

Impression 3D d'outillages de grandes dimensions en
polymères renforcés pour le moulage de pièces composites

par

Hugo POISSON-GUIBERT

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 20 SEPTEMBRE

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Hugo POISSON-GUIBERT, 2023



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette oeuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'oeuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

M. Simon Joncas, directeur de mémoire
Département de génie des systèmes, École de technologie supérieure

M. Sébastien Gordon, codirecteur
Centre technologique en aérospatial

M. Christian Belleau, président du jury
Département de génie mécanique, École de technologie supérieure

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

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

LE 11 SEPTEMBRE 2023

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer toute ma gratitude aux personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire sur l'impression 3D d'outillages de grandes dimensions.

Tout d'abord, je souhaite exprimer ma reconnaissance envers mon directeur de recherche, Simon Joncas. Je tiens à le remercier chaleureusement pour son encadrement attentif, son soutien inconditionnel et ses précieux conseils tout au long de cette aventure. Je suis particulièrement reconnaissant envers lui pour son aide précieuse lors des périodes de doute, guidant mes réflexions et m'aidant à retrouver le chemin vers la clarté et la compréhension.

Je tiens également à remercier mon co-directeur de recherche, Sébastien Gordon, pour sa collaboration étroite, son expertise et sa disponibilité. Ses apports et ses éclairages ont grandement enrichi mon travail de recherche et m'ont permis d'y voir plus clair.

Un remerciement tout particulier va à Joël Grignon qui m'a accompagné et assisté tout au long de ce projet que ce soit pour l'impression, l'usinage ou bien la métrologie. Son expertise, son humour et sa volonté de partager ses compétences ont été essentiels pour la réalisation de ce projet. Merci à lui pour tous les moments passés ensemble.

Je voudrais adresser mes remerciements à Daniel Lacasse et Mario Breton pour m'avoir accordé toute leur confiance et support lors de ce projet.

Je voudrais aussi témoigner ma reconnaissance à Xavier Rimpault pour son soutien inestimable, son œil extérieur au projet qui m'a permis de prendre du recul et trouver de nouvelles solutions.

Je tiens à remercier Maryam Shokrollahi pour son aide précieuse dans la compréhension des phénomènes physique liés aux polymères. Les moments de réflexions ensemble ont été très enrichissant.

Enfin, je suis reconnaissant envers l'ÉTS qui m'a offert l'opportunité de poursuivre mes études dans un environnement propice à l'épanouissement académique. Mes sincères remerciements vont à chacune de ces personnes pour leur contribution à la réalisation de ce mémoire.

Impression 3D d'outillages de grandes dimensions en polymères renforcés pour le moulage de pièces composites

Hugo POISSON-GUIBERT

RÉSUMÉ

Grâce à la démocratisation de la fabrication additive durant la dernière décennie, le procédé de fabrication additive de grandes dimensions a pu voir le jour et se développe aujourd'hui à grands pas. Une dizaine de compagnies environ proposent un système d'impression de grandes dimensions. Cette technologie attire les industriels de différents secteurs qui s'interrogent sur les questions de performances, de rentabilité et d'impact environnemental de ce procédé.

L'objectif principal de ce projet est de maîtriser le procédé de fabrication additive de grandes dimensions afin d'optimiser et rendre viable l'impression d'outillage de grandes dimensions destinés à la fabrication de pièces en matériaux composites.

Pour cela, le projet est décomposé en trois étapes. Tout d'abord, il est nécessaire d'identifier les causes et conséquences des limitations du procédé en imprimant, à la verticale, un premier outillage de grandes dimensions. Ensuite, l'identification des limites du procédé, en particulier concernant la direction d'impression et l'angle de dévers, a permis de développer deux méthodes afin de pouvoir s'affranchir de celles-ci. La première méthode est l'impression dynamique, qui correspond à une impression non planaire combinée à une direction d'impression variable. La seconde consiste à imprimer avec une buse coudée à 45° pour contourner les limitations d'inclinaison de l'extrudeuse, ce qui permet une plus grande flexibilité. La dernière étape a permis de démontrer la validité des méthodes développées précédemment. Pour cela, un second outillage complexe a été imprimé avec la méthode standard d'impression verticale ainsi qu'avec la méthode d'impression dynamique afin de comparer les forces et faiblesses de chacune d'elles.

Le développement de nouvelles méthodes a ainsi permis d'assouplir les contraintes d'impression en proposant une amélioration matérielle (buse à 45°) et une amélioration logicielle (tranchage dynamique). De plus, l'impression des deux outillages a permis de mieux définir les limites actuelles du procédé avec ce type d'équipement.

Mots-clés: Fabrication additive de grandes dimensions, Impression 3D, méthodes de conception/fabrication, outillage en polymères renforcés, fibres courtes

3D printing of large-scale tools in reinforced polymers for molding composite parts

Hugo POISSON-GUIBERT

ABSTRACT

Thanks to the democratization of additive manufacturing throughout the last decade, the large scale additive manufacturing process has emerged and is now growing by leaps and bounds. About ten companies offer a large-scale printing system. This technology is appealing manufacturers from different sectors, raising questions about the performance, cost-effectiveness, and environmental impact of this process.

The main objective of this project is to master the large scale additive manufacturing process in order to optimize and make viable the printing of large-scale tooling for the fabrication of composite parts.

To achieve this, the project is divided into three stages. Firstly, it is necessary to identify the causes and consequences of the process's limitations by printing vertically a first large-scale tool. Secondly, the identification of the process limitations, particularly regarding the printing direction and overhang, has led to the development of two methods in order to overcome these. The first method is dynamic printing, which includes non-planar printing combined with variable printing direction. The second method consists of using a 45-degree angled nozzle to bypass the extruder's inclination limitations, providing greater flexibility. The last stage demonstrated the validity of the previously developed methods. For this purpose, a second complex tool was printed using both the vertical printing method and the dynamic printing method to compare the strengths and weaknesses of each one of them.

