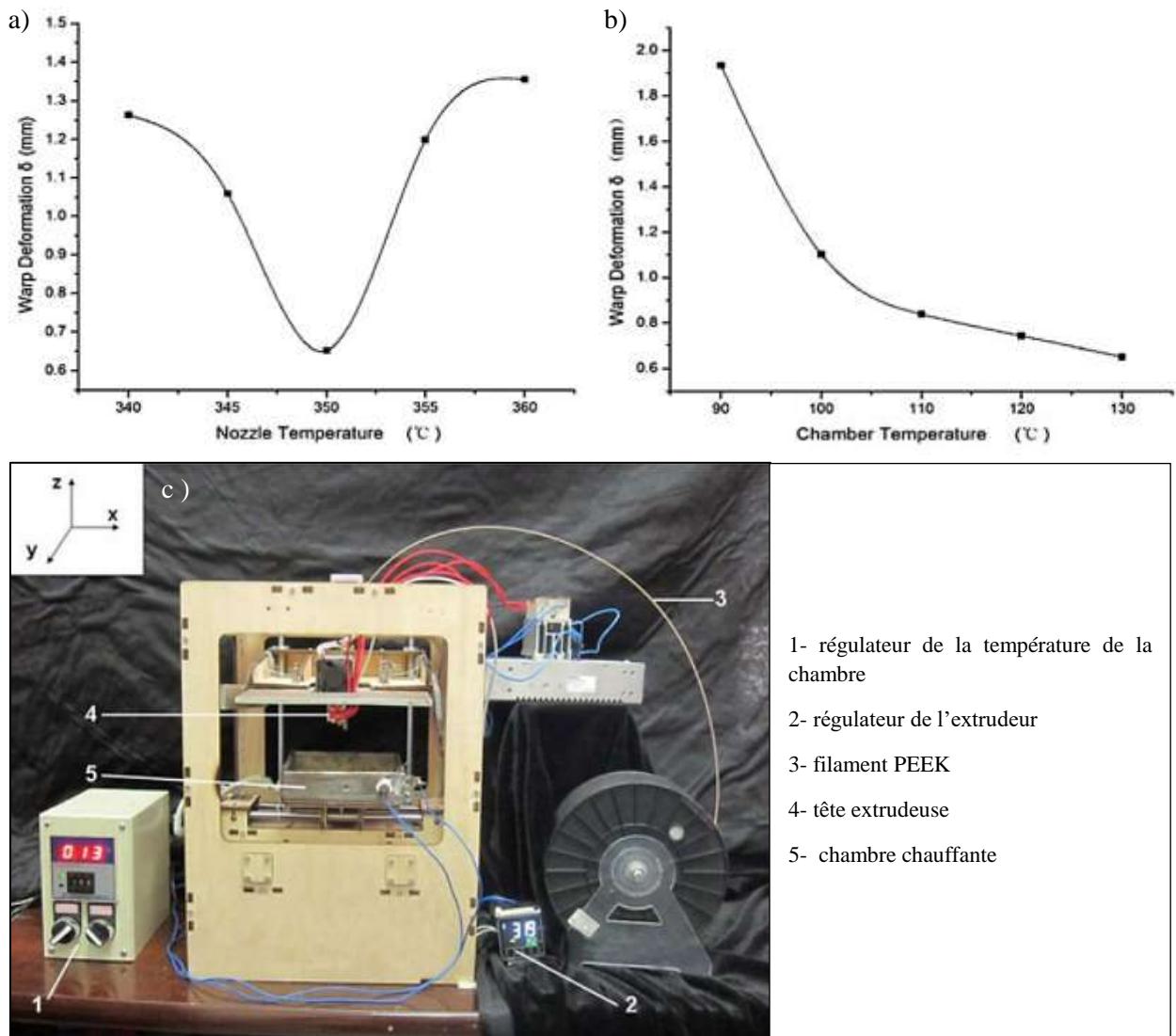


Figure 2-11: Influence de a) la température de l’extrudeur et b) la température de la chambre sur la déformation et c) imprimante fabriquée et ses constituants [71]

Les deux derniers articles du Tableau 2-6 abordent l’optimisation des paramètres du chemin d’impression, afin d’obtenir les meilleures propriétés mécaniques possibles en tension, compression et flexion [70, 72]. Leurs résultats semblent montrer qu’une orientation préférentielle des fibres à 0° est plus efficace pour les trois types de tests. W. Wu et al. [72] comparent aussi les valeurs de résistances obtenues avec le PEEK à celles de pièces fabriquées en ABS avec les paramètres d’impression prédéfinis. Les échantillons de PEEK témoignent d’un gain de 122% sur E et de 108% sur la S_u .

CHAPITRE 3 DÉMARCHE ET PERTINENCE DES TRAVAUX RÉALISÉS

3.1 Démarche du travail de recherche

Le premier objectif du projet était de poursuivre un travail amorcé dans notre groupe de recherche portant sur l'effet de la température sur les propriétés mécaniques d'échantillons imprimés par FDM. Deux axes avaient été investigués : l'étude de l'influence de la température de l'extrudeur et de l'influence de la température environnementale. Les résultats de ces études ont été présentés au Chapitre 2. Le projet présent dans ce mémoire approfondit l'étude sur l'effet d'une élévation de la température de l'environnement d'impression en ajoutant une température intermédiaire et en utilisant les autres filaments renforcés en fibres de carbone, fabriqués en interne. Ceci a permis d'investiguer aussi l'effet de l'ajout de différentes teneurs de deux types de fibres de carbone dans les filaments à température environnementale fixée.

Le second objectif de ce projet était d'imprimer par FDM pour la première fois dans notre des filaments THP, nécessitant des paramètres de température élevés comparés aux filaments de plastiques de commodité.

La première étape du travail a consisté à faire un état de l'art orienté selon deux axes : d'une part sur la technologie de FDM et d'autre part sur son utilisation avec des matériaux THP. Durant cette étape, les défis de la FDM et le potentiel des THP en tant que matière première de cette technologie sont apparus clairement. En parallèle, une revue de littérature sur les THP, les composites à matrice THP et les avancées de ces thermoplastiques dans la fabrication additive en général (i.e., sans se restreindre à la FDM) a été rédigée, constituant un livrable réclamé par SAFRAN. C'est aussi à cette étape que nous nous sommes penchés sur les différents filaments THP disponibles dans le commerce et que nous avons décidé de commencer par du Polycarbonate (PC), un thermoplastique à moyennes températures puis trois matériaux THP : du PEI, du Polyphenylsulfone (PPSU) et du PEEK. Ce choix de plusieurs filaments a été pris dans une logique d'exploration de l'utilisation de THP en FDM et d'augmentation progressive des températures d'impression.

La seconde étape a consisté à imprimer des éprouvettes en plaçant l'imprimante dans la chambre chauffante et avec du Nylon pur, renforcé à 35% de fibres de carbone de chaque type, et renforcé

à 40% de fibres d'un seul type. Plusieurs lots ont été imprimés à trois différentes températures de chambre : 25°C (sans chauffage), 35°C et 50°C, soient une température modérée et une température élevée. Tous ces échantillons ont ensuite été testés en traction assistée par corrélation d'images (DIC), une méthode optique permettant de déterminer les champs de déformation en mesurant les déplacements entre deux images. L'avantage de cette méthode est d'accéder à des champs de valeurs sur l'ensemble de la surface observée, et non à des valeurs moyennées en un point comme les moyens de mesure plus traditionnels (extensomètres et jauge de déformation). Des observations au Microscope Électronique à Balayage (MEB) des profils de rupture ont été réalisées afin de distinguer les fibres de carbone, leur orientation, leur adhésion avec la matrice polymérique, etc. Cette étape a aussi mené à la présentation d'une affiche scientifique lors d'un concours organisé par l'École Polytechnique de Montréal en marge de sa journée annuelle de la recherche, et le second prix a été remporté.

La dernière étape du projet a consisté à imprimer des barrettes de différentes structures avec les filaments de PC, PEI et PEEK à l'aide d'une nouvelle imprimante FDM dotée d'une tête extrudeuse pouvant monter à des températures élevées ($> 300^\circ\text{C}$). Des observations au microscope optique (MO) ont permis de distinguer les défauts de ces échantillons, d'identifier les températures d'impression à utiliser dans le cas du PC et du PEI et d'étudier le comportement des filaments fondus de PEEK. Finalement des éprouvettes de PC ont été imprimées et caractérisées mécaniquement de la même façon qu'au cours de la première étape. Les travaux réalisés dans cette étape sont les prémisses de l'investigation de l'impression de THP au sein du LM² et les résultats serviront aux futurs travaux prévus en collaboration avec SAFRAN.

3.2 Contexte et cohérence avec les objectifs de la recherche collaborative avec SAFRAN

Au cours de la première phase de la recherche collaborative avec SAFRAN, un procédé de fabrication de filaments de Nylon renforcés en fibres de carbone a été élaboré et les paramètres d'impression par FDM ont été déterminés. Des bobines de filaments de plusieurs teneurs massiques en renfort ont été implémentées et des tests en traction conformément à l'ASTM D638, le standard choisi, ont été réalisés. L'apport d'un renfort de fibres de carbone a pu être quantifié et l'influence de la configuration d'impression sur les performances de la pièce

fabriquée a été mise en évidence, comme mentionné à la Section 2.2.2. Une seconde phase a alors été lancée, ayant pour but d'optimiser les performances obtenues. Pour atteindre cet objectif, deux voies ont été explorées : le renforcement des filaments par des fibres de carbone plus longues et l'impression à des températures plus élevées (température de la tête extrudeuse et température environnementale d'impression). La première voie fut concluante, et une quantification de l'apport a de nouveau été réalisée. Concernant la seconde voie, une amélioration significative des propriétés a surtout été obtenue en chauffant l'environnement d'impression, dont les résultats de l'étude ont été présentés à la Section 2.3.3 et un approfondissement de cette étude a été recommandé. Le projet présenté dans ce mémoire répond à cette attente.

Les futurs travaux menés en collaboration avec SAFRAN consisteraient à réaliser la même démarche de recherche que lors de la première phase, en utilisant non plus du Nylon mais des THP. Pour cela, une revue de la littérature sur ces matériaux, leur renforcement et leurs procédés de mise en forme est au préalable nécessaire. De plus, une expertise dans l'impression de ce type de filament par FDM doit être développée. Ce projet a permis de fournir le premier livrable, le rapport bibliographique, et d'acquérir une première maîtrise de l'impression de thermoplastiques hautes températures en utilisant des filaments commerciaux issus de plusieurs résines.

CHAPITRE 4 EFFET DE LA TEMPÉRATURE ENVIRONNEMENTALE D'IMPRESSION ET PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

Afin d’approfondir l’étude des effets de la température environnementale d’impression et des filaments fabriqués en interne, des éprouvettes ont été imprimées à différentes températures et avec plusieurs filaments puis testées en traction assistée par DIC. Ce chapitre détaille la procédure expérimentale suivie et expose puis discute les résultats obtenus.

4.1 Méthode expérimentale

À des fins de comparaison, la méthodologie utilisée est similaire à celle employée lors des premiers tests précédemment réalisés [44].

4.1.1 Procédure d'impression

4.1.1.1 Matériaux

Les bobines de filament implémentées lors de travaux antérieurs [44] ont servi de matière première. Ces filaments avaient tous été mis en forme à partir du même polymère, le Nylon PA 12 (Polyamide 12) sous forme de granulés, comme montré à la Figure 4-1 a), fabriqué par EMS-Grivory sous le nom *Grilamid L 20*. Deux combinaisons avaient été investiguées, avec deux types de CF courtes fournies par Zoltek : des moulues et non-traitées, les *milled* (m-CF); et des hachées et traitées pour une meilleure adhésion au polymère, les *chopped* (c-CF). Ces deux types possèdent une teneur en carbone de 95% et sont présentés la Figure 4-1 b) et c), respectivement. Les m-CF ont un diamètre moyen de 7,2 µm et une longueur moyenne de 150 µm. Les c-CF sont plus longues, avec une longueur moyenne de 6 mm.

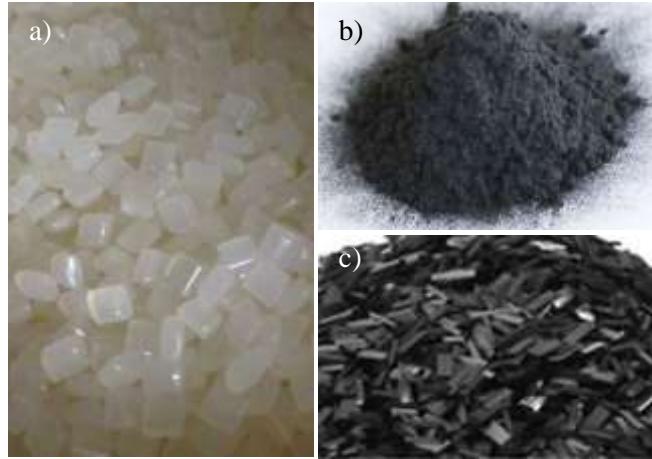


Figure 4-1: a) Nylon PA 12 sous forme de granulés et fibres de carbone courtes de type b) moulées ou *milled* et c) hachées ou *chopped* [44]

Le mélange et la fabrication des filaments avaient été menés à l'aide d'une extrudeuse à double vis et en réalisant une double extrusion. Le procédé de mise en forme est détaillé en Annexe A. Le Tableau 4-1 répertorie les différents types de filaments ainsi fabriqués et précise ceux testés antérieurement et ceux testés lors du projet faisant l'objet de ce mémoire.

Tableau 4-1: Désignation et composition des filaments fabriqués

Désignation	Type de fibres de carbone	Teneur massique (wt%)	Testé	
			antérieurement	au cours de ce projet
Nylon pur	-	0		x
20% c-CF/ Nylon	Hachées	20	x	
20% m-CF/ Nylon	Moulues	20	x	
35% c-CF/ Nylon	Hachées	35		x
35% m-CF/ Nylon	Moulues	35	x	x
40% m-CF/ Nylon	Moulues	40		x

4.1.1.2 Impression par FDM

Imprimante

Une imprimante 3D fabriquée par Leapfrog et présentée à la Figure 4-2 a été utilisée, tout comme lors des travaux précédents. Elle est équipée d'une plateforme (ou un lit) chauffante se déplaçant selon l'axe des *z* et d'une tête d'impression assurant les déplacements selon les axes *x* et *y*.

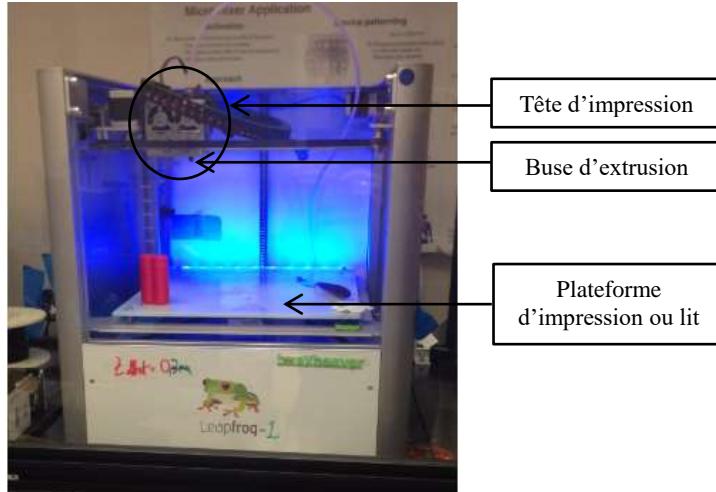


Figure 4-2: L'imprimante FDM de Leapfrog utilisée et ses principaux constituants

Embout de la tête extrudeuse ou buse d'extrusion

Les fibres de carbone étant abrasives, un embout résistant à l'usure fourni par Proto-Pasta et de diamètre 0,6mm a été utilisé pour imprimer les filaments listés dans le Tableau 4-1.

Logiciel

Afin d'imprimer des éprouvettes unidirectionnelles, le logiciel Simplify3D a été choisi.

Taille des échantillons

Les choix de l'ASTM D638 comme standard et de l'éprouvette Type IV (modèle avec une section étroite de 4x6x25 mm³) fait lors des phases antérieures ont été conservés.

Paramètres du chemin d'impression

À cause de l'hygroscopie du Nylon, les bobines de filaments ont été placées dans un four sous vide à 60°C pendant au moins 8h avant l'impression. Les échantillons ont été imprimés sans contour pour permettre d'évaluer uniquement la résistance et la rigidité associées aux fibres imprimées de façon unidirectionnelle. Les températures et les principaux paramètres du chemin d'impression utilisés sont listés dans le Tableau 4-2 suivant.

Tableau 4-2: Valeurs des températures et des paramètres du chemin d'impression.

Paramètre d'impression	Valeur fixée
Hauteur de couche	0,2 mm
Écart entre fibres	0
Température de l'embout	270°C
Température du lit	80°C
Remplissage	100 %

Configuration d'impression

Deux configurations d'impression ont été choisies :

- la configuration FL : échantillon imprimé à plat et avec les filaments orientés parallèlement à la longueur, représentée à la Figure 4-3 a),
- la configuration FW : échantillon imprimé à plat et avec les filaments orientés parallèlement à la largeur, représentée à la Figure 4-3 b).

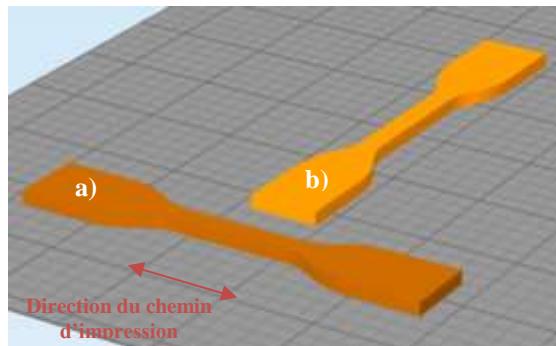


Figure 4-3: Configurations a) FL et b) FW des échantillons imprimés

Le modèle d'échantillon conçu comporte 16 couches et deux couches supplémentaires ont été ajoutées en-dessous et au-dessus. Ces couches sacrificielles ont été enlevées par la suite lors de la préparation des échantillons pour les tests assistés par DIC, où un ponçage est nécessaire.

4.1.1.3 Chambre chauffante

La conception et la fabrication d'une chambre chauffante capable d'accueillir l'imprimante avaient été réalisées au LM². Le modèle initial est présenté en Annexe B [74]. Cette chambre

avait permis une première étude des effets de la température environnementale d'impression [44] et est présentée avec ces principaux composants à la Figure 4-4.

Les parois de la chambre sont constituées de plaques de plexiglas et feuilles d'aluminium. La principale source de chaleur est fournie par des éléments thermiques installés sur du coton

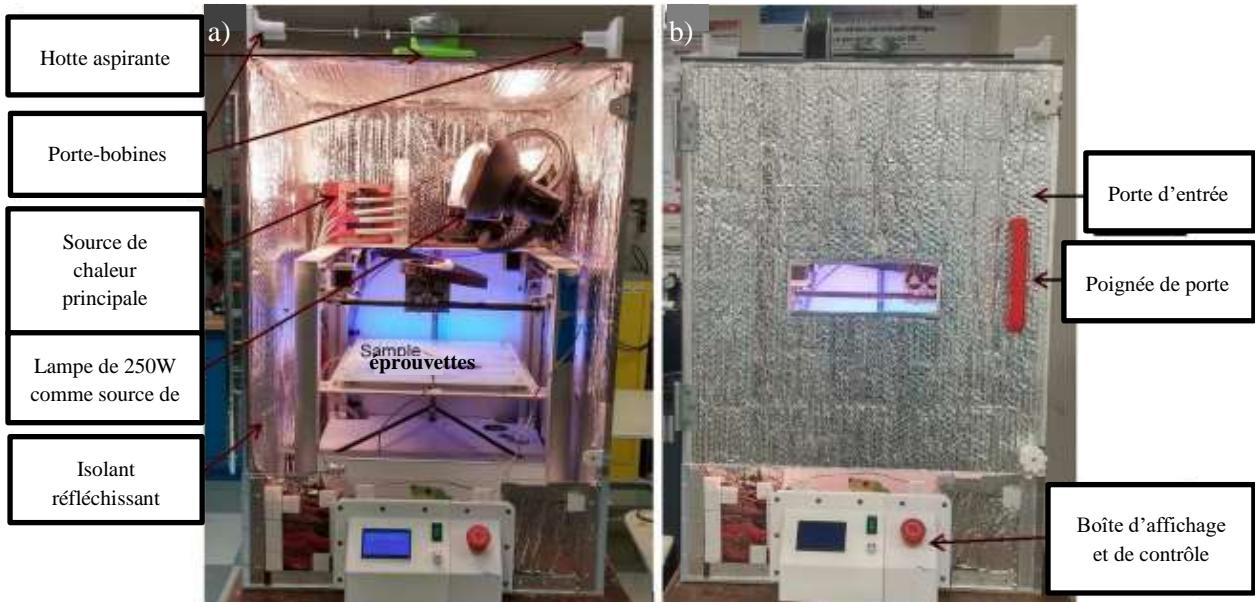


Figure 4-4: La chambre chauffante fabriquée au LM² et ses composants a) porte ouverte b) porte fermée phénolique à l'intérieur de tiges en aluminium. Deux ventilateurs assurent une circulation de l'air dans la chambre. Huit capteurs thermiques, des PT100 thermocouples de type K, et un contrôleur Arduino permettent de contrôler et surveiller la température de l'enceinte de la chambre et des éléments thermiques. Plus précisément, quatre capteurs sont positionnés au niveau des éléments chauffants et les quatre autres sont répartis dans la chambre et autour de la zone d'impression. Le porte-bobines, la hotte, la boîte de contrôle et la poignée de la porte sont des pièces imprimées en 3D au LM². Pour éviter les pertes de chaleur à travers les parois, l'intérieur de la chambre est recouvert d'un isolant thermique.

Lors des travaux présentés dans ce mémoire, trois températures différentes de la chambre ont été testées pendant l'impression d'échantillons : 25°C (sans chauffage), 35°C et 50°C.