The development of new methods has thus made it possible to alleviate the printing constraints by offering a material improvement (45-degree nozzle) and a software improvement (dynamic slicing). Furthermore, the printing of the two toolings has helped to better define the current limitations of the process with this type of equipment.

Keywords: Large Scale Additive Manufacturing, 3D printing, Design/manufacturing methods, reinforced polymer tooling, short fiber

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	3
1.1 Description du procédé de fabrication additive de grandes dimensions	3
1.1.1 Principe de la fabrication additive de grandes dimensions	3
1.1.2 Revue des différents procédés d'impressions usuels	4
1.1.2.1 Dépôt de fil fondu (FDM/FFF)	4
1.1.2.2 Fabrication par arc électrique (WAAM)	5
1.1.3 Systèmes de fabrication additive de grandes dimensions des princi- paux leaders du domaine	6
1.1.3.1 Le système LSAM de Thermwood	7
1.1.3.2 Le système Masterprint d'Ingersoll machine tools	7
1.1.3.3 Le système AM flexbot de CEAD	8
1.1.4 Comparaison entre les systèmes à portiques et les robots	9
1.1.5 Principaux logiciels de tranchage	11
1.1.6 Exemples d'applications de la fabrication additive de grandes dimensions	12
1.2 Caractérisation des polymères utilisés en fabrication additive de grandes dimensions	14
1.2.1 Choix des polymères pour l'impression de grandes dimensions	14
1.2.2 Effet de l'orientation des fibres courtes sur les propriétés méca- niques des cordons	17
1.2.3 Expansion thermique des cordons extrudés	20
1.2.4 Adhésion des couches entres elles	21
1.3 Différences de conceptions entre l'impression 3D usuelle et de grandes dimensions	23
1.3.1 Remplissage et cordons continus	23
1.3.2 Supports d'impression	25
1.3.3 Dimensions des cordons	27
1.3.4 Orientation d'impression	28
1.3.5 Durée de couche	28
1.4 Finition et durabilité des moules imprimés	29
CHAPITRE 2 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE	35
2.1 Objectifs du projet	35
2.1.1 Identification des limites du procédé	35
2.1.2 Développement de méthodes de conceptions et d'impressions pour pallier aux limitations	36
2.1.3 Validation des méthodes développées pour rendre le procédé in- dustriellement viable	37

2.2	Équipements et matériaux	37
2.2.1	Description de la cellule robotique AM Flexbot de CEAD	37
2.2.2	Principe de fonctionnement de cellule robotique AM Flexbot	40
2.2.3	Règles de conception CEAD	41
2.2.4	Description des granules utilisées dans le cadre de ce projet	44
2.2.5	Équipement d'inspection et de caractérisation des pièces imprimées	44
2.3	Méthodologie	45
2.3.1	Impression à la verticale d'un grand moule pour identifier les limites du procédé	45
2.3.2	Impression dynamique et conception d'une buse pour pallier aux limitations du procédé	48
2.3.3	Impression et conception d'un moule industriel pour démontrer la viabilité des méthodes développées	49
CHAPITRE 3 CONCEPTION ET FABRICATION D'UN OUTILLAGE DE GRANDES DIMENSIONS PERMETTANT D'IDENTIFIER LES LIMITATIONS PHYSIQUES ET NUMÉRIQUES DU PROCÉDÉ		51
3.1	Conception de la géométrie de l'outillage du véhicule Chinook	51
3.1.1	Impression de la structure interne	53
3.1.1.1	Principe de l'impression d'une structure interne	53
3.1.1.2	Tracé de parcours discontinu	56
3.1.1.3	Cordons doubles	58
3.1.2	Géométrie du bord d'attaque	61
3.2	Défis d'impression et défauts courants	65
3.2.1	Retrait et distorsion des pièces	65
3.2.2	Caractérisation de l'adhésion entre les couches	67
3.2.2.1	Choix des paramètres d'impression	67
3.2.2.2	Problèmes encourus lors de la production des pièces	68
3.2.3	Surplus de matière dans les congés	71
3.3	Inspection dimensionnelle des pièces imprimées	72
CHAPITRE 4 DÉVELOPPEMENT DE MÉTHODES DE CONCEPTION ET D'IMPRESSON RÉPONDANT AUX LIMITATIONS PHYSIQUES LIÉES À L'ANGLE DE DÉVERS		75
4.1	Impression dynamique	75
4.1.1	Gestion du débit lors de l'extrusion	78
4.1.2	Données à disposition	80
4.1.3	Récupération des données	81
4.1.4	Traitement des données	82
4.1.5	Impression d'un tube courbé à section carré	84
4.2	Développement d'une buse à 45°	87
4.2.1	Utilisation d'une buse à 45°	88
4.2.2	Conception et fabrication d'une buse à 45°	89
4.2.3	Impression d'une boîte simple avec une buse à 45°	91

4.2.4	Exemple théorique d'une pièce combinant buse à 45° et impression dynamique	94
CHAPITRE 5	VALIDATION DES MÉTHODES DE CONCEPTION ET D'IMPRESSION DÉVELOPPÉES	97
5.1	Présentation de l'outillage de validation des méthodes	97
5.2	Adaptation de la géométrie de l'outillage et validation des paramètres d'impression	99
5.3	Impression et post-cuisson des outillages	106
5.3.1	Impression verticale de l'outillage	106
5.3.2	Impression dynamique de l'outillage	108
5.4	Validation et inspection des outillages	112
5.4.1	Inspection avant/après post-cuisson	112
5.4.2	Inspection dimensionnelle des outillages par rapport au modèle numérique (CAD)	113
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	119
ANNEXE I	CALCUL DE L'ESPACEMENT DU CAD POUR CHEVAUCHEMENT DES CORDONS À L'IMPRESSION	123
ANNEXE II	FICHES TECHNIQUES DES MATÉRIAUX UTILISÉS	125
ANNEXE III	ALGORITHME DE GESTION DU DÉBIT	129
BIBLIOGRAPHIE	143

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Principaux avantages et inconvénients des systèmes d'impression avec bras robotisés et portiques 10
Tableau 1.2	Liste de logiciels industriels de tranchages destinés aux robots 11
Tableau 1.3	Principaux polymères et fournisseurs de granules pour l'impression de grandes dimensions 17
Tableau 2.1	Règles de conception mises en place par CEAD 42
Tableau 5.1	Récapitulatif des essais réalisés avec leurs objectifs et paramètres 101

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Fabrication additive par dépôt de fil fondu 5
Figure 1.2	Fabrication additive par procédé WAAM 6
Figure 1.3	Différents modèles de machine LSAM 7
Figure 1.4	Modèle de machine Masterprint 8
Figure 1.5	Coque de bateau imprimée à l'université du Maine 12
Figure 1.6	Moule d'une pale d'hélicoptère 13
Figure 1.7	Structure de la torche du mémorial Al Davis 14
Figure 1.8	Exemple de granules de polymère sous forme de pellets. 15
Figure 1.9	Pyramide des polymères utilisés pour l'impression 3D 16
Figure 1.10	Orientation des fibres dans la direction d'impression 19
Figure 1.11	Comparaison du Module d'Young de L'ABS seul et l'ABS renforcé en fibres de carbone 19
Figure 1.12	Caractère anisotrope de l'expansion thermique des cordons en fonction de l'orientation des fibres 21
Figure 1.13	Formation des liaisons entre deux cordons 22
Figure 1.14	Différences entre le contour continu et le remplissage 24
Figure 1.15	Parcours d'impression 25
Figure 1.16	Espacement des renforts sur des outillages 25
Figure 1.17	Schéma de supports d'une surface de pièce 26
Figure 1.18	Schéma de supports d'une surface de pièce 27
Figure 1.19	Différence de l'orientation d'impression à la verticale et à 45° 28
Figure 1.20	Effet de l'épaisseur des couches sur la résolution d'impression 30
Figure 1.21	Schéma du principe d'impression à double résolution 31

Figure 1.22	Buse à double sortie coaxiale de diamètres différents	32
Figure 1.23	Surplus de matière pour l'usinage des surfaces utiles	33
Figure 1.24	Graficet du processus d'expérience mis en place	34
Figure 2.1	Schématisation de l'orientation d'une surface imprimée selon le type d'impression	36
Figure 2.2	Cellule robotique AM Flexbot de l'ÉTS	38
Figure 2.3	Unité de commande de la cellule CEAD	39
Figure 2.4	Étapes majeures du processus d'impression	41
Figure 2.5	Schéma des règles de design	42
Figure 2.6	Exemple de pont à éviter	43
Figure 2.7	Bras de mesure par scan laser	45
Figure 2.8	Diffuseur de la voiture éolienne Chinook	46
Figure 2.9	Dessins des sections du moule identifiant les structures internes et le bord d'attaque	47
Figure 2.10	Boîte de caractérisation de l'angle de dévers	47
Figure 2.11	Dessin du tube courbé démontrant le fonctionnement de l'impression dynamique	49
Figure 2.12	Outillage utilisé pour valider les méthodes d'impressions développées	50
Figure 3.1	Segmentation du moule du diffuseur de la voiture éolienne	52
Figure 3.2	Schématisation du renfort à l'intérieur d'une pièce imprimée	53
Figure 3.3	Limitation de la flexion de la surface grâce aux renforts	55
Figure 3.4	Support de la surface horizontale grâce au renfort lors de l'impression à 45°	56
Figure 3.5	Principe de la structure interne	57
Figure 3.6	Manque de matière lors de la fin d'un cordon	58

Figure 3.7	Géométrie des cordons et des renforts	60
Figure 3.8	Principe de diffusion de la chaleur sur une couche	60
Figure 3.9	boîte simple avec un angle de dévers progressif	62
Figure 3.10	Vue en coupe du scan montrant l'angle de dévers maximal du VYTEEN PCGF20	62
Figure 3.11	Vue en coupe de l'effondrement du profil du bord d'attaque de l'extrados	64
Figure 3.12	Schéma de la modification réalisée pour l'impression du bord d'attaque	65
Figure 3.13	Vue en coupe montrant la distorsion de l'outillage	67
Figure 3.14	Boîte permettant de définir le temps de couche maximal	68
Figure 3.15	Passage de la buse de 12mm à la buse de 6mm	70
Figure 3.16	Décollement des cordons sur l'intrados	71
Figure 3.17	Surplus et manque de matière au niveau des congés	72
Figure 3.18	Inspection géométrique d'une section de l'intrados	73
Figure 4.1	Profil d'impression possible avec une direction d'impression à 45°	76
Figure 4.2	Inclinaison de la surface de moulage	77
Figure 4.3	Tracé du parcours d'un tube courbé	78
Figure 4.4	Différences d'épaisseurs des couches lors de l'impression dynamique	79
Figure 4.5	Correspondances des différentes variables du code-G avec les axes du robots	81
Figure 4.6	Liste des données récoltées grâce au code-G créé par le post- processeur de CEAD	82
Figure 4.7	Correspondance des points de la couche N avec la couche $N + 1$	82
Figure 4.8	Calcul de l'épaisseur au point i de la couche N	83
Figure 4.9	Impression du tube courbé	85