4.1.1.4 Plan d'expérimentation

Le Tableau 4-3 récapitule les différentes configurations et températures environnementales d'impression (i.e., $T_{chambre}$) utilisées lors de l'impression des échantillons avec chaque filament.

Bien que certains problèmes de sous-extrusion ou de surchauffe de la chambre aient été rencontrés, un minimum de 6 éprouvettes par configuration et/ou température de chambre a été imprimé.

Tableau 4-3: Récapitulatif des éprouvettes imprimées

Filament	Configuration(s)	Nombre	$T_{chambre}$ (°C)
35% m-CF Nylon	FL	10	35
	FW	12	35
Nylon pur	FL	6	25
	FW	18	25, 35 et 50
40% m-CF Nylon	FL	12	25 et 35
	FW	16	25 et 35
35% c-CF Nylon	FL	6	35
	FW	7	35

4.1.2 Essais de traction assistés par DIC

Réaliser des tests en traction nécessite de répondre à plusieurs exigences concernant la machine, le nombre d'échantillons, la vitesse de test, etc. Toutes ces exigences sont détaillées dans la norme utilisée, l'ASTM D638 dans notre cas d'étude. Les plus importantes sont mentionnées dans cette section, qui explique le protocole suivi pour préparer et tester les échantillons imprimés.

4.1.2.1 Préparation des éprouvettes

Après impression, les éprouvettes ont subi plusieurs étapes de préparation avant d'être testées.

Ponçage

Toutes les éprouvettes ont été poncées sur les côtés de leur section étroite avec une lime et en étant maintenu dans un étau. Les faces de cette même section ont ensuite été poncées à l'aide d'un tour MetaServ 2000 à 450 rpm, d'abord avec du papier abrasif P1200, puis plus finement avec du P2500, afin d'obtenir des surfaces bien lisses, requises pour des tests assistés par DIC. La largeur et l'épaisseur de la section étroite de chaque éprouvette ont été mesurées à l'aide d'un pied à coulisse afin d'obtenir l'aire de chacune.

Conditionnement

Les éprouvettes ont ensuite été placées dans un four sous vide à 60°C pendant au moins 8h pour éviter toute présence d'humidité, pouvant affecter les propriétés mécaniques.

Peinture

Le système DIC nécessite de peindre un imprimé blanc tacheté de points noirs sur la section étroite des éprouvettes. Pour cela, une base blanche a été appliquée en fines couches sur toute la largeur et une longueur de 35 mm, en laissant sécher entre deux couches. Les petits points noirs sont alors tamponnés à l'aide d'un rouleau sur la base blanche, de façon la plus homogène possible. Cet imprimé moucheté de points tous différents permet au logiciel du DIC de distinguer chacun des points et de les traquer plus facilement d'images en images lors de leur déplacement causé par la déformation. Une éprouvette avant et après préparation est présentée à la Figure 4-5 a) et b), respectivement.

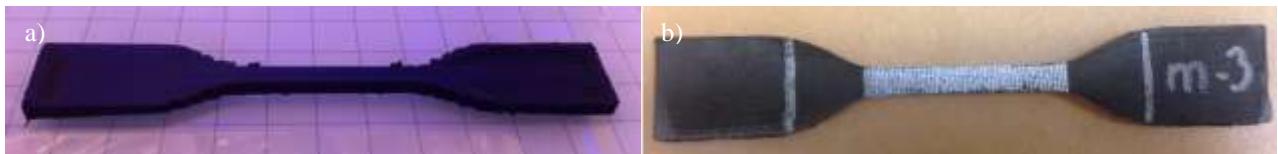


Figure 4-5: Une éprouvette a) avant préparation b) après préparation

4.1.2.2 Tests avec le système DIC

L'ensemble du dispositif utilisé lors des tests est présenté à la Figure 4-6 et est globalement constitué d'une machine de traction et du système DIC, dont les sous-ensembles sont détaillés par la suite.

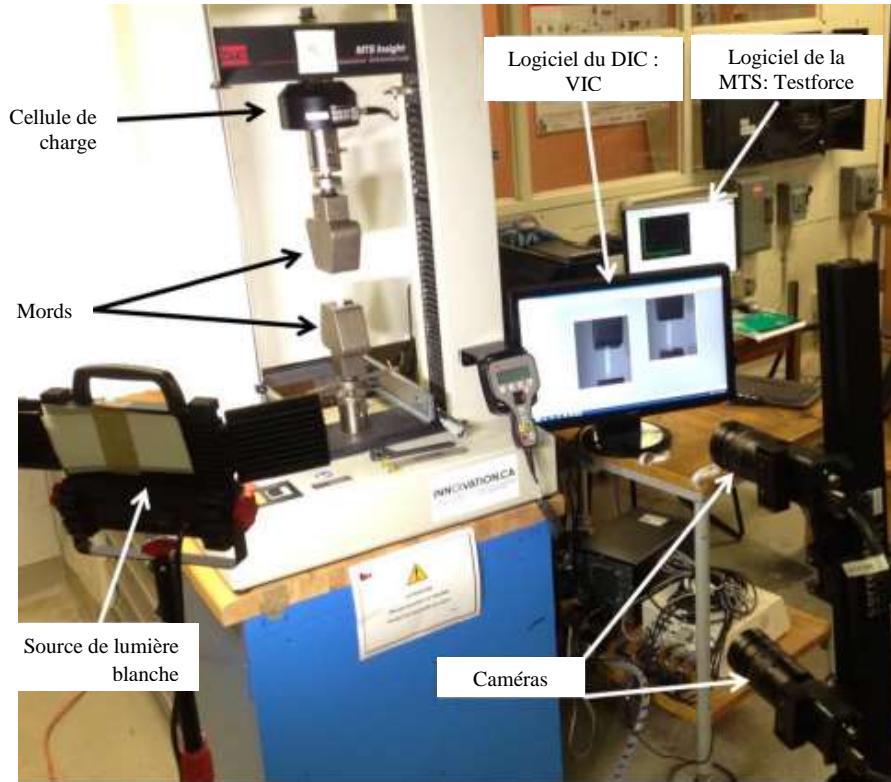


Figure 4-6: Ensemble du dispositif utilisé lors des tests de traction assistés par DIC

Machine de traction

Les essais de traction ont été réalisés avec une MTS INSIGHT équipée d'une cellule de charge de 50kN et contrôlée grâce au logiciel MTS Testforce. Les conditions environnementales des tests ont été celles du laboratoire, soient une atmosphère contenant environ 50% d'humidité et une température d'environ 20°C. Une vitesse de traction de 3,75 mm/min a été utilisée pour tous les échantillons excepté ceux de Nylon pur imprimés en configuration FL, où la vitesse a été de 10mm/min. Ceci a permis d'atteindre la rupture en moins d'une minute, comme le recommande la norme.

Système DIC

Le système DIC est constitué de deux caméras fixées sur un pied et d'une source de lumière blanche. Les caméras sont reliées à un ordinateur et la capture des photos se fait grâce au logiciel VICSnap. La position des différents éléments du montage est présentée à la Figure 4-7.

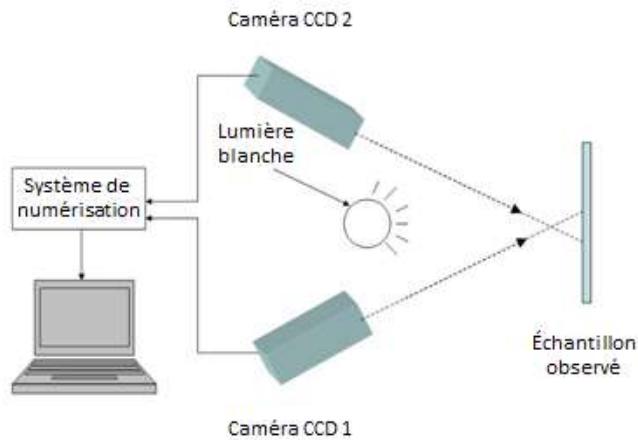


Figure 4-8: Schéma explicatif du montage des éléments du système DIC

Les avantages de ce système comparé à des extensomètres sont qu'une plus large gamme d'allongement est couverte, que les éprouvettes ne sont pas endommagées et qu'il n'y a aucune limitation sur le nombre d'extensomètres virtuels utilisés lors de l'analyse des photos. Cependant, en plus d'une préparation des échantillons évoquée précédemment, l'installation et la calibration des caméras avant lancement des tests doivent être réalisées avec rigueur. En effet, les caméras doivent être positionnées de sorte à faire un angle d'environ 20° (celle du dessus) et -20° (celle du dessous) avec l'horizontale passant entre elles-deux et allant jusqu'à l'échantillon. Le focus et la luminosité sont alors réglés. Une calibration s'ensuit, au cours de laquelle plusieurs photos d'un *calibreur*, blanc avec des points noirs et déjà reconnus par le logiciel VIC, sont prises dans différentes orientations (≈ 15) autour des trois axes x, y et z , comme par exemple dans les 4 orientations présentées à la Figure 4-8.

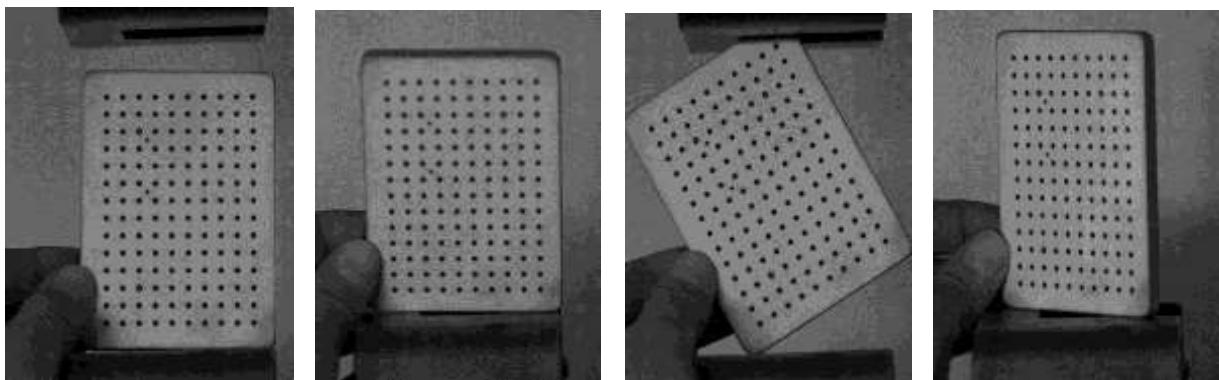


Figure 4-7: Exemple de photos de calibration dans 4 orientations différentes

Lors des tests, la vitesse de capture d'images a été fixée à 1/250 ms.

4.1.2.3 Analyse des photos et obtention des champs de déformations

Afin d'obtenir les valeurs de déformations en fonction de la force appliquée au éprouvettes, deux étapes sont nécessaires et réalisées grâce au logiciel VIC3D : l'analyse des photos et l'extraction des données. La première étape consiste à lancer la corrélation d'images entre toutes les photos prises d'une même éprouvette lors de son test, comme illustré à la Figure 4-9 où la variable affichée est le déplacement V . En fonction de la qualité de la préparation de l'échantillon, du réglage des caméras et de la précision de la corrélation demandée au logiciel, une analyse d'une éprouvette peut prendre jusqu'à une heure. Ensuite, sur la première image analysée, deux extensomètres virtuels sont placés sur la zone analysée de l'éprouvette, l'un dans la longueur et l'autre dans la largeur, comme représenté à la Figure 4-9. Les valeurs de déformations données par ces extensomètres virtuels sont alors extraites.

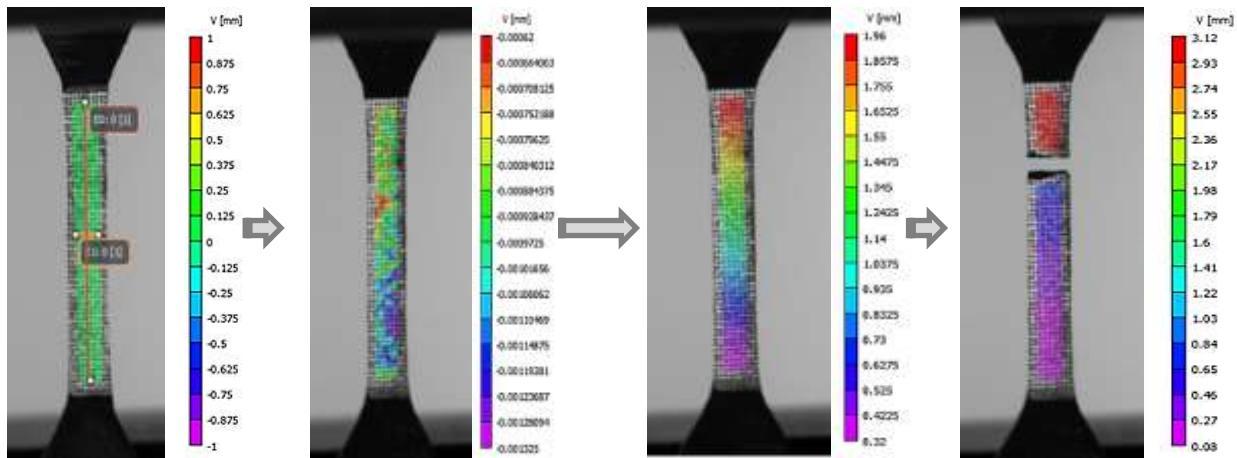


Figure 4-9: Analyse par DIC avec le déplacement V comme variable affichée et positions des extensomètres virtuels sur la première image analysée.

4.2 Résultats

Les propriétés mécaniques étudiées dans ce projet sont : E , σ_y et S_u . Pour les obtenir, les courbes de contrainte-déformation (σ - ϵ) de tous les échantillons, comme celle en exemple à la Figure 4-10, ont été tracées. Une régression linéaire des premiers points de la courbe a permis d'obtenir E , qui correspond à la valeur de la pente (ou du coefficient directeur de l'équation) de la droite obtenue. Ensuite, une droite parallèle à cette dernière et décalée de 0,002 sur l'axe de déformation a été tracée, comme montré à la Figure 4-10. Cette droite coupe la courbe σ - ϵ à une valeur de σ qui correspond à la contrainte obtenue à 0,2% de déformation permanente, soit σ_y , conformément à l'ASTM D638. Enfin, S_u est la valeur de σ maximale atteinte, soit l'ordonnée du maximum sur la courbe.

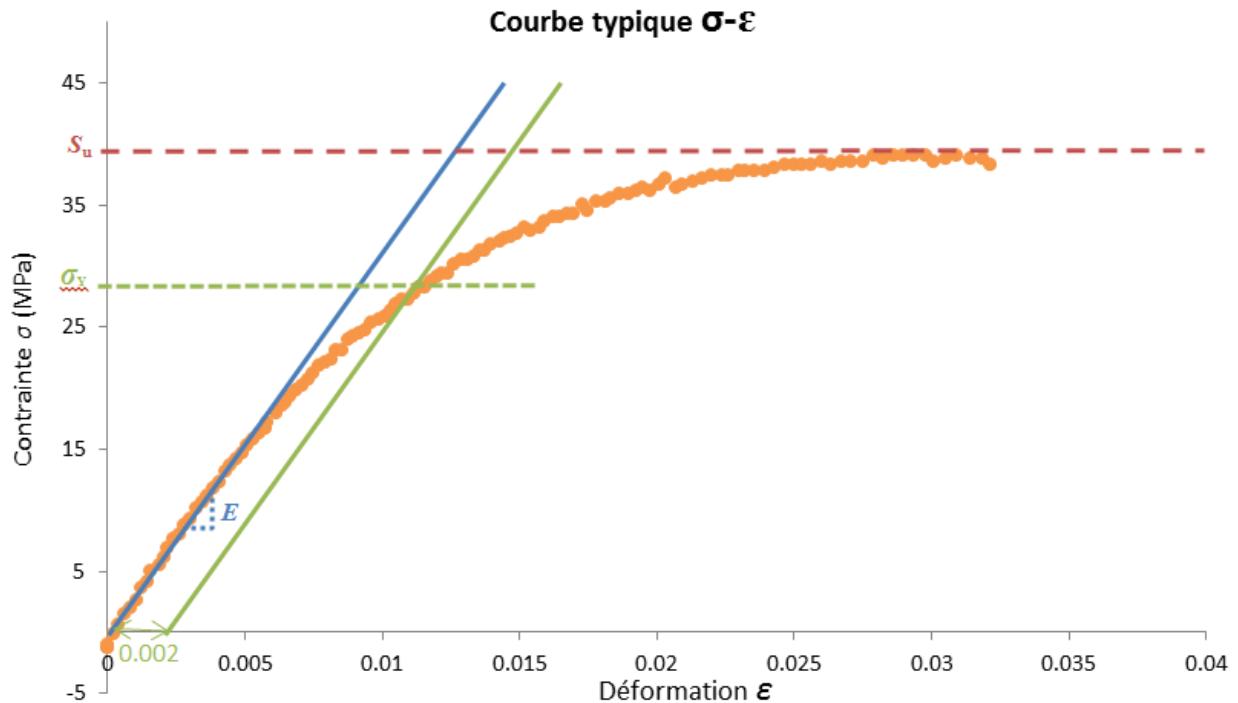


Figure 4-10: Exemple de courbe contrainte-déformation (σ - ϵ) et représentation graphique de E , σ_y et S_u

4.2.1 Effets de la température environnementale d'impression ($T_{chambre}$)

4.2.1.1 35% m-CF / Nylon

Dans le cas de ce filament de Nylon renforcé à 35% de m-CF, déjà imprimé à des températures environnementales élevées dans les travaux antérieurs [44], notre apport a été de tester l'effet d'une température modérée : 35°C. Des éprouvettes des deux configurations ont été imprimées, puis testées en tension assistée par DIC. Dans un souci de cohérence des résultats, les données obtenues précédemment - sans chauffe de la chambre (25°C), à 50°C et 65°C - ont été traitées à nouveau afin d'assurer une uniformité dans le calcul de E , σ_y et S_u . La Figure 4-11 a) et b) présente les propriétés obtenues en fonction de la température de la chambre, normalisées par rapport à celles obtenues à température ambiante et pour les échantillons de configuration FL et de configuration FW, respectivement. Les barres d'erreurs, comme dans tous les graphes affichants des valeurs normalisées présentés dans ce mémoire, correspondent au coefficient de variation (CV) entre les valeurs obtenues avec les échantillons imprimés dans des conditions identiques. Il s'obtient en réalisant le calcul suivant :

$$CV = \frac{\text{déviation standard}}{\text{valeur moyenne}}$$

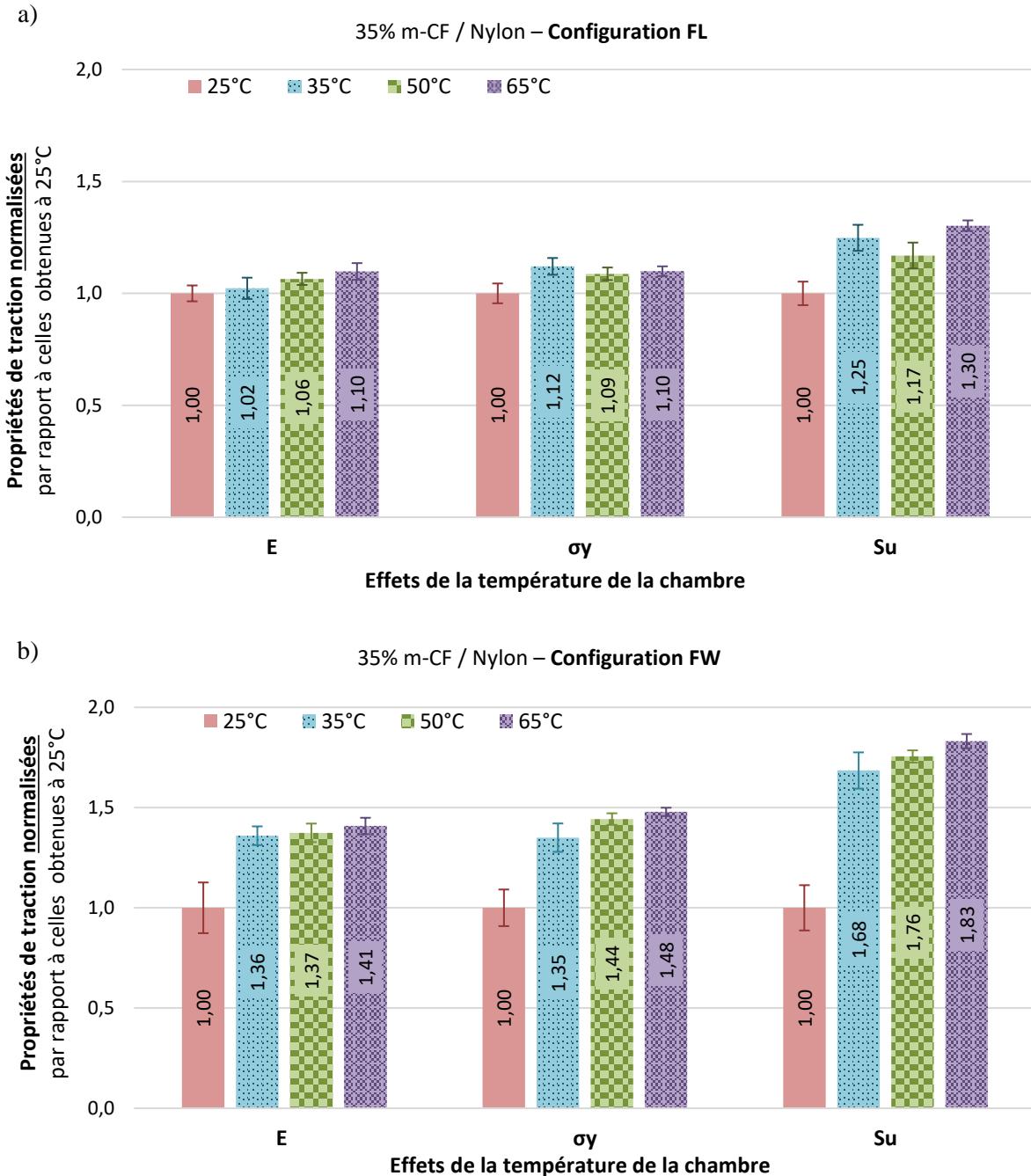


Figure 4-11: Effets d'une élévation de la température de l'environnement d'impression sur les propriétés de traction d'éprouvettes imprimées en a) configuration FL et b) configuration FW (valeurs normalisées par rapport à celles à 25°C)

Dans les deux configurations, une élévation modérée de la température environnementale semble permettre une amélioration des performances mécaniques en moyenne quasiment équivalente à l'amélioration obtenue en imprimant aux températures plus élevées, bien qu'elle soit le plus souvent légèrement inférieure.