Figure 4.10	Présence de surplus de matière lors de l'impression dynamique	86
Figure 4.11	Alignement des points par le post-processeur	87
Figure 4.12	Limites de placement de l'extrudeuse	89
Figure 4.13	Conception de la buse coudée à 45°	90
Figure 4.14	Impression de la buse coudée à 45°	91
Figure 4.15	Impression de la boîte avec la buse régulière	92
Figure 4.16	Impression de la première boîte avec la buse à 45°	93
Figure 4.17	Impression de la seconde boîte avec la buse à 45° ayant des cordons de bonne qualité mais une collision avec l'extrudeuse	94
Figure 4.18	Conception d'une pièce combinant impression dynamique et buse à 45°	95
Figure 5.1	Vue de côté de l'outillage montrant la variation brusque de surfaces de +45° à -45°	98
Figure 5.2	Zone d'amélioration de la pièce imprimée avec la méthode d'impression dynamique	99
Figure 5.3	Dimensionnement des congés pour l'outillage	101
Figure 5.4	boîtes de test du Dahltram® C-250CF fourni par Airtech	102
Figure 5.5	Fini de surface et porosités dans la boîte de test	102
Figure 5.6	Choix de la courbe guide pour le tranchage de l'outillage	104
Figure 5.7	Variations de la hauteur des cordons dû au faible rayon de courbure	105
Figure 5.8	Modification de la conception de l'outillage initial pour l'impression	105
Figure 5.9	Vue en coupe des modifications de la conception de l'outillage initial pour l'impression	106
Figure 5.10	Impression verticale de l'outillage	107
Figure 5.11	Agrandissement de zones sur le moule imprimé à la verticale	107
Figure 5.12	Impression dynamique de l'outillage	109

Figure 5.13	Premières couches de l'impression dynamique de l'outillage	110
Figure 5.14	Effondrement des cordons dans les zones avec un angle de dévers supérieur à 45°	110
Figure 5.15	Vue en coupe de l'espacement des cordons	111
Figure 5.16	Schéma de la variation d'épaisseur du modèle numérique (CAD)	112
Figure 5.17	Inspection géométrique des outillages avant et après la post-cuisson	113
Figure 5.18	Inspection géométrique de l'outillage imprimé à la verticale	114
Figure 5.19	Zone d'excès de matière au contact des renforts et de la surface utile	115
Figure 5.20	Inspection géométrique de l'outillage imprimé en dynamique	116
Figure 5.21	Zones d'effondrements de la surface de moulage	117

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ÉTS	École de Technologie Supérieure
CTA	Centre technologique en aérospatial à Saint-Hubert, Canada
3D	3 dimensions
ISO	Organisation internationale de normalisation (International Organization for Standardization)
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
STL	Stéréolithographie
SLA	Stereolithography apparatus
PJ	Poly Jet
3DP	3 Dimensional Printing
MCPP	Mitsubishi chemical
SLS	Selective Laser Sintering
SLM	Selective Laser Melting
LOM	Laminated Object Modeling
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing
MIG	Metal Inert Gaz
MAG	Metal Active Gaz
CNC	Commande numérique par ordinateur (Computer Numerical Control)
LSAM	Large Scale additive Manufacturing
HDPE	Polyéthylène haute densité (High density PE)
PETG	Polyéthylène terephthalate glycol
PIPG	Post-industrial PETG
PC	Polycarbonate

PP	Polypropylène
PPE	Polyphenylene Ether
PPO	Polyphénylène oxyde
PLA	Acide polylactique
ASA	Acrylonitrile styrène acrylate
ABS	Acrylonitrile butadiène styrène
PA	Polyamide/Nylon
HIPS	Polystyrène a haut impact
PEI	Polyétherimides
ULTEM 1010/9085 Polyétherimide (PEI) de SABIC	
PPSU	Polyphénylsulfone
PPS	Polysulfure de phénylène
PSU	Polysulfone
PESU	Polyéthersulfone
PEEK	Polyétheréthercétone
PEKK	Polyéthercétonecétone
FA	Fabrication additive
BAAM	Big Area Additive Manufacturing
VARTM	Vacuum assisted resin transfer molding
AM	Additive Manufacturing
RPM	Revolution Per Minute
CAD	Computer Aided Design
CTE	Coefficient d'expansion thermique (Coefficient of Thermal Expansion)
Grafcet	Graphe Fonctionnel de Commande des Étapes et Transitions
HMI	Interface Homme-machine

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

kg	Kilogramme
'	Pied
m	Mètre
cm	Centimètre
mm	Millimètre
μm	Micromètre
m^3	Mètre cube
L	Litre
s	Seconde
min	Minute
h	Heure
Pa	Pascal
GPa	Giga Pascal
°C	Degré Celcius
%	pourcentage
\$	Dollar (US)
°	degré (angle)
X,Y,Z	cordonnées cartésienne
R1,R2,R3	rotation cartésienne
T_g	température de transition vitreuse
T_f	température de fusion
α	coefficient expansion thermique
α_X	[mm/m] coefficient expansion thermique selon l'axe X

α_Y	coefficient expansion thermique selon l'axe Y
α_Z	coefficient expansion thermique selon l'axe Z
α_{fibre}	coefficient expansion thermique de la fibre
$\alpha_{polymere}$	coefficient expansion thermique du polymère
α_{invar}	coefficient expansion thermique de l'invar
α_1	coefficient d'expansion thermique 1 du PESU 1810 (TechmerPm)
α_2	coefficient d'expansion thermique 2 du PESU 1810 (TechmerPm)
ξ	paramètre géométrique du renfort
η	paramètre géométrique du composite
E_c	Module d'Young du composite
E_{fibre}	Module d'Young de la fibre
$E_{matrice}$	Module d'Young de la matrice (Polymère)
V_{fibre}	Fraction volumique des fibres
L	Longueur des fibres
D	Diamètre des fibres
E	Débit
E_{ajoute}	Débit ajouté/retiré
$E_{ligne\ i-1}$	Débit de la ligne correspondant au point i-1
$V_{initial}$	Volume initial
$largeur_{couche}$	Largeur du cordon
$epaisseur_{couche}$	Épaisseur de la couche
$\Delta E_{initial}$	Variation du débit initiale
ΔE	Variation du débit
ΔV	Variation de volume
$D_{i,i+1}$	Distance entre les points i et i+1

$D_{N/M}$ Distance entre les points N et M

$D_{N-1,N}$ Distance entre les points N-1 et N

INTRODUCTION

Contexte et objectifs du projet :