Dans le cas des échantillons de configuration FW, l'augmentation des propriétés de traction est significative : des gains de 36%, 34% et 68% sont obtenus sur E , σ_y et S_u , respectivement, lorsque la température environnementale d'impression est élevée de 25°C à 35°C. Une chauffe à des températures plus élevées permet surtout de gagner en reproductibilité des propriétés, ce qui se traduit par des barres d'erreurs de plus en plus faibles. À 65°C, l'amélioration des propriétés est de 41%, 48% et 83% pour E , σ_y et S_u , respectivement.

Pour les échantillons de configuration FL, l'amélioration des propriétés est faible, de 2%, 12% et 25% pour E , σ_y et S_u , respectivement, lorsque la chambre chauffe à 35°C.

L'effet nettement plus important d'une élévation de la température environnementale d'impression sur les échantillons de configuration FW pourrait être dû à une meilleure diffusion entre les filaments déposés, maintenus à une température plus haute qu'en l'absence de chauffage et entraînant une meilleure adhésion entre eux. La direction de la charge étant perpendiculaire aux filaments dans ce cas-ci, les propriétés obtenues dépendent de cette force de liaison interfilament et sont alors meilleures.

La Figure 4-12 montre l'évolution de chacune des propriétés de traction en valeurs pour les échantillons des deux configurations. Les barres d'erreurs, comme dans tous les graphes présentant des valeurs non normalisées par la suite, correspondent à la déviation standard. Comme cela a été démontré lors des travaux antérieurs [43, 44], les valeurs de E , σ_y et S_u des échantillons imprimés en configuration FL sont supérieures à celles des échantillons de configuration FW. À une température environnementale d'impression de 35°C, on obtient tout de même pour ces derniers un E de 3 GPa, une σ_y de 27,8 MPa et une S_u de 40,4 MPa, comparé à 2,21 GPa, 20,7 MPa et 24 MPa sans chauffage de l'environnement, respectivement. Bien que l'amélioration des propriétés soit plus monotone en augmentant la température à des valeurs plus élevées, les meilleures propriétés sont obtenues à 65°C. Les éprouvettes de configuration FL atteignent alors un E de 5,63 GPa, une σ_y de 40,2 MPa et une S_u de 59,7 MPa et les éprouvettes de configuration FW atteignent des valeurs de 3,11 GPa, 30,6 MPa et 43,9 MPa, respectivement.

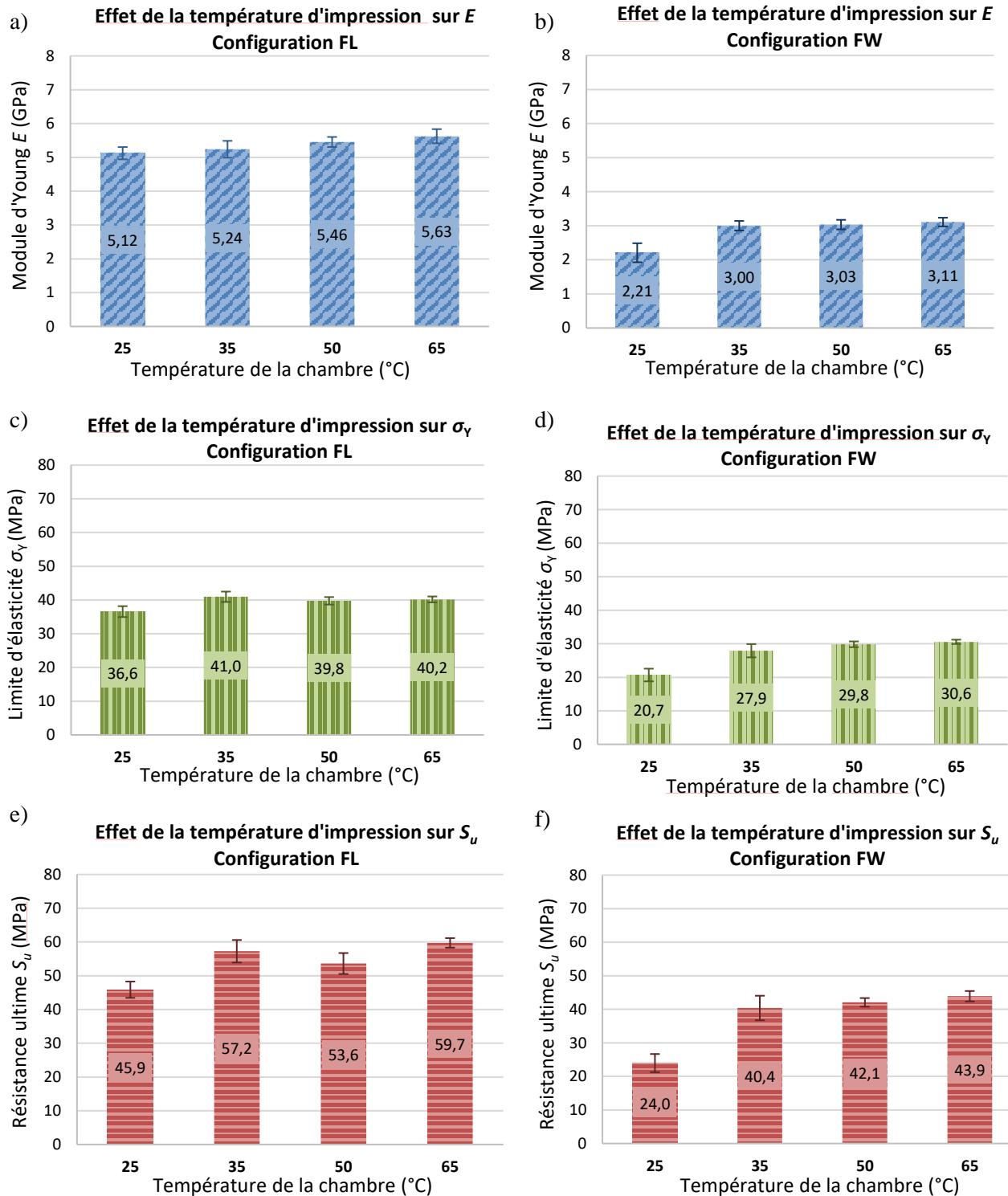


Figure 4-12: Effet d'une élévation de la température environnementale d'impression sur les valeurs de a) et b) E , c) et d) σ_y et e) et f) S_u des échantillons de configuration FL et FW, respectivement

4.2.1.2 Nylon pur et 40% m-CF / Nylon

Des études similaires ont été menées sur des éprouvettes imprimées avec des filaments de Nylon pur et de 40% m-CF / Nylon. Comme nos premiers résultats, exposés dans la section 4.2.1, montraient un effet plus important d'une élévation de la température environnementale sur les échantillons de configuration FW, seule cette configuration a été imprimée. Lors de l'impression du Nylon, aux vues de la faible différence des propriétés obtenues en chauffant à 50°C et 65°C, nous avons considéré qu'une seule de ces températures suffirait à montrer l'effet d'une chauffe à des températures élevées. Dans le cas du 40 % m-CF / Nylon, nous nous sommes directement concentrés sur les gains que pouvait permettre une température environnementale d'impression modérée. Nous avons donc imprimé des échantillons de Nylon pur à 25°C, 35°C et 50°C et des échantillons de 40% m-CF / Nylon à 25°C et 35 °C, puis nous les avons testés en traction assistée par DIC.

Comme le montre la Figure 4-13 a), une élévation de la température environnementale d'impression a un effet minime sur les propriétés mécaniques des échantillons de Nylon pur. En revanche, une amélioration significative des propriétés des éprouvettes de 40% m-CF peut être vue à la Figure 4-13 b) lorsque la température d'impression est modérée. En effet, des gains de 25%, 30% et 67% sont obtenus sur E , σ_y et S_u , respectivement, en imprimant à 35°C comparé à 25°C. Il semblerait donc que chauffer l'environnement d'impression ne soit bénéfique que lorsque l'on utilise un filament-composite renforcé en fibres de carbone.

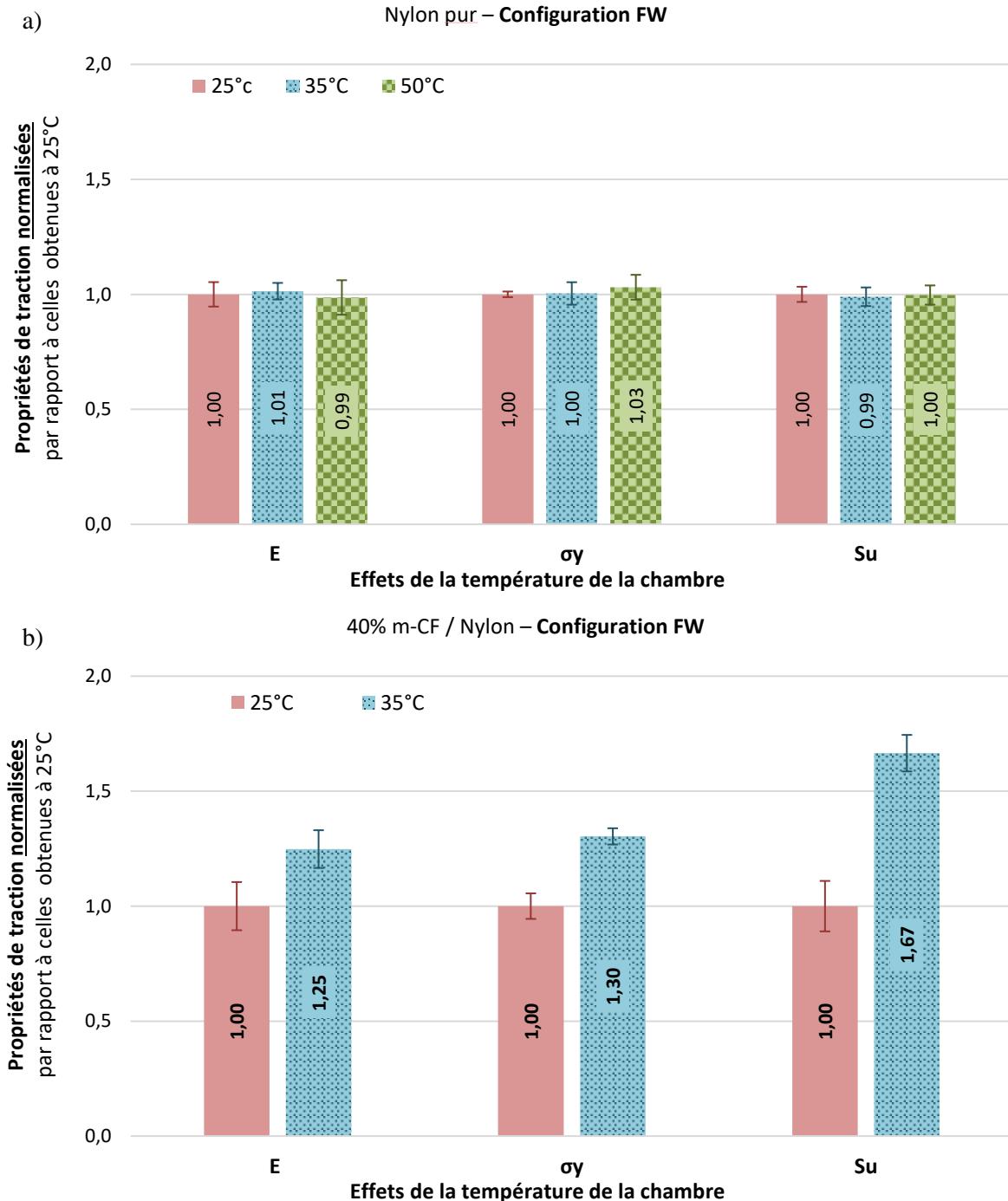


Figure 4-13: Effets d'une élévation de la température de l'environnement d'impression sur les propriétés de traction d'éprouvettes de configuration FW en a) Nylon pur et b) Nylon renforcé de 40% de m-CF (valeurs normalisées par rapport à celles obtenues à 25°C)

La Figure 4-14 présente l'amélioration en valeurs de E , σ_y et S_u obtenu sur les éprouvettes de 40% m-CF / Nylon imprimées à température ambiante et à température modérément élevée. À $T_{chambre} = 35^\circ\text{C}$, E atteint 3,28GPa, σ_y atteint 31,4 MPa et S_u atteint 46,8 MPa, ce qui est nettement supérieur aux valeurs obtenues en imprimant à 25°C.

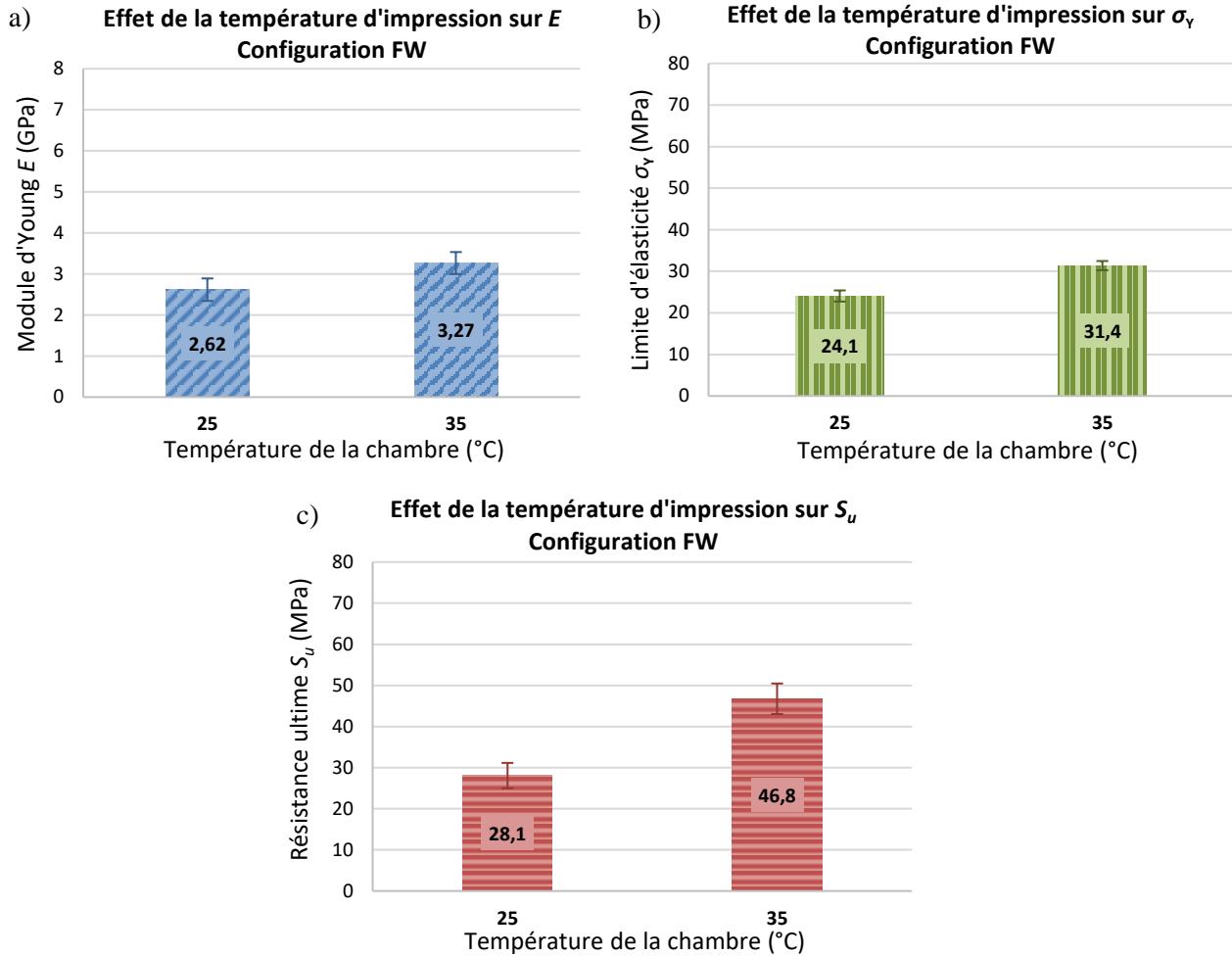


Figure 4-14: Effets d'une élévation de la température environnementale d'impression sur les valeurs de a) E , b) σ_y et c) S_u des éprouvettes de configuration FW imprimées avec du 40% m-CF / Nylon

Cette amélioration de la performance lorsque qu'on chauffe l'environnement d'impression pourrait être due à un gain en cohésion de la pièce imprimée. L'effet étant bien plus marqué sur les éprouvettes FW, dont les filaments fondus déposés sont perpendiculaires à la direction de traction, ceci témoignerait d'une meilleure cohésion intracouche (i.e., entre filaments) lorsque la température d'impression est supérieure ou égale à 35°C. La cohésion intercouche serait aussi améliorée, mettant de façon similaire en jeu l'adhésion entre un filament et un autre. L'absence d'effets significatifs lors de l'impression du Nylon pur laisse à supposer qu'un effet interne aux filament-composites déposés se produit. Nous avons pensé qu'un maintien à une température modérée ou élevée pendant toute la durée de l'impression pourrait renforcer l'adhésion des fibres à la matrice du filament.

4.2.2 Effets de différentes teneurs de deux types de CF à $T_{chambre}$ fixée

En combinant les données obtenues lors de la section 4.2.1 à celles obtenues lors des travaux antérieurs [44] et en imprimant et caractérisant des éprouvettes supplémentaires, une étude des effets de la teneur massique et du type de CF (*milled* ou *chopped*) a pu être menée. Comme précédemment, les données récupérées de tests antérieurs ont été traitées à nouveau dans un souci d'harmonisation de l'analyse.

4.2.2.1 Température ambiante ($T_{chambre} = 25^{\circ}\text{C}$)

Les effets de la teneur massique en m-CF sur les propriétés de traction ont d'abord été étudiés, sans faire chauffer la chambre environnementale d'impression, soit à température ambiante ($T_{ambiante}$). Les résultats de l'évolution de E , σ_y et S_u en fonction de cette teneur en m-CF sont présentés à la Figure 4-15 a) et b) pour des éprouvettes de configuration FL et FW, respectivement et en normalisant les valeurs par rapport aux valeurs du Nylon pur. Une nette amélioration des propriétés de traction est visible sur les échantillons de configuration FL à mesure que la teneur en fibres augmente, avec notamment un E multiplié par plus de 4 avec 40% de m-CF. Les propriétés des échantillons de configuration FW sont aussi améliorées mais plus faiblement. En effet, en termes de valeurs, comme présenté à la Figure 4-15 c) d) et e), ces derniers atteignent un E de 2,62 GPa, une σ_y de 24,1 MPa et une S_u de 28,1 MPa, comparé à des valeurs de 5,66 GPa, 38 MPa et 55,3 MPa, respectivement, pour les échantillons de configuration FL.

Cette amélioration nettement plus significative des propriétés mécaniques des éprouvettes de configuration FL est probablement due au gain en résistance et rigidité du filament engendré par l'ajout des renforts. En effet, les filaments fondus déposés étant dans ce cas-ci parallèles à la direction d'application de la charge, les propriétés obtenues sont directement liées à celle du filament. La majorité de la charge semblerait alors être supportée par les fibres de carbone, ce qui expliquerait que les propriétés s'améliorent à mesure que leur teneur augmente.