Ce projet a été initié dans le cadre de la chaire de recherche AéroComp, une chaire de recherche industrielle du CRSNG en fabrication de composants en matériaux composites pour l'aérospatial. Ce projet est un projet en étroite collaboration entre l'ÉTS Montréal (École de technologie supérieure), Le CTA (Centre Technologique en Aérospatial) basé à Saint-Hubert ainsi qu'un partenaire industriel québécois cherchant à évaluer la performance et la rentabilité de cette technologie. Les méthodes de fabrication d'outillages pour des pièces composites reposent actuellement sur l'usinage métallique dans la masse et sur la fabrication de maîtres modèles et de stratifiés composites. Ces méthodes sont coûteuses en temps de main d'œuvre ainsi qu'en matières et requièrent des délais de fabrication élevés. L'impression 3D de grandes dimensions en polymères renforcés recyclables et/ou recyclés s'intègre ainsi dans un contexte de diminution du temps et des coûts de fabrication d'outillage. L'objectif du projet est de répondre aux besoins du partenaire industriel en s'articulant autour des objectifs suivants :

- Identifier les limites du procédé de fabrication additive de grandes dimensions.
- Développer des méthodes de conception et d'impression permettant de répondre aux limitations liées au procédé.
- Démontrer la validité des méthodes développées permettant de rendre le procédé viable industriellement.

Description du projet :

La fabrication additive de grandes dimensions ou grand format est un procédé de fabrication très récent, qui ne cesse de se développer. L'ÉTS s'est ainsi équipé d'une solution robotique AM Flexbot de la compagnie CEAD. Il s'agit d'une cellule étant capable de réaliser de l'impression de

grandes dimensions de polymères renforcés en fibres courtes et de l'usinage. D'autres compagnies développent aussi des systèmes d'impression et se confrontent tous à de nombreux défis pour rendre ce procédé viable techniquement et économiquement pour l'industrie. Les trois axes autour desquels s'articulent ce projet permettent chacun de progresser dans la compréhension et le développement du procédé de fabrication additive de grandes dimensions.

Le premier axe consiste en l'impression d'un outillage, qui permet d'identifier les forces et les faiblesses du procédé grâce à un outillage typique destiné au moulage de pièces en composites. Le second axe s'appuie sur les résultats obtenus grâce au premier axe pour développer deux méthodes permettant de s'affranchir des limitations précédemment rencontrées. Le dernier axe vise à appliquer les connaissances acquises lors de la réalisation des deux axes précédents pour imprimer un outillage complexe avec deux méthodes différentes pour ensuite comparer les résultats obtenus avec ces deux méthodes (impression verticale et dynamique) et d'établir les règles de conception et de fabrication.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Description du procédé de fabrication additive de grandes dimensions

Ce chapitre propose un état de l'art de la fabrication additive selon 3 axes :

- Les différents procédés de fabrication additives usuels dont l'impression de grandes dimensions.
- les caractéristiques des polymères utilisés dans l'impression de grandes dimensions.
- les différences entre les procédés d'impression grandes dimensions et usuels.

1.1.1 Principe de la fabrication additive de grandes dimensions

Selon la norme ISO, la fabrication additive représente l'ensemble des "procédé[s] d'assemblage[s] de matériaux pour fabriquer des pièces à partir de données de modèle 3D, en général couche après couche, à l'inverse des méthodologies de fabrication soustractive et de fabrication de mise en forme" (Norme-ISO, 2021). Les procédés de fabrication additive sont nombreux et possèdent tous des caractéristiques et des processus de réalisations différents, cependant ils possèdent de nombreux points communs sur le principe de réalisation tel que la fabrication par couches successives.

La fabrication additive de grandes dimensions est un procédé d'extrusion de grandes quantités de matière allant approximativement de 10 à 100 kg par heure pour des dimensions allant de 1 à 30 m de long selon les systèmes d'impression. Contrairement aux procédés de mise en forme industriels conventionnels, la fabrication additive fonctionne sur un principe d'ajout et non de retrait ou de déplacement de matière. Avec les procédés conventionnels tels que l'usinage, le découpage, le matriçage, l'emboutissage, l'injection, etc., le principe consiste à retirer ou à déformer de la matière d'un brut jusqu'à obtenir la pièce souhaitée. Tandis que l'impression

3D consiste au contraire à ajouter de la matière par couches successives, où c'est requis, afin d'obtenir un brut qui est par la suite partiellement usiné pour obtenir la pièce désirée.

1.1.2 Revue des différents procédés d'impressions usuels

Selon la norme ISO (Norme-ISO, 2021), il existe 7 principe physiques de fabrication additive :

- Le Dépôt de fil fondu (FDM/FFF) est détaillé à la section 1.1.2.1
- La stéréolithographie (SLA/STL) est un procédé de polymérisation de résine couche par couche.
- La fusion/frittage laser sur lit de poudre (SLS/SLM) est une technologie qui consiste à fusionner de la poudre (plastiques, métalliques, céramiques, etc.) couche après couche à l'aide d'un faisceau laser.
- La projection de goutte de matériau (PJ) est un procédé de projection de fines gouttes couche après couche pour créer la pièce.
- La projection de liant sur du substrat (3DP) est un procédé de projection de goutte, servant de liant, sur un lit de poudre.
- La projection de poudre sous flux d'énergie est une technologie de projection directe de poudre métallique dans un faisceau laser pour la solidifier au reste de la pièce.
- L'assemblage de couches découpées (LOM) ou strato-conception est un principe d'assemblage de couches prédécoupées les unes sur les autres pour réaliser la pièce.

Les procédés de dépôt de fil fondu et de fabrication par arc électrique sont particulièrement proche de la fabrication additive de grandes dimensions, ils sont ainsi développés dans les sections suivantes.