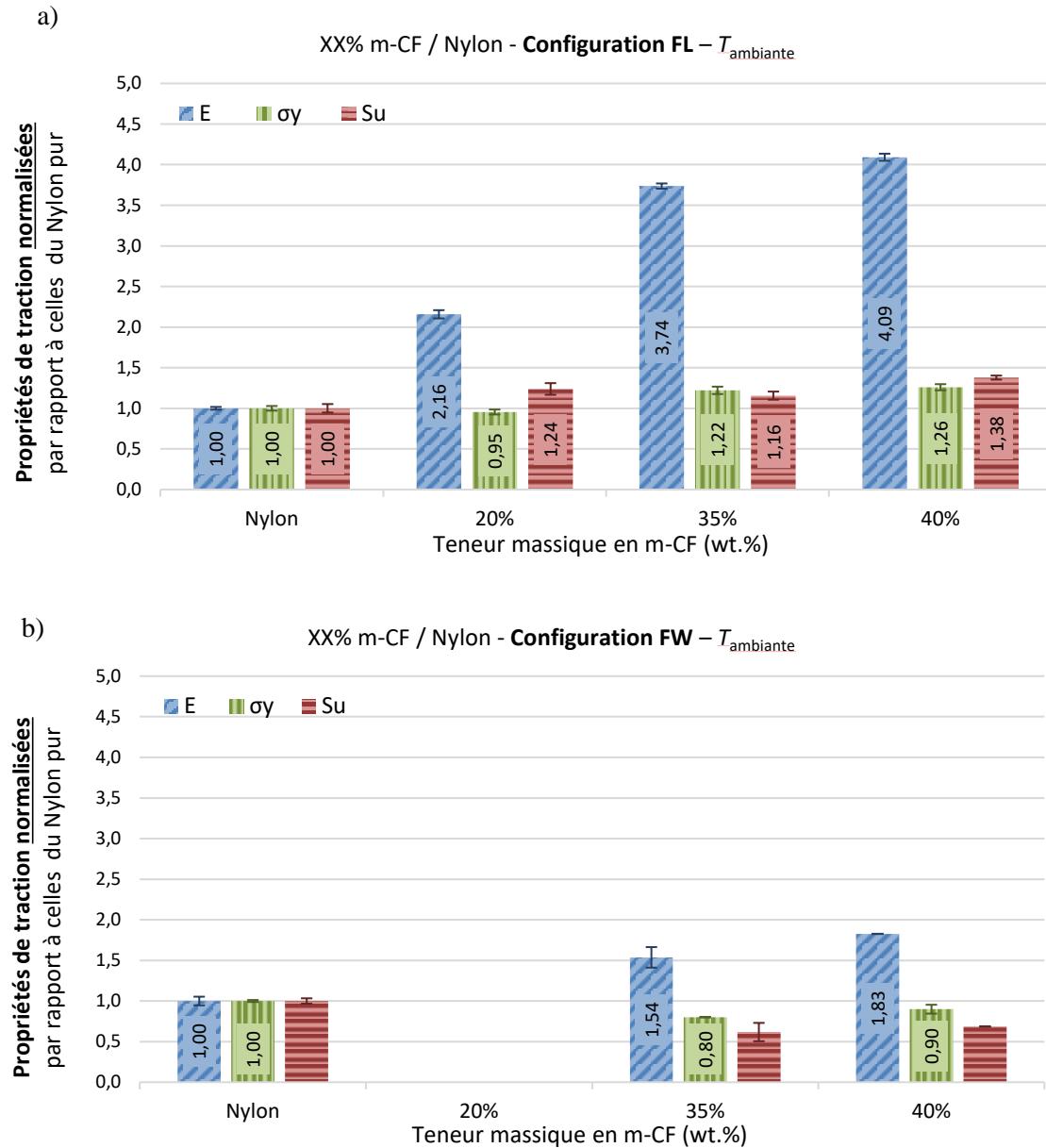


Figure 4-15: Effets de la teneur massique en m-CF sur a) et b) les propriétés d'échantillons imprimés à T_{ambiante} en configuration FL et FW respectivement (valeurs normalisées par rapport à celles du Nylon pur) et c), d) et e) les valeurs de E , σ_y et S_u dans les deux configurations, respectivement

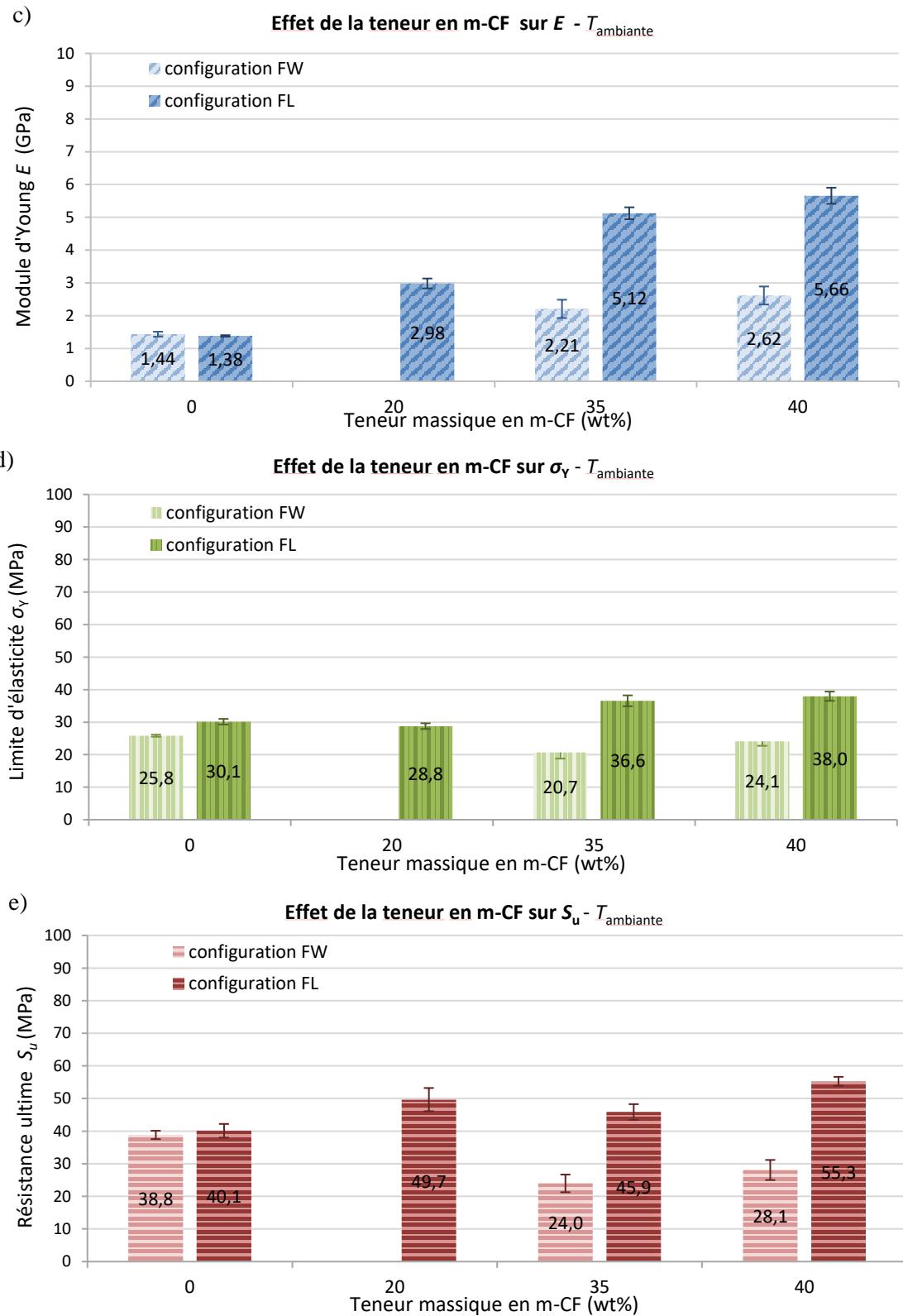


Figure 4-15 (suite): Effets de la teneur massique en m-CF sur a) et b) les propriétés d'échantillons imprimés à T_{ambiante} en configuration FL et FW respectivement (valeurs normalisées par rapport à celles du Nylon pur) et c), d) et e) les valeurs de E , σ_y et S_u dans les deux configurations, respectivement

Ensuite, les effets du renforcement par les deux types de fibres ont été investigués sur des échantillons de configuration FL. Dans un souci de comparaison, l'échelle de la Figure 4-15 a) a été adaptée en Figure 4-16 a) pour être la même que celle de la Figure 4-16 b). Ces graphes présentent chacun l'évolution des propriétés mécaniques en fonction de la teneur en m-CF et c-CF, respectivement et normalisées par rapport à celles du Nylon. Les fibres de type *chopped* apparaissent plus efficaces que les fibres de types *milled*, avec notamment un gain sur E allant jusqu'à 639% à 35 wt.%, alors qu'on atteint un gain maximum allant jusqu'à 409% avec 40wt.% de m-CF. σ_y et S_u subissent aussi une amélioration plus consistante avec les c-CF. En effet, comme le montre la Figure 4-16 d) et e), une valeur maximale de 64 MPa pour σ_y et une valeur maximale de 89,4 MPa pour S_u sont obtenues, ce qui surpassé là encore les valeurs obtenues avec 40wt.% de m-CF. Un E de 8,8 GPa est atteint avec 35 wt.% de c-CF (Figure 4-16c). La meilleure performance de ces fibres pourrait être due leur ratio taille/diamètre supérieur et à une meilleure adhésion à la matrice, grâce au prétraitement de surfaces qu'elles ont subi.

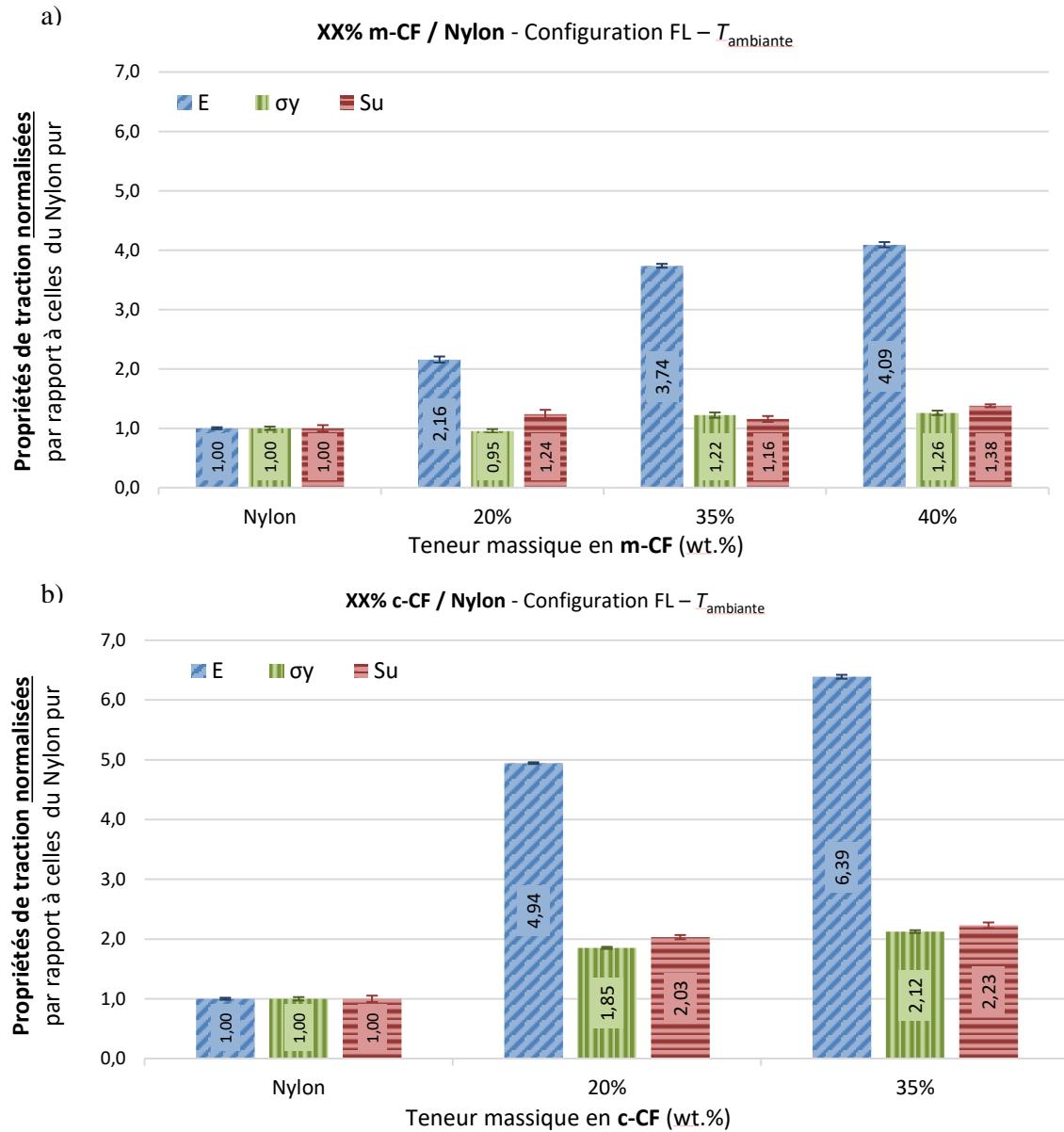


Figure 4-16: Effet de la teneur en a) m-CF et b) c-CF sur les propriétés mécaniques (valeurs normalisées par rapport à celles du Nylon pur) et sur les valeurs de c) E , d) σ_Y et e) S_u

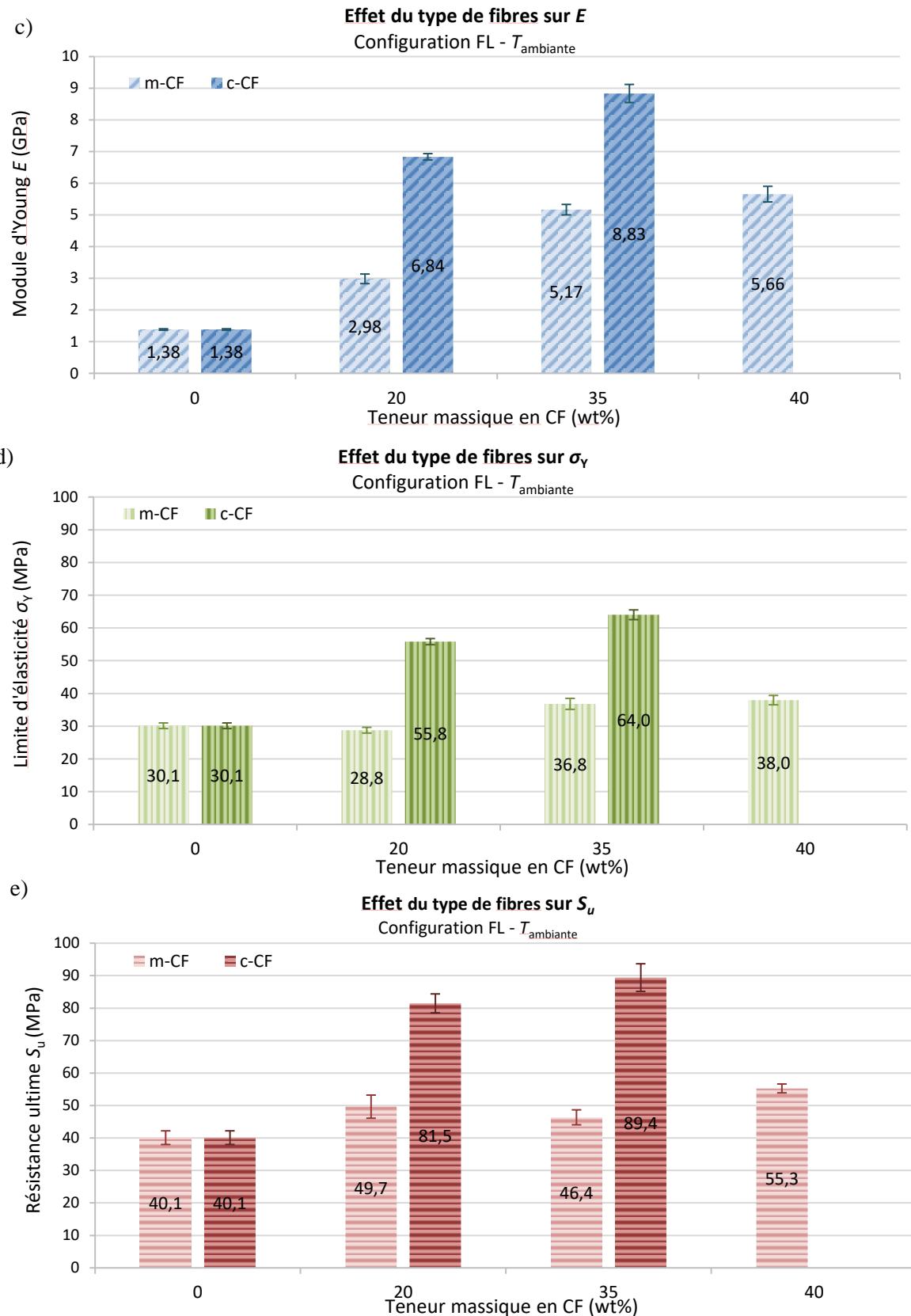


Figure 4-16 (suite): Effet de la teneur en a) m-CF et b) c-CF sur les propriétés mécaniques (valeurs normalisées par rapport à celles du Nylon) et sur les valeurs de c) E , d) σ_Y et e) S_u

4.2.2.2 Température modérément élevée ($T_{chambre} = 35^{\circ}\text{C}$)

Des éprouvettes de Nylon renforcé à 35% de c-CF pur ont été imprimées dans les deux configurations à une température environnementale chauffée à 35°C , puis testées. Les résultats obtenus ont alors pu être comparés à ceux du 35 % m-CF / Nylon imprimé à la même température (section 4.2.1.1), mais aussi aux 40% m-CF / Nylon (section 4.2.1.2) dans le cas de la configuration FW. Ceci a permis à la fois de rassembler les valeurs des propriétés mécaniques obtenues avec une température environnementale modérée pour chacun des filaments et d'approfondir l'étude de l'effet de la teneur en deux types de CF. La Figure 4-17 a), b) et c) présente les valeurs de E , σ_y et S_u obtenues. Quelle que soit la configuration, les éprouvettes les plus performantes apparaissent être celles imprimées avec le 35% c-CF / Nylon, surpassant même celles imprimées avec le 40% m-CF / Nylon en configuration FW. Un E de 7,62 GPa, une σ_y de 53,6 MPa et une S_u de 75 MPa sont alors obtenus pour les échantillons FL, et de 3,68 GPa, 35,7 MPa et 55,3 MPa pour ceux en configuration FW, respectivement. Ainsi, il apparaît plus efficace de renforcer un filament avec des fibres plus longues, telles que les *chopped*, à plus faible teneur qu'avec des fibres plus courtes, telles que les *milled*, à une teneur plus élevée. Le traitement surfacique subit par les c-CF pour une meilleure adhésion à la matrice (selon le fabricant) peut aussi entrer en compte. De plus, nous avons remarqué que les filaments renforcés avec ce type de fibres s'impriment plus facilement par FDM que ceux renforcés de m-CF, où un problème de sous extrusion plus important est souvent rencontré. Ceci pourrait être causé par à une tendance à l'agglomération de ces fibres de dimension plus petites dans le filament, ce qui rendrait son passage au niveau de la buse d'extrusion plus difficile.

Enfin, en chauffant seulement de façon modérée la température environnementale d'impression, de meilleures et bonnes propriétés mécaniques des pièces peuvent être obtenues.

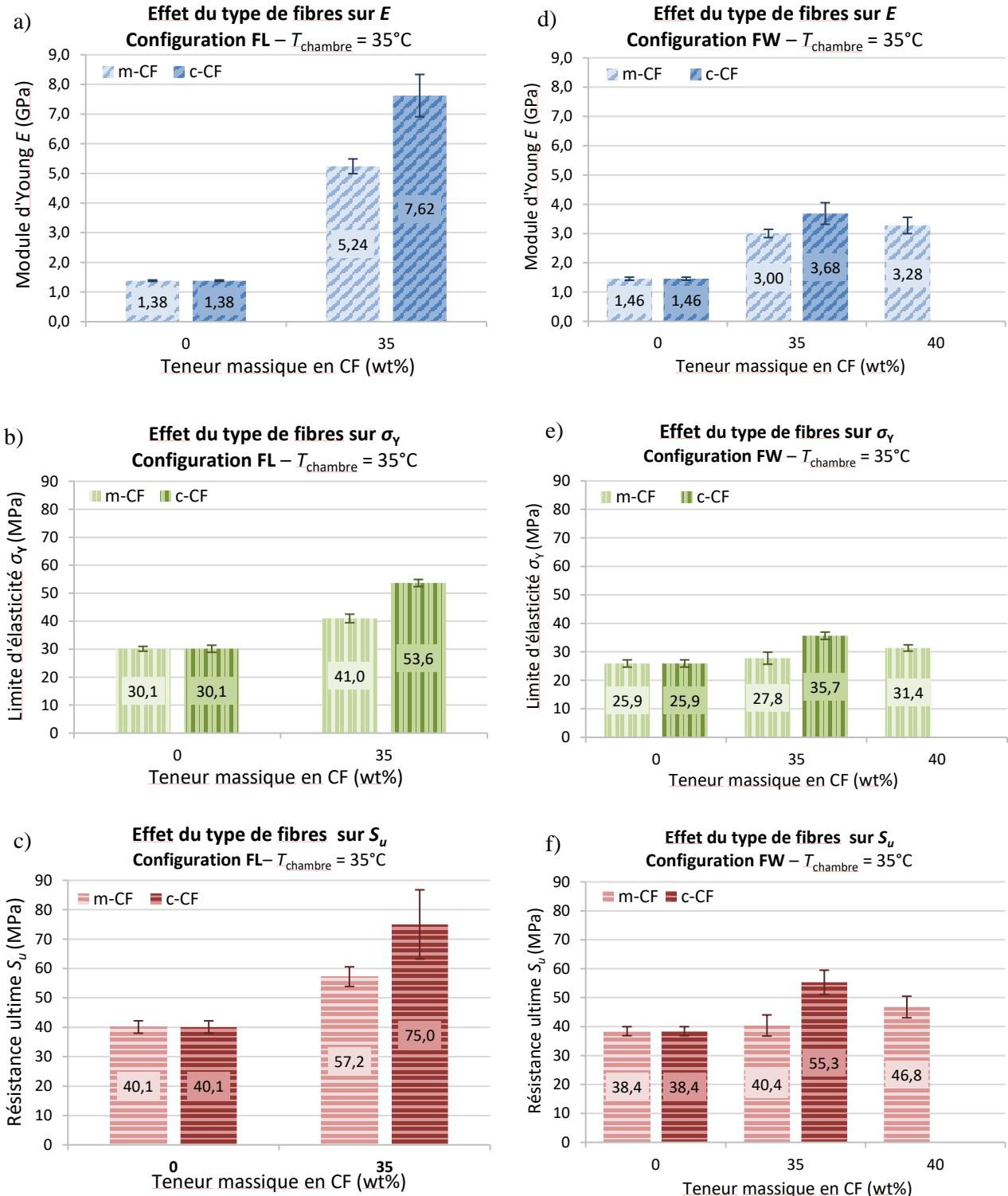


Figure 4-17: Effet du type de fibres sur les valeurs de a) et b) E , c) et d) σ_y et e) et f) S_u des échantillons de configuration FL et FW, respectivement et imprimés à $T_{chambre} = 35^{\circ}C$

4.2.3 Observations au MEB

Des observations des profils de rupture de chaque lot d'éprouvettes, caractérisé par leurs conditions d'impression, ont été réalisées. La Figure 4-18 présente les faciès des éprouvettes des deux configurations imprimées à 25°C avec du Nylon en a) et b); et à 35°C avec du 35% m-CF / Nylon en c) et d). La structure en couches est nettement visible et sur le faciès de l'échantillon FL de Nylon renforcé, les filaments déposés sont aussi distinguables. On peut aussi voir des porosités entre les couches et entre les filaments, qui constituent les principaux défauts engendrés par la technologie de FDM. Les modes de rupture du Nylon pur et du 35% m-CF / Nylon sont différents : une plastification des filaments de Nylon pur avant rupture peut être observée, alors que dans l'autre cas les filaments semblent se rompre de façon nette.