1.1.2.1 Dépôt de fil fondu (FDM/FFF)

Le procédé de dépôt de fil fondu (Figure 1.1) est le procédé le plus connu du grand public et s'apparente au procédé de fabrication additive de grandes dimensions. Ce procédé se base sur

l'extrusion d'un fil fondu de plastique à l'aide d'une buse chauffée. La buse se déplace dans le plan pour déposer une couche de matériau plastique avant de réitérer à la couche suivante. C'est un procédé rapide, économique et pratique pour le prototypage rapide mais qui possède des limites de fini de surface et de précision.

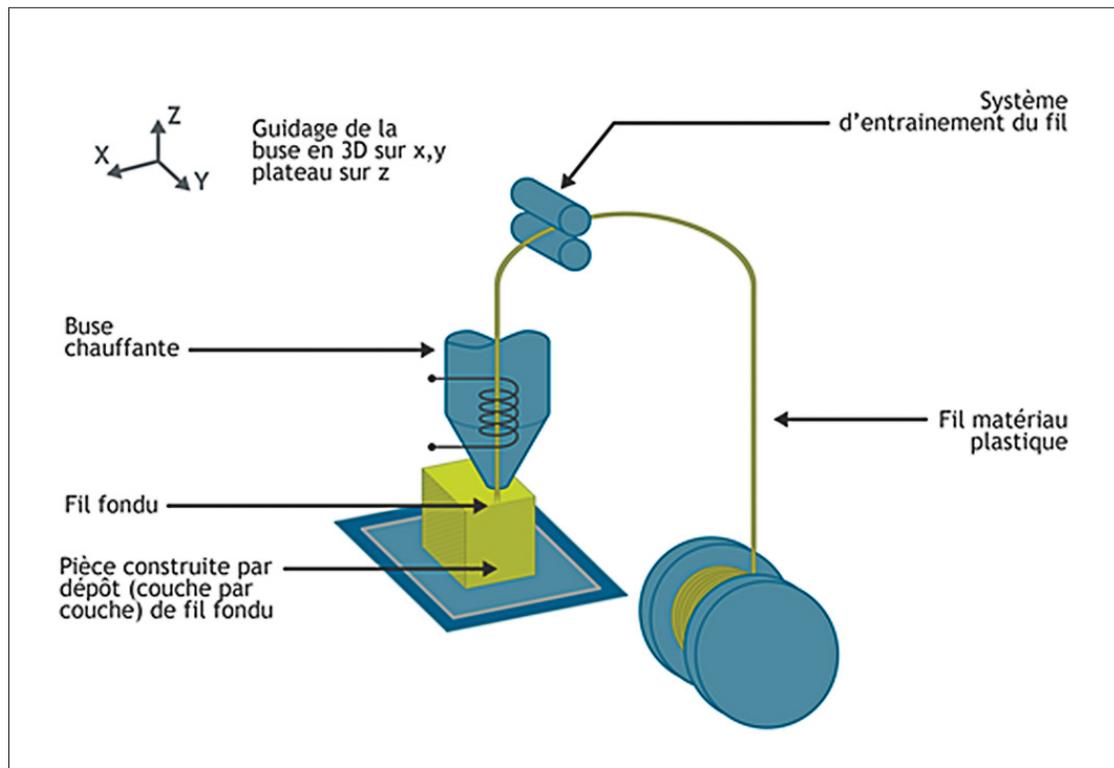


Figure 1.1 Principe de fonctionnement de l'impression par dépôt de fil fondu tirée de Mecastyle (2022)

1.1.2.2 Fabrication par arc électrique (WAAM)

Le procédé WAAM (Figure 1.2) est un procédé relativement récent, non présent dans les 7 principes physiques décrits par la norme ISO 17296-2, cependant il ressemble à la fabrication additive de grandes dimensions par ses similarités au niveau de la conception et la fabrication des pièces, ainsi qu'au niveau des dimensions des pièces imprimées et de l'équipement utilisé. En effet, le procédé WAAM consiste à réaliser une pièce par fabrication additive à l'aide d'un système de soudage de type metal inert gaz (MIG) ou metal active gaz (MAG) monté sur un

portique ou un bras robotisé qui vient bâtir des cordons réalisant la pièce couche par couches. La pièce réalisée s'apparente plutôt à une ébauche que l'on vient usiner par la suite, comme pour l'impression de grandes dimensions.

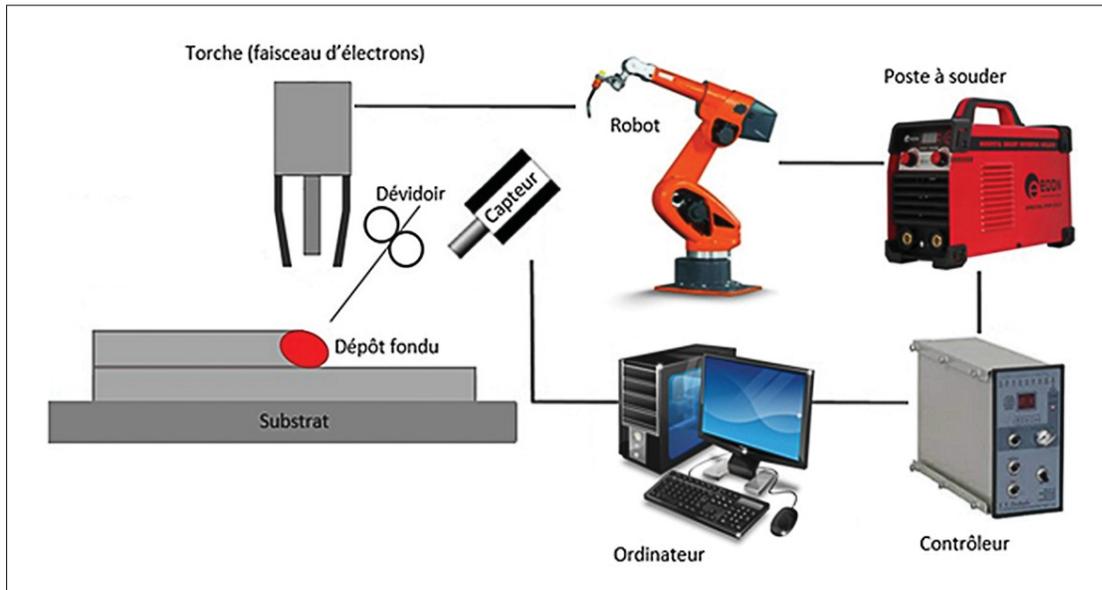


Figure 1.2 Principe de fonctionnement de l'impression par procédé WAAM de Mecastyle (2022)