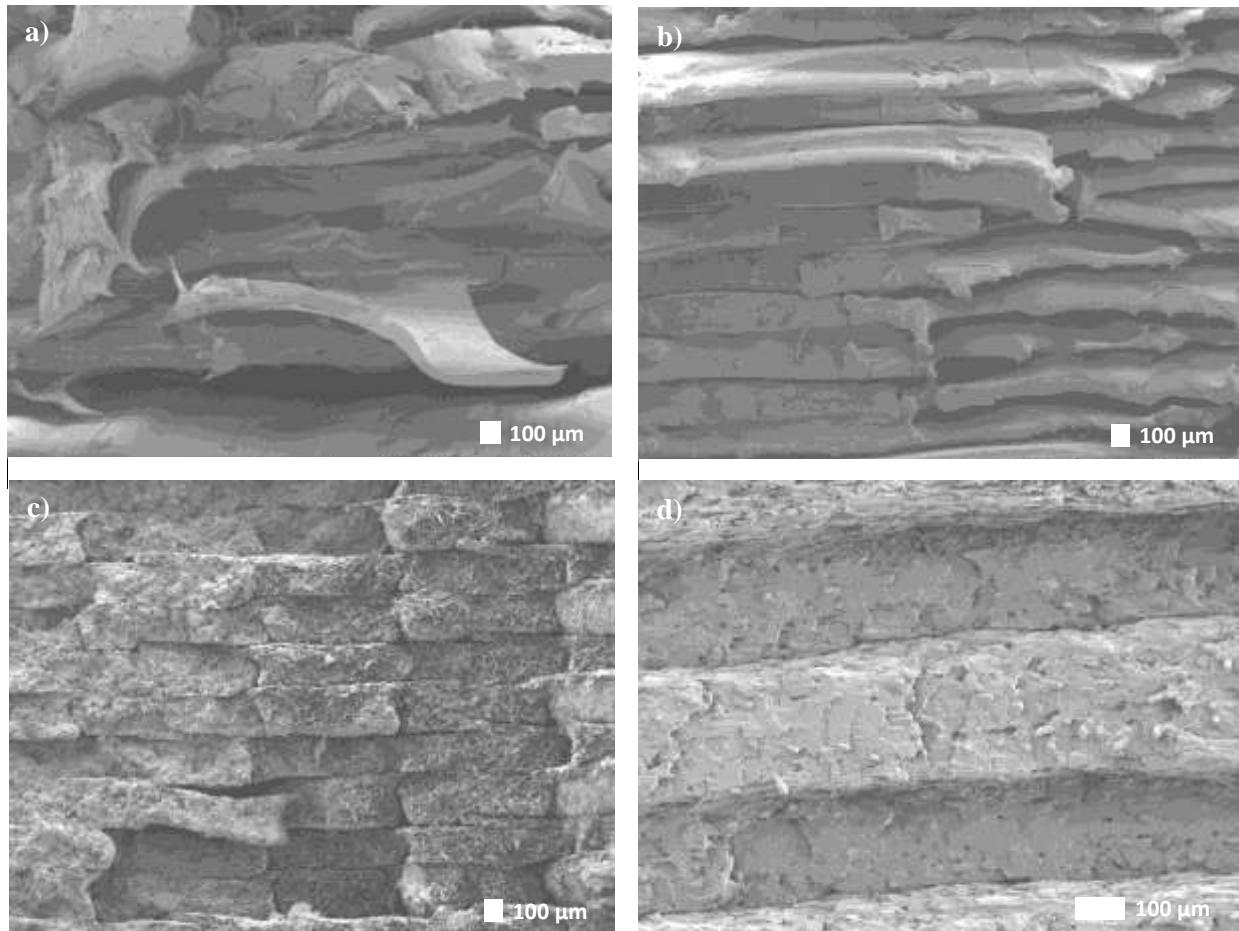


Figure 4-18: Images MEB des faciès de rupture d'éprouvettes a) et b) de Nylon imprimées à 25°C en configuration FL et FW, respectivement; et c) et d) de 35% m-CF / Nylon imprimées à 35°C en configuration FL et FW, respectivement

À la Figure 4-19 a), b) et c), des images du faciès de rupture d'échantillons de 40% m-CF / Nylon imprimés à 25°C dans le premier cas et 35°C dans les deux autres cas sont présentées. La cohésion entre deux couches apparaît légèrement supérieure sur les échantillons imprimés à 35°C. À l'image c), les fibres de carbone insérées dans le Nylon sont visibles, alignées majoritairement dans la longueur et parallèlement au filament. Elles ont donc une orientation préférentielle dans la direction de déposition du filament. Dans la mesure où cette direction est un des paramètres que l'on choisit lors de l'impression, il est alors possible de choisir l'orientation des fibres souhaitée. Ceci constitue un avantage non négligeable de la fabrication par extrusion de matériaux composites.

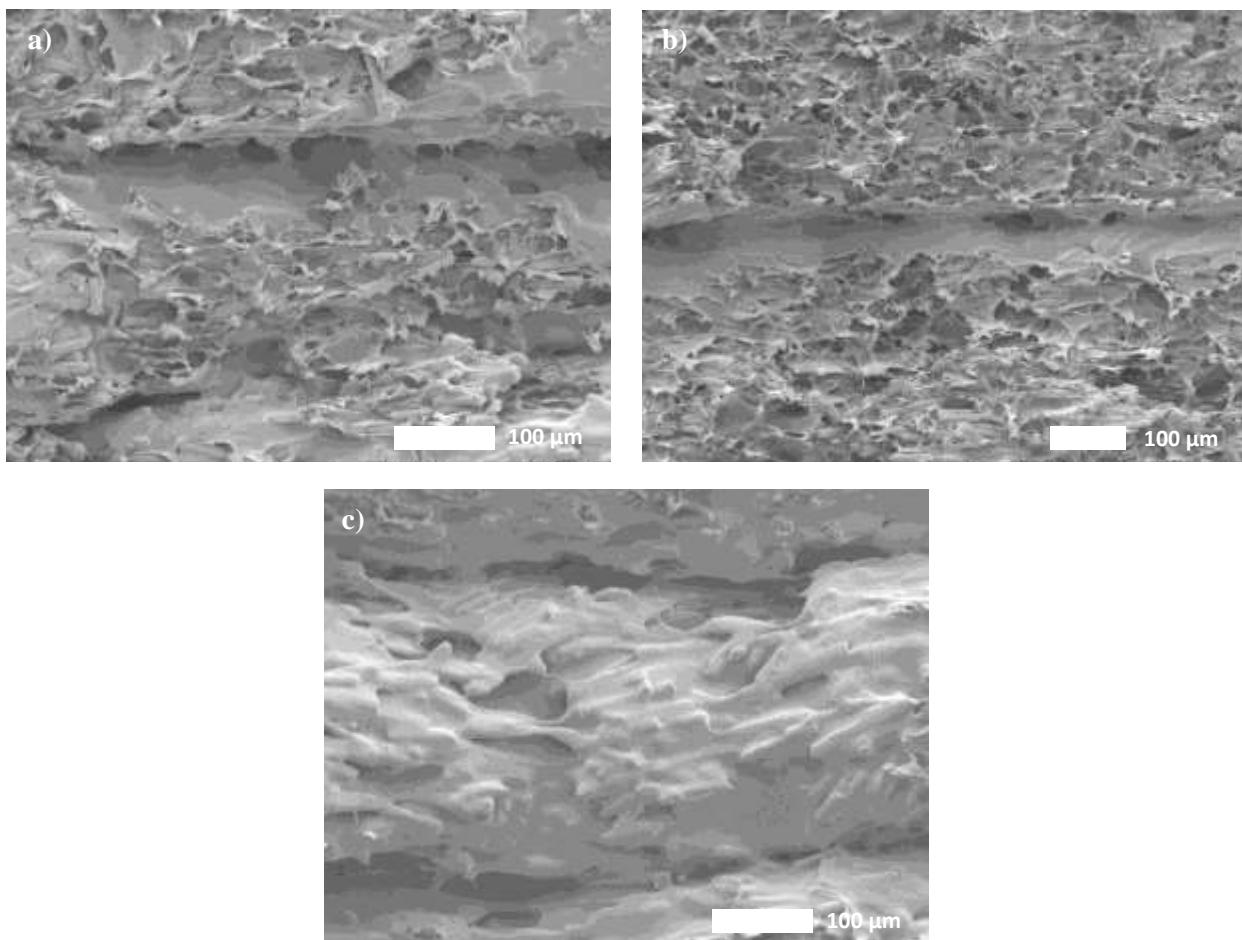


Figure 4-19: Images MEB des faciès de rupture d'éprouvettes de 40% m-CF / Nylon imprimées à a) 25°C et b) et c) 35°C

À l'aide d'un grossissement supérieur, les fibres des deux types et sur des éprouvettes des deux configurations ont été observées de plus près. La Figure 4-20 présente quatre des images obtenues, chacune ayant un type de fibres et une configuration en particulier. L'orientation

préférentielle des fibres évoquée précédemment apparaît clairement, celles-ci étant dirigées perpendiculairement au plan de l'image dans le cas des configurations FL, et parallèlement dans le cas des configurations FW. La présence de Nylon sur les fibres et le faible nombre de ‘trous d’arrachement’ de fibres visible en configuration FL laissent supposer une adhésion adéquate entre fibres et matrice. Cependant, la meilleure adhésion supposée des fibres *chopped* comparées au *milled* due à leur prétraitement n’est pas observable de façon évidente. Néanmoins, sur les faciès des échantillons de configurations FW, les m-CF sembleraient former des agglomérats (comme entouré en rouge) contrairement aux c-CF qui semblent mieux se répartir dans la matrice. Cette répartition homogène pourrait constituer un des facteurs à l’origine de leur meilleure efficacité en tant que renforts dans le filament.

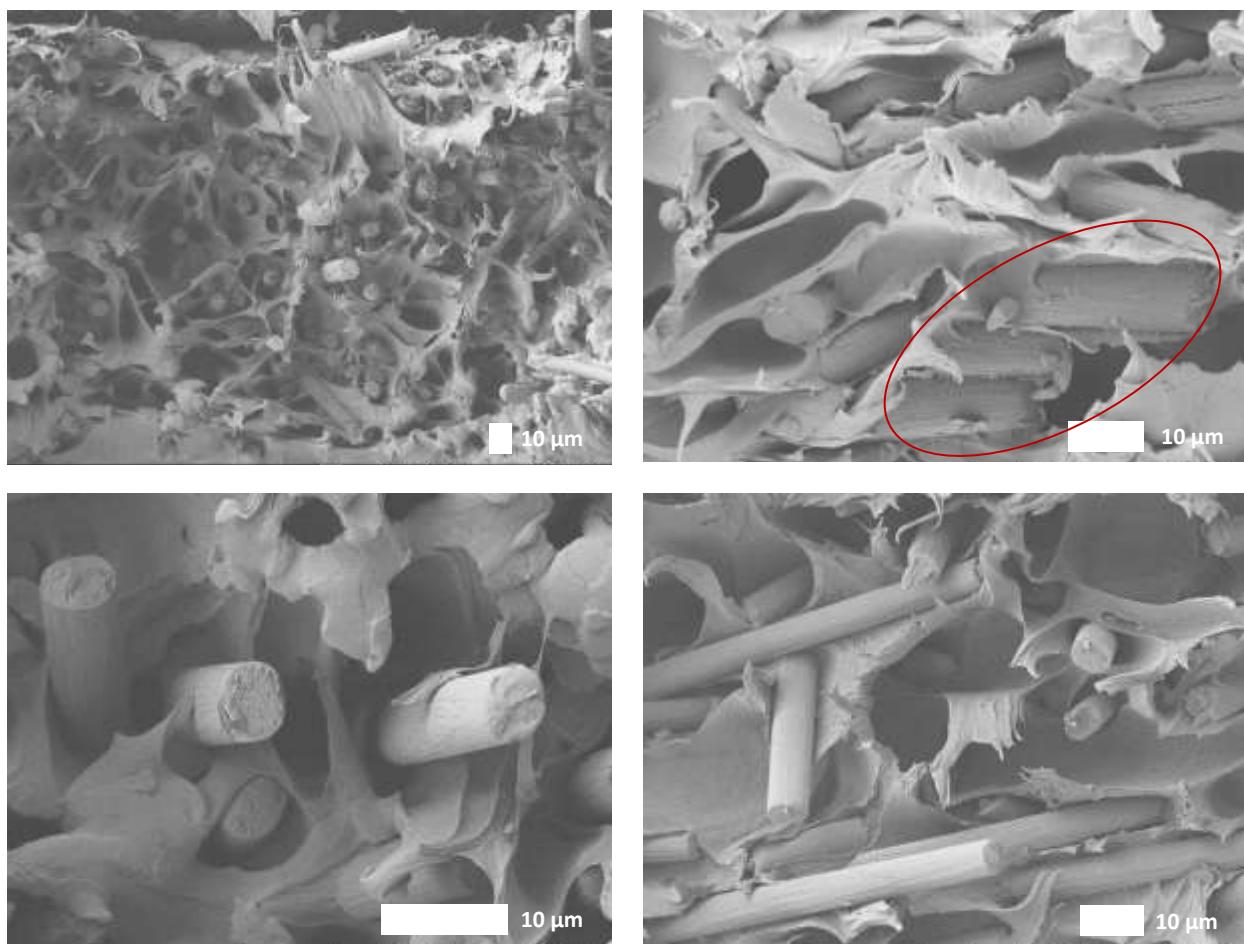


Figure 4-20: Images MEB de a) et b) m-CF sur des faciès d’échantillons de 35% m-CF / Nylon de configurations FL et FW, respectivement et de c) et d) c-CF sur des faciès d’échantillons de 35% c-CF / Nylon de configurations FL et FW, respectivement et imprimés à 35°C

4.3 Synthèse et discussion

Le Tableau 4-4 synthétise les principales performances des différents matériaux étudiés obtenues dans les conditions spécifiées.

Tableau 4-4 : Tableau-synthèse des propriétés obtenues avec les différents filaments dans des conditions spécifiées

Matériaux	Configuration	Tchambre (°C)	Propriétés		
			E (GPa)	σ_Y (MPa)	S_u (MPa)
Nylon pur	FL	25	1,38	30,1	40,1
	FW		1,44	25,8	38,8
20 % m-CF/ Nylon	FL	25	2,98	28,8	49,7
20 % c-CF/ Nylon	FL	25	6,84	55,8	81,5
35 % m-CF/ Nylon	FL	25	5,12	36,6	45,9
	FW	35	3,00	27,9	40,4
35 % c-CF/ Nylon	FL	25	8,83	64,0	89,4
	FW	35	3,68	35,7	55,3
40 % m-CF/ Nylon	FL	25	5,66	38,0	55,3
	FW	35	3,27	31,4	46,8

La performance nettement supérieure en traction des éprouvettes imprimées en configuration FL par rapport à celles imprimées en configuration FW, en gardant les autres conditions d'impression identiques et avec le même matériau, avait déjà été constatée lors des travaux antérieurs [43, 44]. De plus, des résultats similaires sont présents dans la littérature. En effet, les filaments imprimés dans cette configuration sont orientés à 0° et de nombreux auteurs, qui ont investigué l'effet de plusieurs orientations, ont obtenu les meilleures propriétés avec cet angle-ci [30, 33, 34, 38]. Lorsque des fibres de carbones courtes sont insérées dans le filament, la différence de gain en propriétés obtenu sur les éprouvettes des deux configurations a été expliquée par une meilleure contribution à la capacité de chargement des fibres lorsque celles-ci sont alignées avec la direction d'application de la charge [43]. Comme les fibres s'alignent avec

la direction d'impression, et que celle-ci est parallèle à la direction de traction dans le cas des éprouvettes de configurations FL, les valeurs de E , σ_y et S_u connaissent alors une amélioration substantielle et de plus en plus importante à mesure que la teneur en fibres augmente.

Le fait qu'une élévation modérée de la température environnementale d'impression permette une nette amélioration des propriétés mécaniques des éprouvettes imprimées en FW proviendrait notamment d'une meilleure cohésion des filaments déposés d'une même couche. En effet, comme les fibres imprimées sont orientées à 90°, elles sont perpendiculaires à la direction d'application de la charge ce qui rend la résistance en traction presque directement liée à la force de liaison interfibre. Cette meilleure adhésion pourrait être expliquée par un ralentissement du refroidissement du filament déposé, suffisant pour permettre une interdiffusion avec son voisin déposé juste après, voire celui du dessus déposé un peu plus tard (amélioration de la cohésion entre couches). Une amélioration des propriétés par la suite plus faible lorsque l'environnement d'impression est chauffé à de hautes températures pourrait s'expliquer par le fait qu'un environnement d'impression à 35°C permet déjà d'avoir une température locale dans la zone d'impression de l'éprouvette supérieure à la T_g du Nylon (40-43°C), donc permet déjà aux mécanismes d'interdiffusion entre fibres et couches d'avoir lieu.

Enfin, l'efficacité supérieure de fibres de carbone *chopped* comparées aux *milled* est probablement due à la différence de taille de ces deux types de fibres et à leurs antécédents chimiques, les premières étant plus grandes que les secondes et ayant subi un prétraitement surfacique. Comme cela avait déjà été reporté par F. Ning et al. [40], des fibres plus longues améliorent davantage les propriétés mécaniques des composites formés que des fibres plus courtes.

CHAPITRE 5 IMPRESSION DE FILAMENTS THP ET LEURS PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

Afin de trouver les paramètres d'impression des filaments de PC, PEI et PEEK, des échantillons de différents taux de remplissage et différentes orientations des fibres ont été imprimés à plusieurs températures d'extrusion. Des observations au microscope optique ont permis d'identifier la température d'extrusion optimale de chacun de ces matériaux. Des éprouvettes ont alors pu être imprimées et testées en traction suivie par DIC. Ce chapitre détaille la procédure expérimentale menée et expose les résultats obtenus.

5.1 Procédure expérimentale

5.1.1 Matériaux

Suite à une étude du marché des filaments de THP et après nous être renseignés sur leurs propriétés et leurs paramètres d'impression, nous avons choisi d'investir dans du PC, du PPSU, du PEI et du PEEK. Le but était de monter progressivement en température et difficulté d'impression, en commençant par le PC, un thermoplastique à moyennes températures, puis en investiguant le PEI et le PPSU et en terminant par le PEEK, le plus délicat à imprimer. Nous avons commandé la bobine de PC sur le site filament.ca, l'une des principales sources du Canada pour le matériel d'impression 3D. Les bobines de filaments de PPSU, PEI et PEEK ont été commandées à l'entreprise hollandaise 3D4MAKERS. Pour toutes les bobines, présentées à la Figure 5-1, notre choix s'est arrêté sur les filaments naturels et de diamètre 1,75mm.



Figure 5-1: Bobines de filaments de a) PC et b) PPSU, PEI et PEEK

Des températures d'impression pour chacune de ces bobines ont été recommandées par les fournisseurs, soient la température d'extrusion (T_{extr}) et celle du lit (T_{lit}), présentées dans la Tableau 5-1.

Tableau 5-1: Températures d'impression recommandées pour chacun des matériaux

Températures d'impression recommandées	PC	PEI	PPSU	PEEK
T_{extr} (°C)	270 – 310°C	340-360°C	360-400°C	355-390°C
T_{lit} (°C)	120 – 140°C	120°C	140°C+	120°C

En effet, les valeurs précises de ces températures dépendent de l'imprimante utilisée et de son environnement.

Par manque de temps, notamment dû aux imprévus survenus au laboratoire, nous avons décidé de remettre à des travaux postérieurs l'étude du PPSU.

5.1.2 Impression par FDM

Imprimante

Une imprimante 3D de type Prusa i3 fabriquée par 3DBranchés avec le soutien de 3DTRIP, et présentée à la Figure 5-2 a) a été utilisée. Elle est dotée d'une tête extrudeuse Dyze Design pouvant atteindre jusqu'à 500°C, montré à la Figure 5-2 b), et d'un système de refroidissement à l'eau. Son lit chauffant assure les déplacements selon l'axe y et sa tête d'impression se déplace selon les axes x et z. Un embout de diamètre 0,4mm a été utilisé pour imprimer tous les filaments.

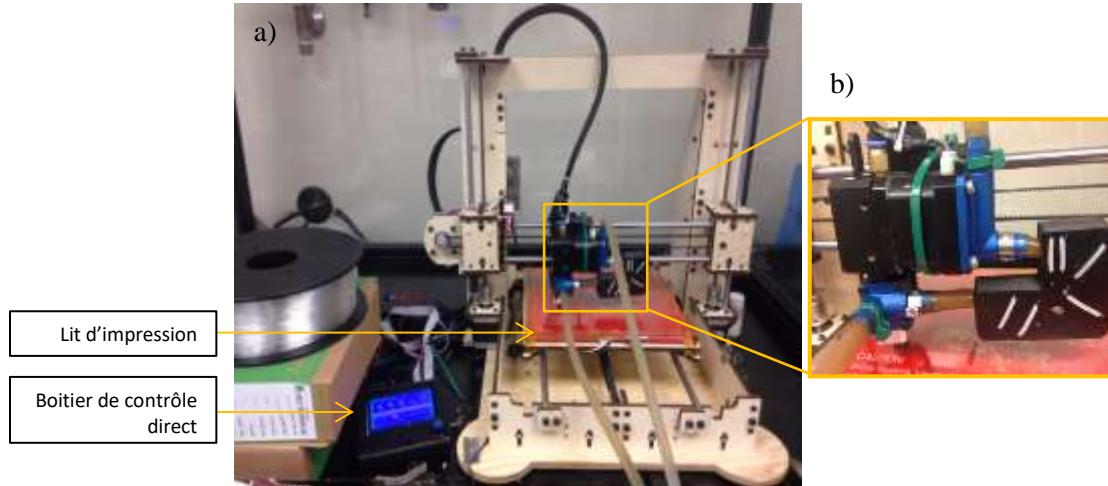


Figure 5-2: a) Imprimante de type Prusa i3 et b) sa tête extrudeuse Dyzee Design avec système de refroidissement

Logiciel

Le logiciel Simplify3D a été conservé pour toutes les impressions.