1.1.3 Systèmes de fabrication additive de grandes dimensions des principaux leaders du domaine

Quelques compagnies se partagent le marché de la fabrication additive de grandes dimensions et leur nombre augmente chaque année. Elles développent leur système d'impression sur 2 grands principes : les bras robotisés et les portiques. Les principales compagnies développant des portiques sont Thermwood (LSAM), Ingersoll (Masterprint), cincinnatti (BAAM), CMS (Kreator) et Breton (Genesi). Les compagnies CEAD (AM Flexbot) et Caracol (Heron AM) sont quant à elles les principales compagnies utilisant des bras robotisés. Les sections suivantes présentent en détail trois solutions parmi celles citées précédemment.

1.1.3.1 Le système LSAM de Thermwood

Thermwood est une compagnie américaine initialement spécialisée dans la fabrication de machines de type CNC 3 et 5 axes pour réaliser des opérations d'usinage. Thermwood s'est basée sur son expérience dans les systèmes CNC à portique pour développer son portique d'impression de grandes dimensions. Ce système est aussi capable de réaliser les opérations d'usinage des pièces une fois l'impression réalisée. Ce système d'impression baptisé LSAM, pour "Large Scale Additive Manufacturing", est offert en diverses versions de machines allant de la LSAM MT qui imprime jusqu'à 3m par 3m à la LSAM 1540 qui possède une zone d'impression de 4,5m par 12m tels que montrées sur la Figure 1.3.

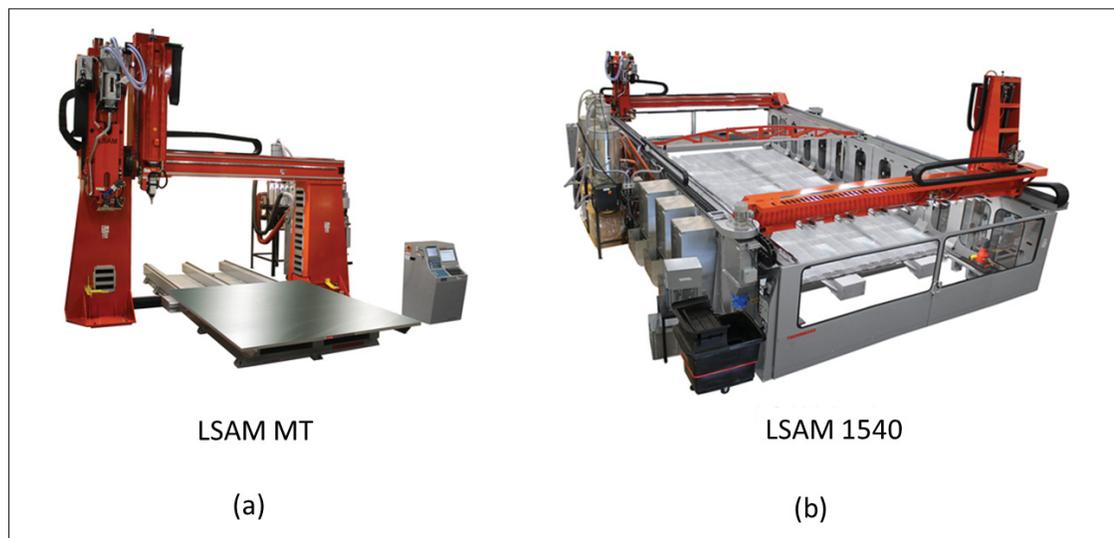


Figure 1.3 Différents modèles de machines LSAM, avec la LSAM MT (a) et la LSAM 1540 (b)
tirées de Thermwood (2022a)

1.1.3.2 Le système Masterprint d'Ingersoll machine tools

Ingersoll est une compagnie américaine, appartenant au groupe italien Camozzi, initialement spécialisée dans la fabrication de CNC, comme Thermwood. Ingersoll a commencé à travailler sur le placement automatique de fibres pour l'industrie des matériaux composites à partir des

années 90, avant de commencer à développer une expertise en fabrication additive en polymères renforcés à partir de 2015. Ingersoll a ainsi conçu le système d'impression de grandes dimensions, sous forme de portique, baptisé Masterprint avec ses modèles Masterprint 3X et Masterprint 5X (Figure 1.4). Ingersoll est connu du public grâce à l'impression d'une coque de bateau complète d'un seul morceau à l'université du Maine (USA) (Figure 1.5).