Taille des échantillons

Deux types d'échantillons ont été imprimés, l'un pour trouver les températures d'impression et l'autre pour caractériser mécaniquement les matériaux. Pour le premier modèle, nous nous sommes arrêtés sur une barrette de $4 \times 8 \times 60 \text{ mm}^3$, normalement simple à imprimer et aux dimensions suffisamment grandes pour observer les défauts de l'impression. Le modèle a été réalisé sur Catia V5. Pour le second modèle, nous avons conservé l'éprouvette Type IV de section étroite de $4 \times 6 \times 25 \text{ mm}^3$ conforme à l'ASTM D638.

Paramètres du chemin d'impression

Dans le cas du premier modèle, quatre différentes barrettes ont été imprimées en faisant varier l'orientation des filaments déposés, le nombre de contours et le taux de remplissage. Les valeurs utilisées sont présentées dans le Tableau 5-2. Ces différentes barrettes ont permis d'évaluer la qualité obtenue à chaque température d'impression en observant les résultats à la fois sur des structures pleines et sur des structures en échafaudages.

Tableau 5-2: Paramètres du chemin d'impression utilisés pour chaque barrette

Désignation	Taux de remplissage (%)	Orientation (°)	Nombre de contour
Barrette 1	50	± 45	1
Barrette 2	50	0/90	1
Barrette 3	100	0	aucun
Barrette 4	100	90	aucun

Le PEI étant hygroscopique, la bobine a été placée dans un four sous vide autour de 50°C au plus tard la veille de l'impression.

Concernant les éprouvettes, des paramètres identiques à ceux des travaux précédents ont été utilisés pour les mêmes raisons: sans contour et unidirectionnels.

Configuration d'impression

Les barrettes 3 et 4 et les éprouvettes ont été imprimées dans deux configurations : FL et FW, représentées dans le cas des barrettes à la Figure 5-3. Les barrettes 1 et 2 ont aussi été imprimées à plat, soit selon la direction d'impression Y, mais avec des directions d'impression différentes (i.e., les orientations du Tableau 5-2).

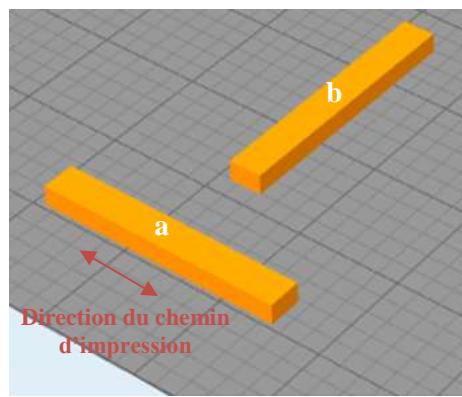


Figure 5-3: Configurations a) FL et b) FW des barrettes 3 et 4 imprimées

5.1.3 Plan d'expérimentation

Pour trouver les paramètres de températures les plus adaptés pour chacun des matériaux avec notre imprimante 3D, nous avons imprimé en faisant varier T_{extr} par incrément de 10°C dans une gamme s'approchant des températures recommandées par les fournisseurs et à T_{lit} fixée. Pour chaque T_{extr} testée, dont les valeurs sont précisées pour chacun des filaments dans le Tableau 5-3, les 4 barrettes ont été imprimées.

Tableau 5-3: Températures d'impression utilisées pour les barrettes

Températures utilisées	Matériaux	PC	PEI	PEEK
T_{extr} (°C)		270 – 310	340-370	355-385
T_{lit} (°C)		120	120-130	130

Toutes les barrettes ont alors été observées au microscope optique (MO), et les T_{extr} pour lesquelles la meilleure qualité d'impression a été observée ont été déterminées.

Dans le cas du PC, les températures d'impression sélectionnées lors de cette étape ont alors été utilisées pour imprimer 12 éprouvettes, dont la moitié en configurations FL et l'autre moitié en configuration FW.

5.1.4 Observations au microscope optique

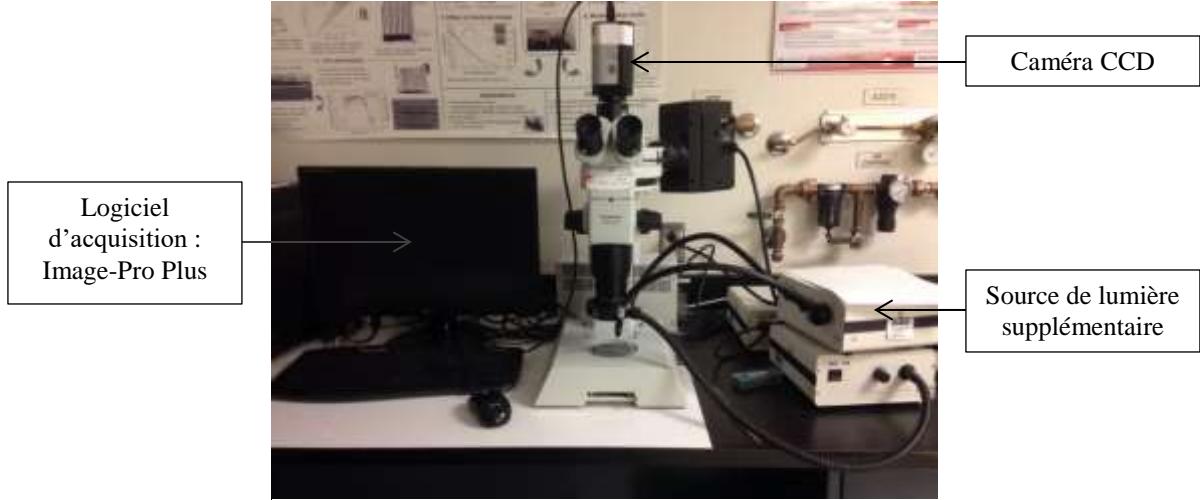


Figure 5-4: Microscope optique Olympus SZX-12
et ses constituants

Les barrettes ont été observées avec un microscope Olympus SZX-12, présenté à la Figure 5-4, équipé d'une caméra CCD Evolution VF et utilisé avec le logiciel d'acquisition d'image Image-Pro Plus.

Le but de ses observations était de distinguer les défauts présents dans les différentes structures causés par une température d'extrusion trop faible ou trop élevée. Les structures en échafaud des barrettes de type 1 et 2 servaient à observer le comportement des filaments fondus déposés, et les structures pleines des barrettes de types 3 et 4 à évaluer la qualité globale pouvant être obtenue à chaque $T_{\text{extr.}}$.

5.1.5 Essais de traction assistés par DIC

Le protocole suivi pour tester les éprouvettes de PC en traction assisté par DIC est identique à celui décrit à la section 4.1.2.

5.2 Résultats

5.2.1 Cas du PC

5.2.1.1 Effets des différentes T_{extr} sur la structure des barrettes et températures d'impressions suggérées

Chaque barrette de types 1 et 2 a été observée avec deux grossissements différents, l'un pour avoir une vision globale de la structure en échafaud et l'autre pour observer de plus près les filaments fondus déposés. Une observation en perspective parallèle et à un grossissement modéré a été réalisée sur les barrettes de types 3 et 4 afin de voir la cohésion des couches sur le côté, et la qualité d'un angle et de la surface supérieure. Le Tableau 5-4 présente une image de chaque barrette observée pour chaque T_{extr} .

Sur les images des barrettes de type 1 et 2 imprimées à 270°C, les filaments présentent une épaisseur constante et aucun défaut interne ou surfacique n'est visible. La structure en échafaud orienté à 45° n'est pas parfaite mais ceci est dû à un problème du moteur assurant le déplacement du lit de l'imprimante, qui provoquait un décalage des couches les unes par rapport aux autres. Nous avons tenté de le minimiser lors de nos impressions, mais malheureusement, ce décalage transformant nos barrettes en parallélépipèdes est visible sur certaines des images présentées. Les images des barrettes de types 3 et 4 présentent une qualité convenable, mais une légère décohésion entre deux couches peut être distinguée sur la première de ces images, témoignant probablement d'une température légèrement trop basse. Les barrettes imprimées à 280°C présentent une structure en échafaud bien régulière, les filaments ont une épaisseur constante et la qualité des structures pleines est correcte, avec une bonne cohésion des couches. Ces dernières barrettes apparaissent aussi de bonne qualité imprimées à 290°C, tout comme la structure en échafaud apparaît régulière. Cependant, en observant de plus près les filaments fondus, des bulles internes peuvent être distinguées. Les barrettes imprimées à 300°C et 310°C présentent de manière évidente les défauts caractéristiques d'une température d'extrusion trop élevée : de fins filaments sont tissés dans les vides sur les structures en échafaud, causés par une fluidité trop importante du PC, et des marques de brûlures du matériau sont visibles. L'angle des structures pleines est de moins en moins net, et la géométrie des barrettes est de moins en moins conforme au modèle.

Tableau 5-4: Observations MO des barrettes de PC imprimées à différentes T_{extr}

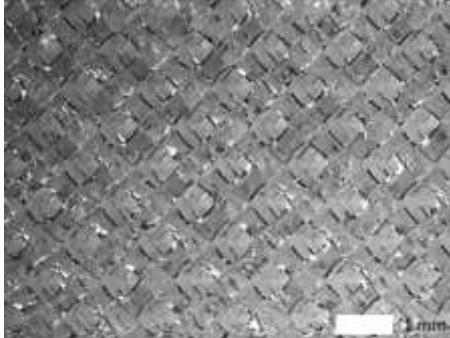
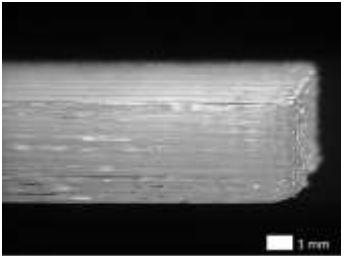
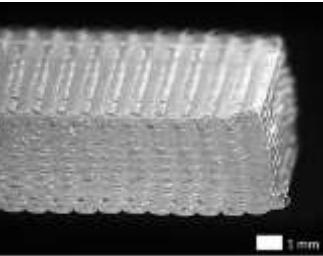
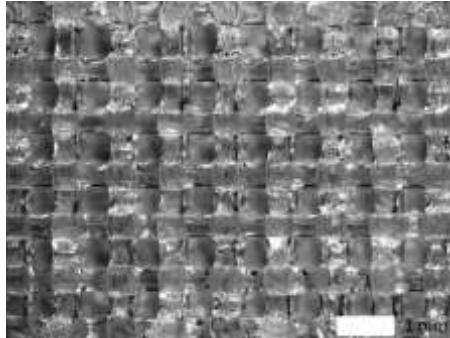
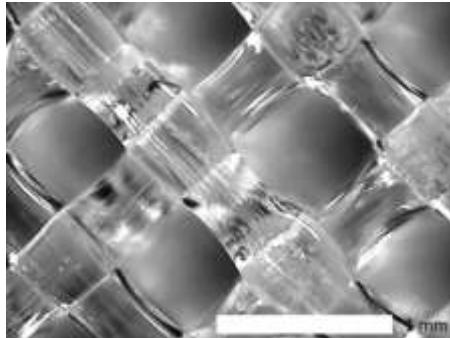
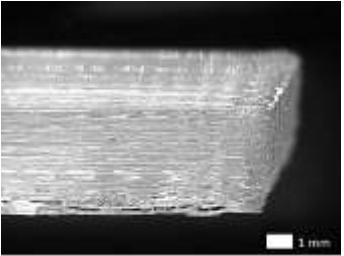
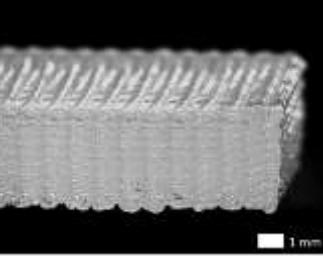
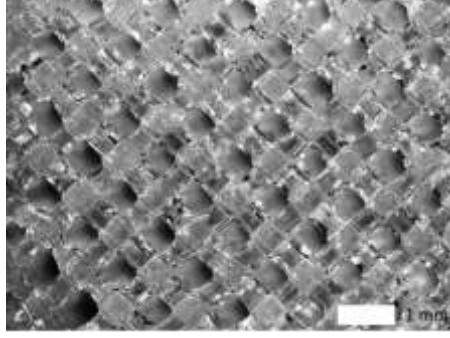
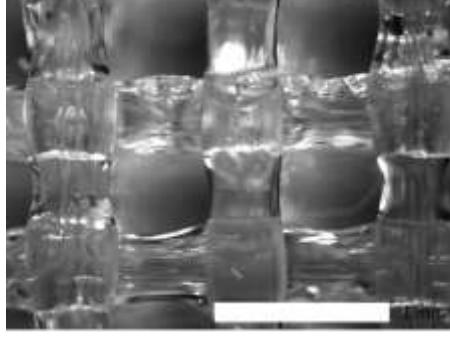
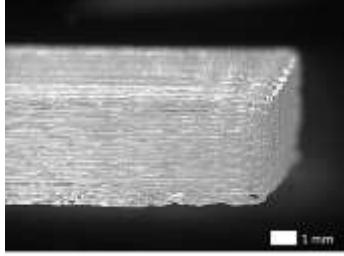
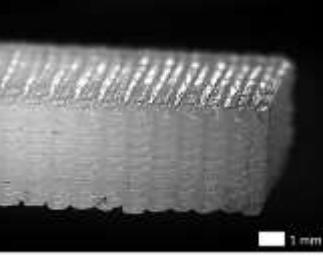
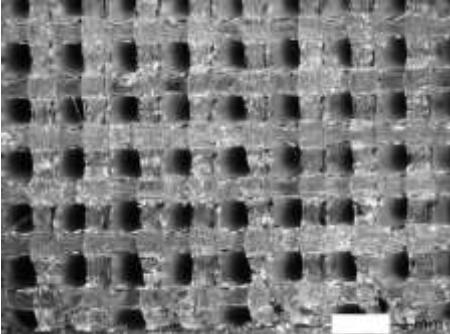
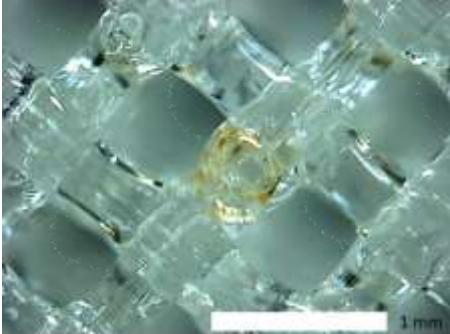
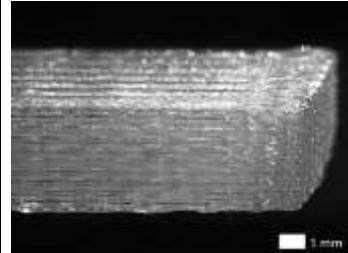
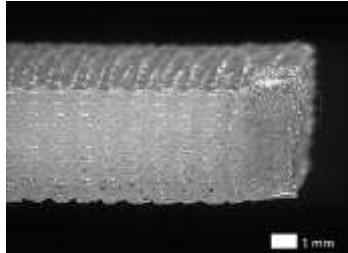
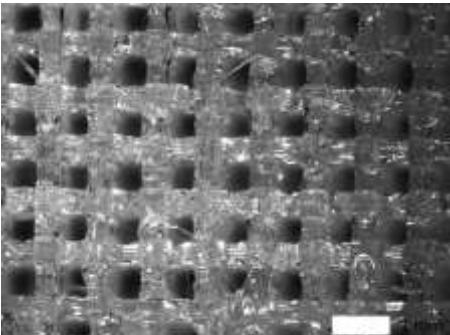
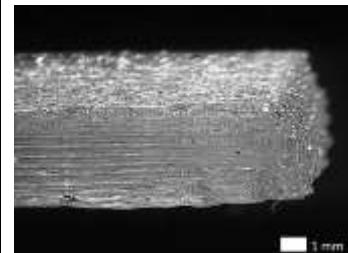
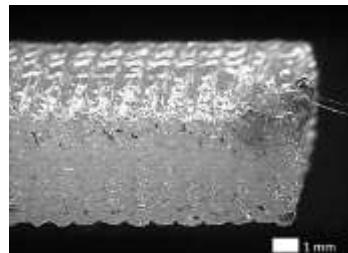
T_{extr} (°C)	Observations au MO des barrettes de PC			
	Types 1 et 2		Types 3 et 4	
270				
280				
290				

Tableau 5-4 (suite): Observations MO des barrettes de PC imprimées à différentes T_{extr}

300				
310				

Ainsi au vu de ses observations, la température d'extrusion donnant les meilleurs résultats apparaît être 280°C. Le Tableau 5-5 récapitule les températures d'impressions que nous suggérons pour ce matériau et avec notre imprimante. N'ayant eu aucun problème lié à la température du lit, nous avons conservé celle initialement choisie.

Tableau 5-5: Températures d'impression suggérées pour le PC

Matériaux : PC	T_{lit}	T_{extr}
Imprimante : type Prusa i3	120°C	280°C

5.2.1.2 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques obtenues sur les éprouvettes de PC imprimées avec les températures du Tableau 5-5 sont présentées à la Figure 5-5 a), b) et c). Les deux configurations présentent des valeurs assez proches, autour de 2 GPa, 35,5 GPa et 58 GPa pour E , σ_y et S_u , respectivement.

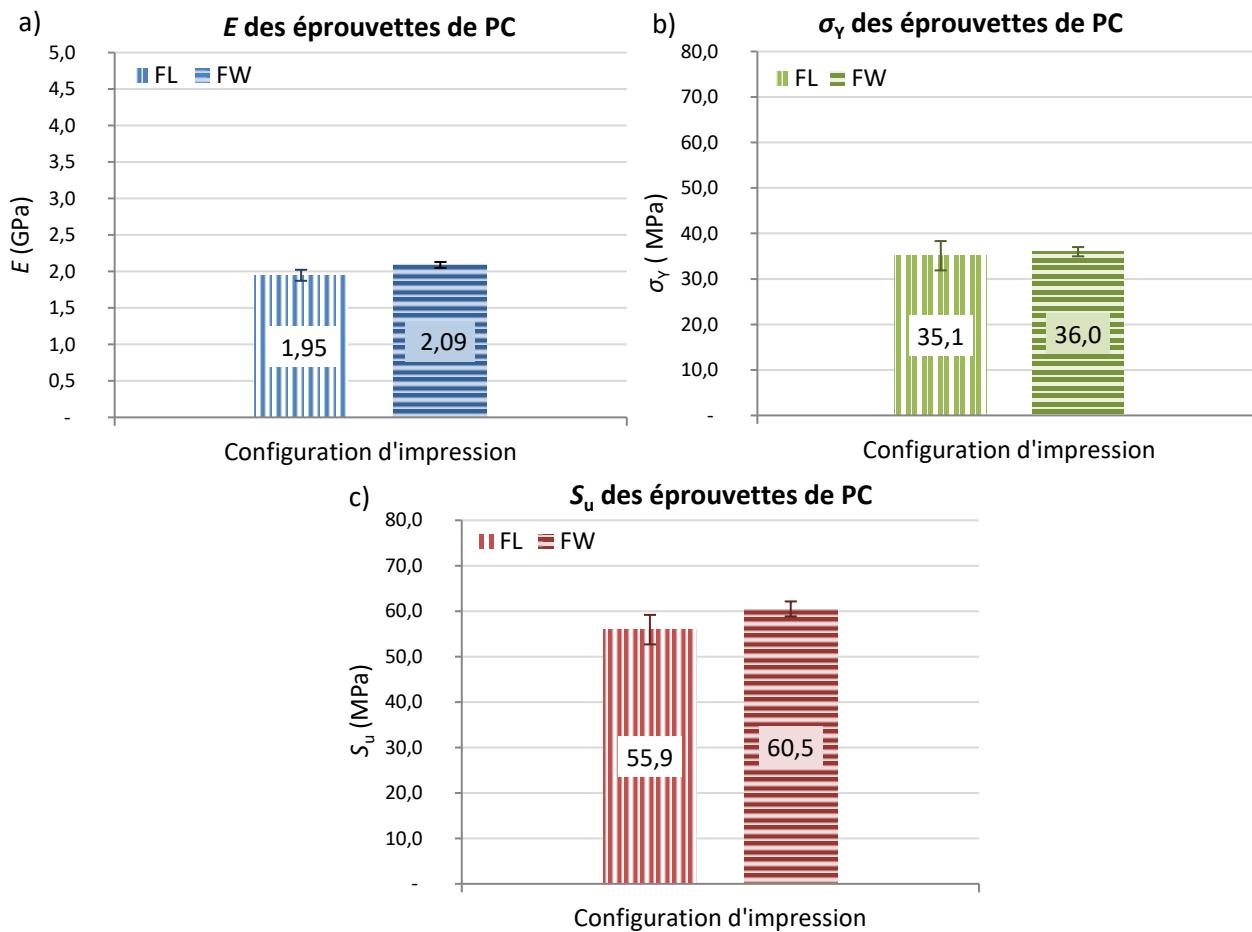


Figure 5-5: Valeurs de a) E, b) σ_y et c) S_u des éprouvettes de PC dans les deux configurations

5.2.2 Cas du PEI

5.2.2.1 Effets des différentes T_{extr} sur la structure des barrettes de PEI

Les barrettes de type 1 et 2 ont aussi été observées selon deux grossissements différents. Cependant, le problème de décalage des couches étant plus marqué sur ces échantillons, les images montrant la structure globale ne permettaient pas d'observer la conformité avec le modèle, ce qui explique que nous nous sommes plus concentrés sur celles d'un grossissement supérieur, permettent tout de même d'observer le comportement des filaments fondus déposés. Pour les mêmes raisons que précédemment (section 5.2.1), les barrettes de type 3 et 4 ont été observées en perspective parallèle à un grossissement modéré. Le Tableau 5-6 regroupe une sélection des images obtenues pour chaque échantillon imprimé à chacune des T_{extr} testées.

En extrudant ce matériau à 340°C, des zones où le filament alterne une largeur trop fine puis trop épaisse peuvent être distinguées sur la structure en échafaud orienté à 0/90°. De plus, la barrette de type 3 présente une faible hauteur. Ces deux observations témoigneraient d'une sous-extrusion, c'est-à-dire qu'il ne sort pas de l'extrudeur autant de matière qu'il ne devrait. Ce phénomène est le plus souvent causé par une température d'extrusion trop basse. Remarquons aussi la présence d'un excès de matière en surface du filament à certain endroit et l'aspect légèrement creusé de la surface de la barrette de type 4. À 350°C, la barrette de type 3 est plus conforme au modèle, mais on peut distinguer que la cohésion des couches n'est pas optimale. Les filaments visibles sur les structures en échafaud présentent de légers défauts de surface, et s'affinent à certain endroit mais sur une très courte longueur. Bien que, la barrette de type 4 présente une surface supérieure légèrement creusée et un angle pas net, l'adhésion des couches entre elles apparaît bonne. Sur les images des échantillons non pleins imprimés à 360°C, les filaments sont sans défauts et conservent une épaisseur constante, ce qui est bien représentatif de nos échantillons réels. La barrette de type 3 montre une surface lisse et une bonne cohésion des couches et des filaments fondus de la couche supérieure est visible. La barrette de type 4 présente quelques défauts : manque de netteté de l'angle, de lisser de la surface supérieure et d'épaisseur. Enfin, cette même barrette imprimée à 10°C de plus est presque parfaite. Néanmoins, quelques malformations du filament et des fils fins tissés dans le vide ont été repérées lors des observations de barrettes de type 1 et 2, et les dimensions de celle de type 3 ne sont pas conformes au modèle.

Tableau 5-6 : Observations MO des barrettes de PEI imprimées à différentes T_{extr}

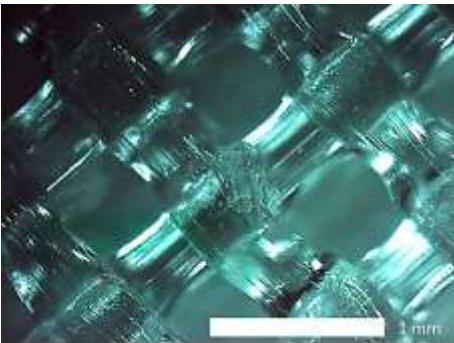
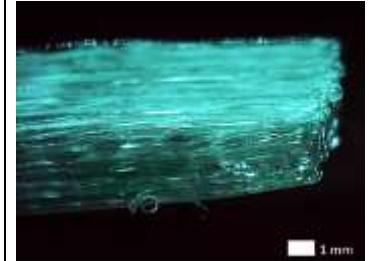
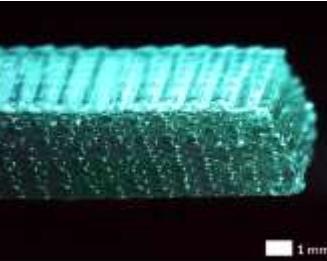
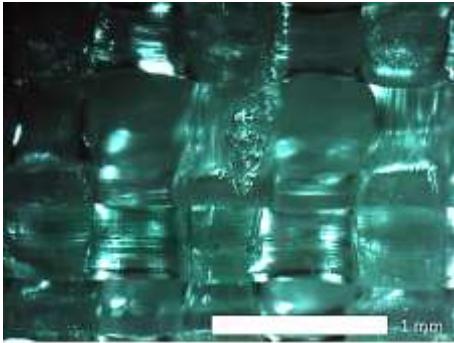
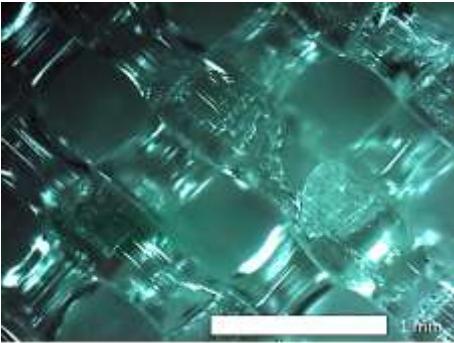
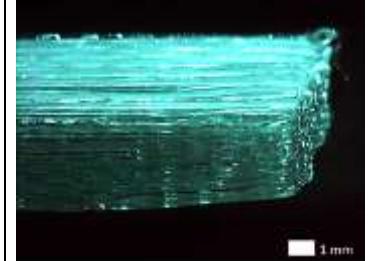
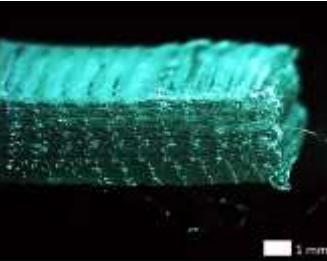
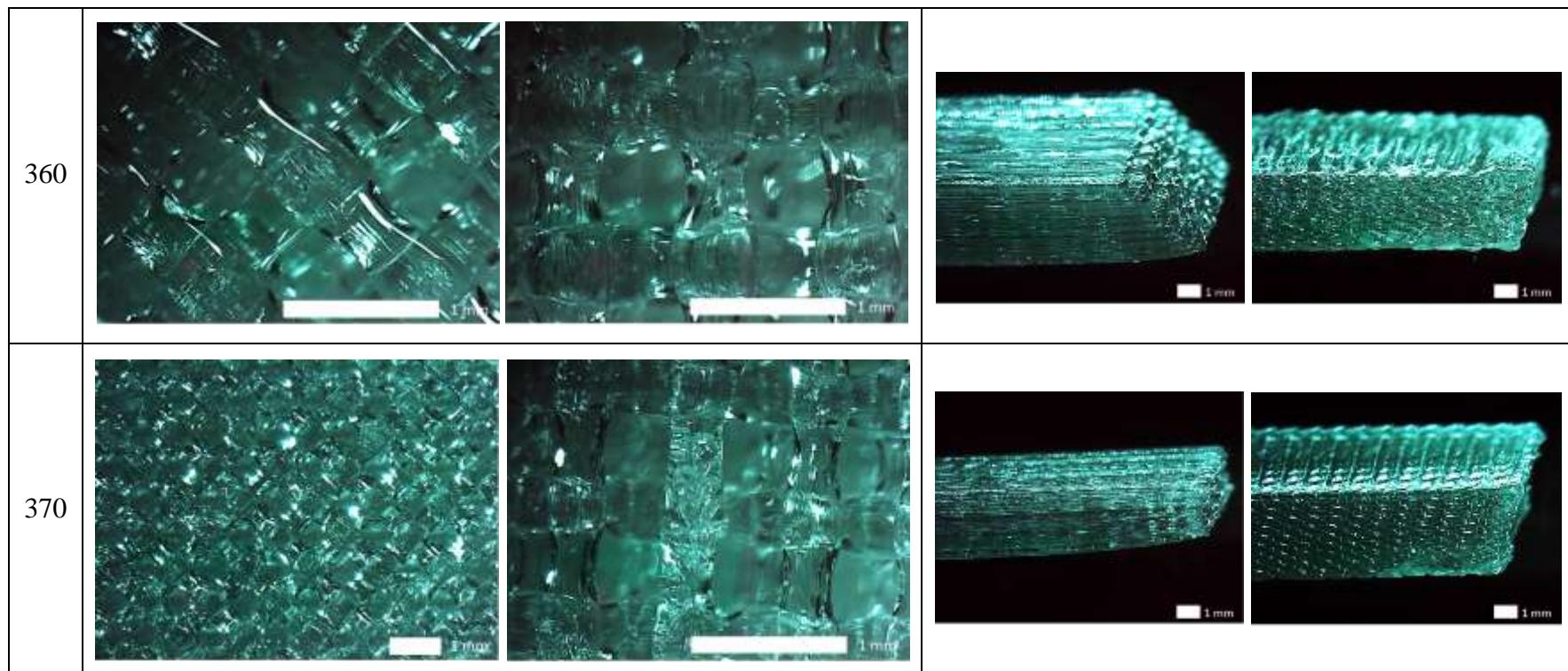
T_{extr} (°C)	Observations au MO des barrettes de PEI			
	Types 1 et 2		Types 3 et 4	
340				
350				

Tableau 5-6 (suite) : Observations MO des barrettes de PEI imprimées à différentes T_{extr}



5.2.2.2 Températures d'impressions suggérées

Nous avons d'abord essayé d'imprimer avec une T_{lit} de 120°C, comme recommandée par les fournisseurs, mais une délamination répétitive des éprouvettes a été obtenue. Nous avons alors augmenté cette température à 130°C et ce phénomène n'a plus été relevé. Ainsi, toutes les barrettes présentées à la section 5.2.2.1 ont été imprimées avec une $T_{lit} = 130^\circ\text{C}$. Au vu des observations microscopiques et en faisant abstraction du décalage des couches de certains échantillons, la meilleure température d'extrusion apparaît être 360°C pour les barrettes de types 1, 2 et 3, et 370°C pour celle de type 4. Afin d'être le plus général possible, nous suggérons donc une température d'extrusion de 360°C pour ce matériau avec notre imprimante. Le Tableau 5-7 récapitule les paramètres de températures obtenus.

Tableau 5-7: Températures d'impression suggérées pour le PEI

Matériau : PEI	T_{lit}	T_{extr}
Imprimante : type Prusa i3	130°C	360°C

5.2.3 Cas du PEEK

5.2.3.1 Effets des différentes T_{extr} sur la structure des barrettes de PEEK

Les barrettes de types 1 et 2 ont été observées de façon similaire aux autres matériaux, mais ce n'est pas le cas de celles de types 3 et 4, où une vue du dessus a paru plus pertinente afin d'évaluer leur qualité.

En imprimant à 355°C, une conformité avec le modèle acceptable est obtenue sur la barrette de type 1. Cependant, des bulles qui déforment le filament déposé peuvent être distinguées et sur la seconde structure en échafaud, celui-ci ne garde pas une épaisseur constante, s'élargissant lorsqu'il n'est pas supporté par la couche du dessous et s'amincissant dans le cas contraire. Concernant les barrettes des types 3 et 4, la première présente un angle mal formé et à la surface de la seconde, une mauvaise cohésion des filaments déposés entre eux est clairement visible. Les mêmes défauts sont retrouvés sur les barrettes imprimées à 365°C, avec une présence plus importante des bulles déformant le filament et alternant avec des creux, mais une meilleure cohésion de la couche supérieure de la dernière barrette. À partir d'une T_{extr} de 375°C, les

filaments ne présentent plus de bulles mais ont tendance à s'affiner et des creux sont encore visibles. La surface des barrettes de type 4 n'est pas lisse et à 385°C, des fils fins se tissant dans le vide apparaissent.

Ainsi, dans le cas du PEEK, ces tests d'impression et ces observations au microscope ne permettent pas de conclure sur une température d'extrusion. Le filament extrudé apparaît plus visqueux que les autres et s'épand lors de sa déposition. D'autres paramètres doivent être modifiés pour obtenir une bonne qualité d'impression, tels que la vitesse de déposition, le temps de refroidissement laissé au filament avant de déposer son voisin ou encore le coefficient d'extrusion.

Tableau 5-8: Observations MO des barrettes de PEEK imprimées à différentes T_{extr}

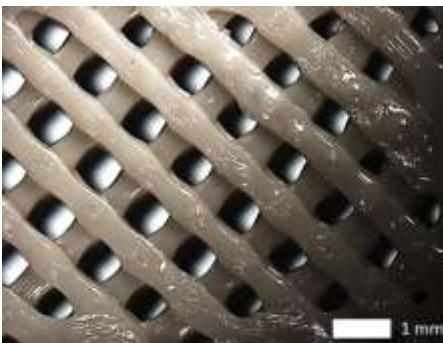
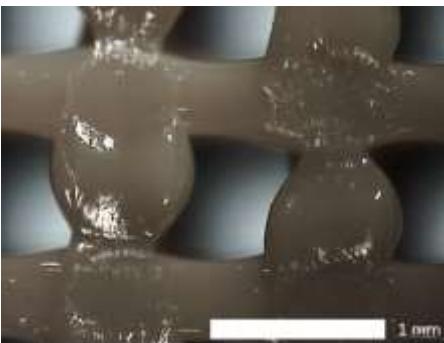
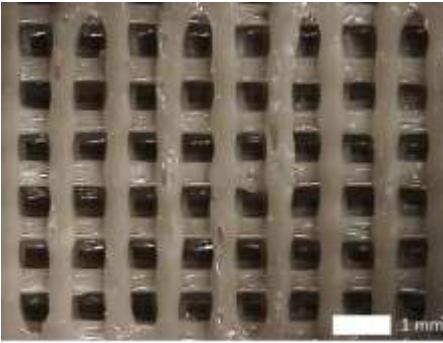
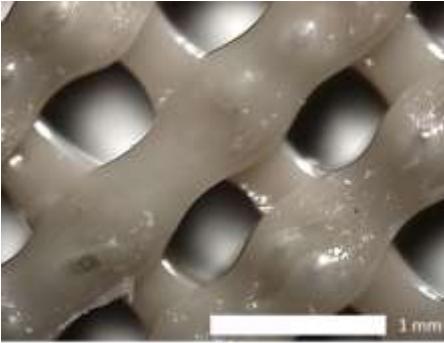
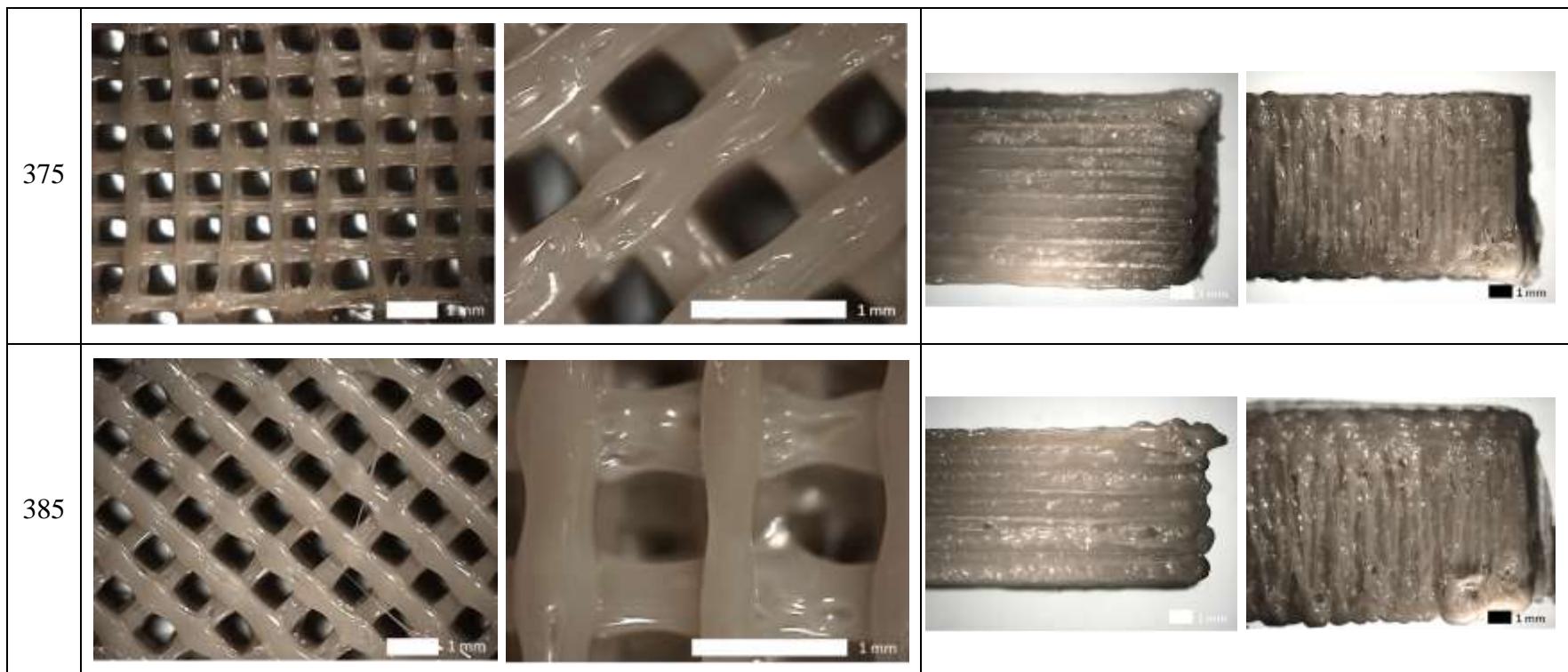
T_{extr} (°C)	Observations au MO des barrettes de PEEK			
	Types 1 et 2		Types 3 et 4	
355				
365				

Tableau 5-8 (suite): Observations MO des barrettes de PEEK imprimées à différentes T_{extr}



CHAPITRE 6 DISCUSSION GÉNÉRALE

6.1 Influence du contrôle de la température environnementale d'impression

Afin d'élever la température de l'environnement d'impression, nous avons chauffé l'environnement global dans lequel se trouvait l'imprimante en la plaçant dans une chambre. Cela s'est avéré efficace, mais à mesure que nous imprimions, l'imprimante a manifesté des dysfonctionnements. En effet, l'adhérence de la première couche des échantillons au lit a décliné et un problème de sous extrusion de plus en plus récurrent a été rencontré. En mesurant la température du lit à l'aide d'un thermomètre laser, nous nous sommes rendu compte qu'une divergence existait entre la température affichée par le logiciel et la température réelle. Il est probable que la chauffe de l'environnement entraîne donc une légère défaillance des capteurs de températures au niveau du lit et de la tête d'extrusion. La conception d'un dispositif d'impression par FDM combinant chambre chauffante et imprimante permettrait de définir une température de services des constituants plus élevée afin qu'ils demeurent fiables lors d'une chauffe de l'environnement. Une isolation des moteurs pourrait aussi être pensée afin d'éviter toute surchauffe.

Qui plus est, une amélioration du système de contrôle de la température de la chambre pourrait être investiguée, notamment en ajoutant un système de refroidissement et une commande rétroactive assurant le maintien de la température réclamée. Dans le cas d'un écart avec la température souhaitée, le refroidissement ou le chauffage se déclencherait automatiquement et s'éteindrait une fois cette température atteinte. En effet, l'imprimante libère de la chaleur lorsqu'elle est en activée, ce qui induit que la température de la chambre relevée en fin d'impression est supérieure à celle à laquelle l'impression a été lancée. Une boucle de rétroaction sur la commande permettrait d'avoir une température environnementale constante tout au long de l'impression.

Une chauffe locale à l'endroit où la pièce s'imprime pourrait aussi être investiguée, ce qui résoudrait les problèmes de surchauffe des constituants de l'imprimante. Ceci pourrait être réalisé en faisant converger des faisceaux de lumière d'intensité ajustable autour d'un point central à la pièce en cours d'impression, chauffant ainsi l'environnement local entourant la pièce. Une autre

idée serait de concevoir un dispositif constitué de cloisons modulables et chauffantes qui entoureraient le lit et se déploieraient au mesure que celui-ci descend afin de chauffer l'air situé entre la plateforme d'impression et la tête d'extrusion.

Enfin, une mauvaise qualité des pièces pouvant être causée par un refroidissement insuffisant entre deux dépositions juxtaposées, l'utilisation d'un système performant de contrôle de la température combiné à des systèmes de chauffe et de refroidissement efficaces serait utile. Il rendrait possible l'étude d'une alternance réfléchie d'une chauffe de l'environnement puis de son refroidissement afin de mieux pouvoir contrôler le comportement du filament et ainsi d'optimiser la qualité des pièces imprimées.

6.2 Potentiel des filaments THP

Les THP présentent de meilleures propriétés mécaniques à températures élevées que les thermoplastiques de commodité, habituellement utilisés comme matière première lors de la fabrication de pièces par FDM. Il est alors logique de penser que leur utilisation avec ce procédé permettrait d'obtenir des pièces ayant de meilleures performances mécaniques à hautes températures. Cependant, il est peu probable qu'utiliser des filaments de THP pur permettent de surpasser les propriétés atteintes en utiliser des filament-composites renforcés de fibres carbone. Il serait alors intéressant d'investiguer la fabrication de filament THP renforcés en fibres de carbone et d'étudier le gain obtenu sur les performances des pièces imprimées en fonction de la teneur insérée dans le filament.

Ensuite, ces matériaux ont un comportement différent vis-à-vis de la température. Comme nous l'avons vu dans ce mémoire, ils nécessitent des températures d'impression nettement plus élevées que les filaments couramment utilisés en FDM. Il serait alors intéressant de tester l'influence d'une élévation de la température environnementale d'impression sur les propriétés mécaniques des pièces imprimées, comme nous l'avons investigué sur du Nylon au cours de ce projet. Dans le cas où, comme avec le Nylon, un effet minime est observé, cela confirmerait que la température de l'environnement d'impression ne permet pas d'améliorer les propriétés de pièces fabriquées à partir de thermoplastiques purs.

Enfin, en combinant les deux perspectives précédentes, investiguer l'effet d'une élévation de la température environnementale d'impression sur les pièces fabriquées avec des filaments de THP

renforcés en fibres de carbone serait pertinent. Dans le cas probable d'une amélioration des performances mécaniques, il serait intéressant de voir si le gain suit la même tendance à mesure que la température augmente que celle obtenue au cours de nos travaux avec du Nylon renforcé. Aussi, comparé à ce dernier, il se pourrait qu'une température modérée ne soit pas suffisante pour obtenir une nette amélioration des propriétés mécaniques. Des hypothèses concernant une température environnementale minimale à utiliser en fonction du matériau pour obtenir une amélioration significative des performances pourraient alors être proposées.

CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce mémoire a présenté une méthode pour améliorer les propriétés mécaniques de pièces en composites imprimées par la technologie de FDM et une première approche de l'impression de thermoplastiques moyennes et hautes températures.

En plaçant notre imprimante Leapfrog dans une chambre chauffante, une amélioration significative des propriétés mécaniques a été obtenue lors d'une élévation modérée de la température environnementale d'impression, dans le cas d'éprouvettes imprimées en configuration FW et avec des filaments de thermoplastiques renforcés de fibres de carbone. Chauffer l'environnement à des températures plus élevées permet surtout de gagner en reproductibilité des propriétés.

L'augmentation de la teneur en fibres de carbone du filament entraîne aussi une amélioration de E , σ_y et S_u , de façon nettement plus importante sur les éprouvettes imprimées en configuration FL. Les valeurs de propriétés de traction croît d'autant plus que la teneur en fibre est élevée.

Les filament-composites obtenus avec des fibres *chopped*, les plus longues, permettent des performances nettement supérieures des pièces imprimées par rapport à celles obtenues à partir des filaments renforcés de fibres *milled*, plus courtes, et ceci même à une teneur inférieure. De plus, l'impression de filament-composites renforcés avec ces fibres est plus aisée qu'avec les filaments renforcés des fibres courtes, probablement car ce dernières se répartissent de façon moins homogène ce qui rend l'extrusion plus délicate.

Pour imprimer du PC, une T_{extr} de 280°C et une T_{lit} de 120°C sont les températures d'impression permettant d'obtenir la meilleure qualité des pièces fabriquées avec notre imprimante de type Prusa i3. Dans le cas de l'impression de PEI, une T_{extr} de 360°C et une T_{lit} de 130°C sont suggérées. Le PEEK est plus délicat à imprimer et une bonne qualité d'impression ne peut être obtenue en jouant seulement sur les paramètres de températures.

Toutefois, notre méthode de recherche des températures d'impression du PC et du PEI a été qualitative et un affinage pourrait être réalisé autour de nos T_{extr} suggérées, en comparant les propriétés mécaniques obtenues avec cette température à celles obtenues avec $T_{\text{extr}} + 5^\circ\text{C}$ et $T_{\text{extr}} - 5^\circ\text{C}$. Ceci permettrait d'obtenir les températures optimales permettant les meilleures propriétés mécaniques.

De plus, afin d'améliorer la constance de la qualité des impressions de filaments THP, ce qui permettraient d'être plus productif et de générer moins de pertes, il serait préférable de rendre minime, voire d'annuler le décalage des couches rencontré sur l'imprimante de Type Prusa i3. Ce problème provient d'une surchauffe du moteur assurant le déplacement du lit d'impression, sûrement dû à une trop forte intensité du courant fourni ou à sa localisation trop proche du lit chauffant. Cette surchauffe provoque l'activation de la sécurité du moteur, qui se manifeste par des arrêts de quelques microsecondes dans notre cas. Une recalibration minutieuse et la mise en place d'un dispositif d'isolation autour de ce moteur sont des pistes de résolution du problème.

Concernant l'impression du PEEK, nous avons observé que son comportement extrudé est différent des autres filaments car il possède une viscosité à l'état fondu plus élevée. Une intervention sur la vitesse et le coefficient d'extrusion jusqu'à en obtenir les valeurs permettant une bonne qualité d'impression seraient à investiguer. En imprimant plusieurs échantillons à la fois, on pourrait aussi augmenter le temps de refroidissement du filament déposé avant le dépôt de son voisin, ce qui éviterait qu'il bouge avant sa solidification.

Enfin, l'ajout d'un système de détection du diamètre du filament en entrée de tête d'extrusion sur nos imprimantes FDM optimiserait grandement leur efficacité. En effet, il est difficile de fabriquer un filament de diamètre constant, surtout lorsqu'il s'agit de filament-composites renforcés, et même celui des filaments commerciaux varie légèrement. Or, ce diamètre peut être modifié dans les données d'entrée du logiciel d'impression, mais il demeure fixé pour toute la durée de l'impression. Un écart trop important entre sa valeur réelle et celle définie dans les paramètres d'impression affecte la qualité de l'impression, causant des phénomènes de sous-extrusion ou sur-extrusion, et pouvant même bloqué l'extrusion. Un détecteur en entrée de tête d'impression permettrait d'avoir une valeur locale du diamètre et une extrusion adaptée à celui-ci.

.

RÉFÉRENCES

- [1] GirauGuyard. (9 mars 2017). Available: <http://www.girau-guyard.com/thermoplastique-thermodurcissable-elastomere.php>
- [2] A. C. de Leon, Q. Chen, N. B. Palaganas, J. O. Palaganas, J. Manapat, and R. C. Advincula, "High performance polymer nanocomposites for additive manufacturing applications," *Reactive and Functional Polymers*, vol. 103, pp. 141-155, 2016.
- [3] A. Weber, "New plastics for 3D printing: Engineers have more material options available than ever," *Assembly*, vol. 59, no. 7, 2016.
- [4] P. M.Hergenrother, "The Use, Design, Synthesis, and Properties of High Performance/High Temperature Polymers: an Overview," *High Performance Polymers*, 26 November 2002.
- [5] P. Mapleston, "High-Performance Thermoplastics," *Plastics Engineering*, pp. 18-22, 2007.
- [6] Stratasys. (23 Mars). Available: <http://www.stratasys.com/fr/j750/history>
- [7] (2017, 13 mars) STRATASYS étoffe sa gamme d'impression 3d avec deux nouveaux materiaux innovant. *Industrie mag* Available: <http://www.industrie-mag.com/article12275.html>
- [8] S. SANCHEZ. (2013, 18/04/2017). *L'impression 3D par dépôt de matière fondue, on vous explique tout !* Available: <http://www.3dnatives.com/depot-de-matiere-fondue-fdm/>
- [9] J. P. Kruth, M. C. Leu, and T. Nakagawa, "Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 47, no. 2, pp. 525-540, 1998/01/01 1998.
- [10] Wikipédia. (23 Mars). Available:
https://en.wikipedia.org/wiki/Fused_deposition_modeling#cite_note-1

- [11] J. Evans. (2016) 3D printing makes material advances: Companies are stepping up their efforts to expand the limited palette of resins suitable for additive manufacturing. *Plastics Engineering*. 32-34.
- [12] X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou, and D. Hui, "3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective," *Composites Part B: Engineering*, vol. 110, pp. 442-458, 2017.
- [13] Wikipédia. (8 mars 2017). Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Thermoplastique>
- [14] K. Stevenson. (2016, 16 Aug 2016) THE STORY OF 3D PRINTER FILAMENT (PART 1). *Disruptive Magazine*. Available: <http://www.disruptivemagazine.com/features/story-3d-printer-filament-part-1>
- [15] K. Stevenson. (2016, 25 Aug 2016) THE STORY OF 3D PRINTER FILAMENT (PART 2). *Disruptive Magazine*. Available: <http://www.disruptivemagazine.com/features/story-3d-printer-filament-part-2>
- [16] S. H. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, and P. K. Wright, "Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 248-257, 2002.
- [17] H. L. Tekinalp *et al.*, "Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing," *Composites Science and Technology*, vol. 105, pp. 144-150, 2014.
- [18] O. S. Carneiro, A. F. Silva, and R. Gomes, "Fused deposition modeling with polypropylene," *Materials & Design*, vol. 83, pp. 768-776, 2015.
- [19] E. Kim, Y.-J. Shin, and S.-H. Ahn, "The effects of moisture and temperature on the mechanical properties of additive manufacturing components: fused deposition modeling," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 22, no. 6, pp. 887-894, 2016.
- [20] J. F. Rodríguez, J. P. Thomas, and J. E. Renaud, "Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) fused deposition materials. Experimental investigation," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 7, no. 3, pp. 148-158, 2001.

- [21] Brian N. Turner, R. Strong, and S. A. Gold, "A review of melt extrusion additive manufacturing processes-I. Process design and modeling," *Rapid Prototyping Journal*, pp. 192–204, 13 March 2013.
- [22] C. S. Lee, S. G. Kim, H. J. Kim, and S. H. Ahn, "Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 187-188, pp. 627-630, 2007.
- [23] A. Bagsik, V. Schöppner, and E. Klemp, "FDM Part Quality Manufactured with Ultem 9085," *Polymeric Materials 2010*, 2010.
- [24] E. Spišák, I. Gajdoš, and J. Slota, "Optimization of FDM Prototypes Mechanical Properties with Path Generation Strategy," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 474, pp. 273-278, 2014.
- [25] R. Anitha, S. Arunachalam, and P. Radhakrishnan, "Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 118, pp. 385-388, 2001.
- [26] B. H. Lee, J. Abdullah, and Z. A. Khan, "Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 169, no. 1, pp. 54-61, 2005.
- [27] A. K. Sood, R. K. Ohdar, and S. S. Mahapatra, "Improving dimensional accuracy of Fused Deposition Modelling processed part using grey Taguchi method," *Materials and Design*, vol. 30, pp. 4243–4252, 2009.
- [28] A. K. Sood, R. K. Ohdar, and S. S. Mahapatra, "Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts," *Materials & Design*, vol. 31, no. 1, pp. 287-295, 2010.
- [29] D. Croccolo, M. De Agostinis, and G. Olmi, "Experimental characterization and analytical modelling of the mechanical behaviour of fused deposition processed parts made of ABS-M30," *Computational Materials Science*, vol. 79, pp. 506-518, 11// 2013.
- [30] A. Lanzotti, M. Grasso, G. Staiano, and M. Martorelli, "The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 21, no. 5, pp. 604-617, 2015.

- [31] K. C. Ang, K. F. Leong, C. K. Chua, and M. Chandrasekaran, "Investigation of the mechanical properties and porosity relationships in FDM fabricated porous structures," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 100 - 105, 2006.
- [32] A. Bellini and S. Gücieri, "Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 9, no. 4, pp. 252-264, 2003.
- [33] K. J. Christiyan, U. Chandrasekhar, and K. Venkateswarlu, "Influence of raster orientation and layer thickness on mechanical properties of ABS material using FDM process," presented at the International Conference on Emerging Trends in Science and Cutting Edge Technology (ICETSCET-2014), YMCA, Connaught Place, New Delhi (India), 2014.
- [34] K. Savvakis, M. Petousis, A. Vairis, N. Vidakis, and A. T. Bikmeyev, "Experimental determination of the tensile strength of fused deposition modeling parts," in *ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE 2014, November 14, 2014 - November 20, 2014*, Montreal, QC, Canada, 2014, vol. 14, p. ASME: American Society of Mechanical Engineers (ASME).
- [35] M. Dawoud, I. Taha, and S. J. Ebeid, "Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 21, pp. 39-45, 2016.
- [36] B. M. Tymrak, M. Kreiger, and J. M. Pearce, "Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions," *Materials & Design*, vol. 58, pp. 242-246, 2014.
- [37] W. H. Zhong, F. Li, Z. G. Zhang, L. L. Song, and Z. M. Li, "Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling," (in English), *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, vol. 301, no. 2, pp. 125-130, Mar 31 2001.
- [38] M. L. Shofner, K. Lozano, F. J. Rodriguez-Macias, and E. V. Barrera, "Nanofiber-reinforced polymers prepared by fused deposition modeling," (in English), *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 89, no. 11, pp. 3081-3090, Sep 12 2003.

- [39] L. J. Love *et al.*, "The importance of carbon fiber to polymer additive manufacturing," *Journal of Materials Research*, vol. 29, no. 17, pp. 1893-1898, 2014.
- [40] F. Ning, W. Cong, J. Wei, S. Wang, and M. Zhang, "Additive manufacturing of cfrp composites using fused deposition modeling: Effects of carbon fiber content and length," in *ASME 2015 International Manufacturing Science and Engineering Conference, MSEC 2015, June 8, 2015 - June 12, 2015*, Charlotte, NC, United states, 2015, vol. 1, p. Manufacturing Engineering Division: American Society of Mechanical Engineers.
- [41] N. Li, Y. Li, and S. Liu, "Rapid prototyping of continuous carbon fiber reinforced polylactic acid composites by 3D printing," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 238, pp. 218-225, 12// 2016.
- [42] X. Tian, T. Liu, C. Yang, Q. Wang, and D. Li, "Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 88, pp. 198-205, 2016.
- [43] H. Mahdavi, Y. Abderrafai, and D. Therriault, "Additive manufacturing of reinforced thermoplastic-based composites by Fused Deposition Modeling (FDM) and their mechanical properties," Laboratoire de mécanique multi-échelles (LM2) en collaboration avec SAFRAN COMPOSITES, Mars 2016.
- [44] H. Mahdavi and D. Therriault, "Additive manufacturing of reinforced thermoplastic-based composites by Fused Deposition Modeling (FDM) and their mechanical properties (Phase 1.5)," Laboratoire de mécanique multi-échelles (LM2) en collaboration avec SAFRAN COMPOSITES, Décembre 2016.
- [45] G. W. Melenka, B. K. O. Cheung, J. S. Schofield, M. R. Dawson, and J. P. Carey, "Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures," *Composite Structures*, vol. 153, pp. 866-875, 10/1/ 2016.
- [46] A. R. Torrado Perez, D. A. Roberson, and R. B. Wicker, "Fracture Surface Analysis of 3D-Printed Tensile Specimens of Novel ABS-Based Materials," *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 14, no. 3, pp. 343-353, 2014.

- [47] M. Nikzad, S. H. Masood, and I. Sbarski, "Thermo-mechanical properties of a highly filled polymeric composites for Fused Deposition Modeling," *Materials & Design*, vol. 32, no. 6, pp. 3448-3456, 2011.
- [48] P. Dudek, "FDM 3D Printing Technology in Manufacturing Composite Elements," *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 58, no. 4, 2013.
- [49] S. Hwang, E. I. Reyes, K.-s. Moon, R. C. Rumpf, and N. S. Kim, "Thermo-mechanical Characterization of Metal/Polymer Composite Filaments and Printing Parameter Study for Fused Deposition Modeling in the 3D Printing Process," *Journal of Electronic Materials*, vol. 44, no. 3, pp. 771-777, 2014.
- [50] T. N. A. Tuan Rahim, A. M. Abdullah, H. Md Akil, D. Mohamad, and Z. A. Rajion, "Preparation and characterization of a newly developed polyamide composite utilising an affordable 3D printer," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 34, no. 19, pp. 1628-1638, 2015.
- [51] F. Ning, W. Cong, Z. Jia, F. Wang, and M. Zhang, "Additive manufacturing of CFRP composites using fused deposition modeling: effects of process parameters," in *ASME 2016 International Manufacturing Science and Engineering Conference*, Blacksburg, Virginia, USA, 2016.
- [52] S. HWANG, "Study of materials and machines for 3D printed large-scale, flexible electronic structures using fused deposition modeling," DOCTOR OF PHILOSOPHY, Materials Science and Engineering, The University of Texas at El Paso, 10000755, 2015.
- [53] B. V. Reddy, N. V. Reddy, and A. Ghosh, "Fused deposition modelling using direct extrusion," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 2, no. 1, pp. 51-60, 2007.
- [54] M. Kaveh, M. Badrossamay, E. Foroozmehr, and A. H. Etefagh, "Optimization of the printing parameters affecting dimensional accuracy and internal cavity for HIPS material used in fused deposition modeling processes," (in English), *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 226, no. 226 pp. 280-286, Dec 2015.
- [55] A. J. Qureshi, S. Mahmood, W. L. E. Wong, and D. Talamona, "Design for scalability and strength Optimisation for components created through FDM process," presented at the ICED15, July 2015, 2015.

- [56] Y. Yang, Y. Chen, Y. Wei, and Y. Li, "3D printing of shape memory polymer for functional part fabrication," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 84, no. 9-12, pp. 2079-2095, 2015.
- [57] S. F. Costa, F. M. Duarte, and J. A. Covas, "Thermal conditions affecting heat transfer in FDM/FFE: a contribution towards the numerical modelling of the process," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 10, no. 1, pp. 35-46, 2014.
- [58] Q. Sun, G. M. Rizvi, C. T. Bellehumeur, and P. Gu, "Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 14, no. 2, pp. 72-80, 2008.
- [59] M. Faes, E. Ferraris, and D. Moens, "Influence of Inter-layer Cooling time on the Quasi-static Properties of ABS Components Produced via Fused Deposition Modelling," *Procedia CIRP*, vol. 42, pp. 748-753, 2016.
- [60] J. Du, Z. Wei, X. Wang, J. Wang, and Z. Chen, "An improved fused deposition modeling process for forming large-size thin-walled parts," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 234, pp. 332-341, 2016.
- [61] A. K. Ravi, A. Deshpande, and K. H. Hsu, "An in-process laser localized pre-deposition heating approach to inter-layer bond strengthening in extrusion based polymer additive manufacturing," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 24, pp. 179-185, 2016.
- [62] K. Desai, "Beat the heat when molding high-temperature thermoplastics," *Plastics Technology*, Oct 2012; 2012.
- [63] A. M. Díez-Pascual, M. Naffakh, C. Marco, G. Ellis, and M. A. Gómez-Fatou, "High-performance nanocomposites based on polyetherketones," *Progress in Materials Science*, vol. 57, no. 7, pp. 1106-1190, 2012.
- [64] M. Vaezi and Y. Shoufeng, "Extrusion-based additive manufacturing of PEEK for biomedical applications," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 10, no. 3, pp. 123-35, / 2015.
- [65] K. Chuang, T. W. Hughes, R. Avakian, and L. Hu, "Reactive Extrusion of High Temperature Resins for Additive Manufacturing," 2012.

- [66] A. A. Hassen, J. Lindahl, X. Chen, B. Post, L. Love, and V. Kunc, "Additive manufacturing of composite tooling using high temperature thermoplastic materials," in *SAMPE Long Beach 2016 Conference and Exhibition, May 23, 2016 - May 26, 2016*, Long Beach, CA, United states, 2016, vol. 2016-January, p. A and P Technology; AIRTECH Advanced Materials Group; et al.; Surface Generation; TCR Composites; Thermal Equipment Corporation (TEC): Soc. for the Advancement of Material and Process Engineering.
- [67] A. Bagsik and V. Schöppner, "Mechanical properties of fused deposition modeling parts manufactured with Ultem 9085," *ANTEC 2011*, 2011.
- [68] A. Bagsik, S. Josupeit, V. Schoeppner, and E. Klemp, "Mechanical analysis of lightweight constructions manufactured with fused deposition modeling," in *AIP Conference Proceedings 1593*, 2014, pp. 696-701.
- [69] T.Osborn *et al.*, "Experimental and Theoretical Evaluation of Stiffness Properties of Fused Deposition Modeling Parts," 2015.
- [70] K. M. Rahman, T. Letcher, and R. Reese, "Mechanical properties of additively manufactured peek components using fused filament fabrication," in *ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE 2015, November 13, 2015 - November 19, 2015*, Houston, TX, United states, 2015, vol. 2A-2015, p. American Society of Mechanical Engineers (ASME): American Society of Mechanical Engineers (ASME).
- [71] W. Z. Wu, P. Geng, J. Zhao, Y. Zhang, D. W. Rosen, and H. B. Zhang, "Manufacture and thermal deformation analysis of semicrystalline polymer polyether ether ketone by 3D printing," *Materials Research Innovations*, vol. 18, no. sup5, pp. S5-12-S5-16, 2014.
- [72] W. Wu, P. Geng, G. Li, D. Zhao, H. Zhang, and J. Zhao, "Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS," *Materials*, vol. 8, no. 9, pp. 5834-5846, 2015.
- [73] S. Xiaoyong, C. Liangcheng, M. Honglin, G. Peng, B. Zhanwei, and L. Cheng, "Experimental analysis of high temperature PEEK materials on 3D printing test," in *9th*

International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, ICMTMA 2017, January 14, 2017 - January 15, 2017, Changsha, Hunan, China, 2017,
pp. 13-16: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

- [74] M.Tafreshnia, "Rapport du projet d'études supérieures : Design and manufacturing of a heated chamber for 3D printing " sous la direction de Daniel THERRIAULT, Ecole Polytechnique de Montréal 2016.

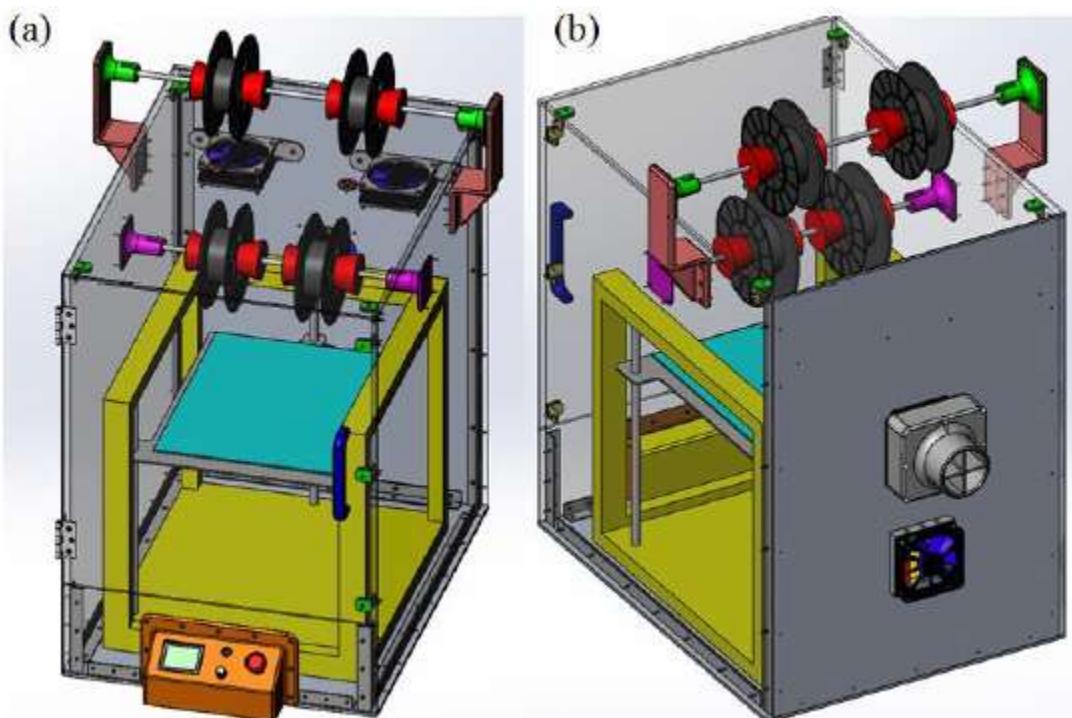
ANNEXE A – PROCÉDURE DE FABRICATION DES FILAMENTS



Figure A-1: Procédure choisie et mise en œuvre lors de travaux antérieurs [43, 44]

ANNEXE B – MODÈLE CAO INITIAL DE LA CHAMBRE CHAUFFANTE

Ce modèle a été réalisé avec les logiciels SolidWorks et CatiaV5.



B- 1: Modèle CAO initial de la chambre chauffante avec possibilité de placer la bobine à l'intérieur ou à l'extérieur, en vue a) de devant b) de derrière [72]