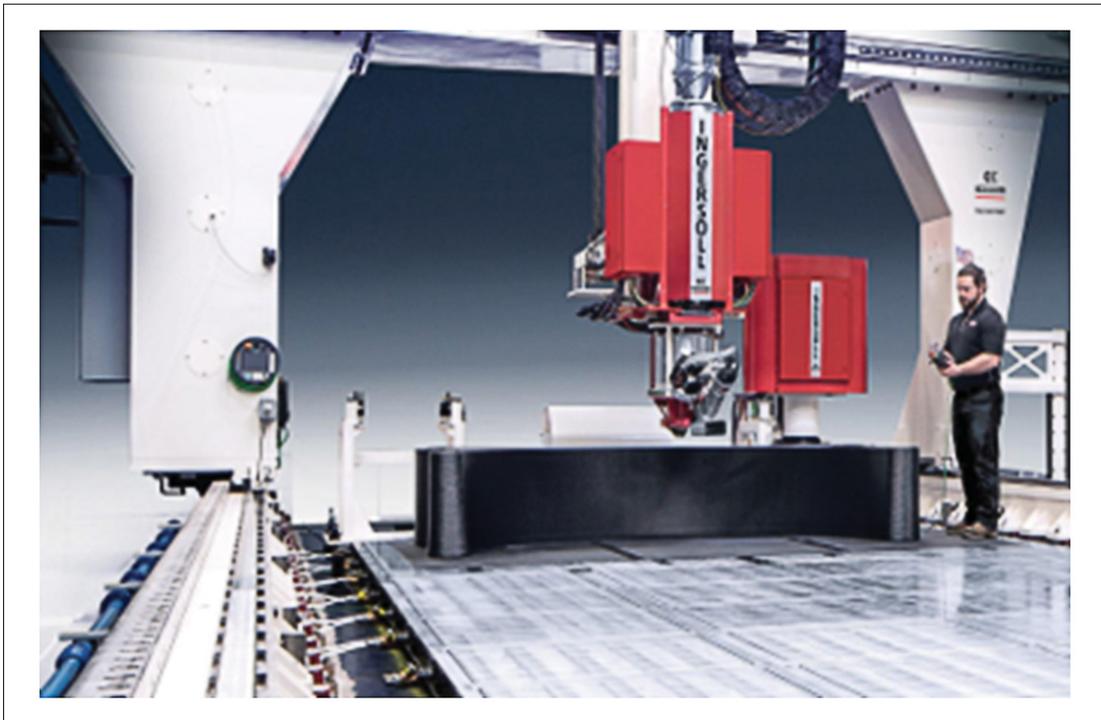


Figure 1.4 Modèle de machine Masterprint par Ingersoll
tirée de Camozzi (2022)

1.1.3.3 Le système AM flexbot de CEAD

La compagnie hollandaise CEAD Group a débuté son parcours dans l'impression de grandes dimensions en 2014 en développant sa tête d'extrusion qui s'installe sur des systèmes existants. Par la suite, CEAD a développé ses propres solutions "clés en main" basées sur des bras robotisés et des portiques en développant ses partenariats avec d'autres compagnies notamment avec Belotti SPA résultant du système BEAD utilisant une CNC couplée à une extrudeuse CEAD. La

solution robotisée AM Flexbot développée par la compagnie CEAD est détaillée à la section 2.2.1.

1.1.4 Comparaison entre les systèmes à portiques et les robots

Comme mentionné précédemment, deux types de solutions sont utilisés pour réaliser des systèmes de fabrication additives de grandes dimensions : des portiques et des bras robotisés. Ces deux types de solutions ont leurs avantages et inconvénients. Les compagnies développant des systèmes de fabrication additive de grandes dimensions se basent généralement sur leur domaine d'expertise pour concevoir leurs systèmes, ce qui explique parfois le choix de se tourner vers des systèmes de portiques ou vers des systèmes de bras robotisés.

Les différences majeures entre ces systèmes se trouvent au niveau de la flexibilité d'orientation de la tête d'impression, le chargement maximal de la machine, le volume d'impression, l'encombrement, la précision, la répétabilité ainsi que le prix d'achat et de maintenance. Les avantages et inconvénients de ces deux systèmes sont récapitulés dans le Tableau 1.1.

Tableau 1.1 Principaux avantages et inconvénients des systèmes d'impression avec bras robotisés et portiques

Comparaison robot cartésien (portiques) et bras articulés (5 axes et +)		
	Robot cartésien	Robot multi-axes
Déplacement	Déplacements linéaires avec les 3 axes XYZ (ajout de 2 degrés de libertés pour l'usinage en général)	Liberté et flexibilité d'orientation grâce au nombre élevé de degrés de liberté du robot
Accessibilité	Limité aux 3 axes XYZ du portique	Orientation et accessibilité élevé de la tête d'impression (XYZ et R1R2R3)
Chargement	Charges lourdes (possibilité d'extrudeuse très lourde avec débits élevés)	Charge limitée par la capacité du robot
Programmation machine	Simple car 3 axes linéaires	Difficile dû aux nombres de degrés de libertés et aux singularités
Utilisation	Simple	Possibilités de collisions entre les axes de la machines et de singularités
Coût	Élevé	Faible
Ratio espace de travail/encombrement	Élevé	Faible
Précision et répétabilité	Précision et répétabilité élevées grâce à la rigidité des systèmes (utile pour l'usinage uniquement)	Précision et répétabilité plus faible dû à l'augmentation du nombre d'axes et de la plus faible rigidité du système
Direction d'impression	Fixe à la verticale (+Z) ou 45° (sur la majorité des systèmes)	Libre (changements d'orientations au cours de l'impression)
Usinage	Haute précision (usinage 5 Axes en général (précision : orde du micromètre (Owen-Hill, 2019))	Précision plus faible dû à la faible rigidité du système (précision : ordre du dixième de millimètre)

1.1.5 Principaux logiciels de tranchage

En ce qui concerne le tranchage et la création du code-G permettant l'impression, il existe de nombreux logiciels, appelés "*slicers*", permettant le découpage et le codage du fichier requis pour l'impression. Les logiciels de tranchage sont les logiciels qui permettent, à partir du solide conçu, de trancher la pièce en couches et de créer le fichier de sortie que la machine d'impression va exécuter. Ce fichier est appelé code-G, il contient les positions des axes et les vitesses successives permettant de réaliser l'impression dans un langage simple utilisé par les machines outils. Dans le Tableau 1.2, se trouve une liste non-exhaustive de trancheurs industriels dédiés aux robots avec leurs avantages et inconvénients.

Tableau 1.2 Liste de logiciels industriels de tranchages destinés aux robots

logiciels - Compagnies	avantages	inconvénients
NX - Siemens (NX, 2023)	Parcours multi-axes Détection des collisions robot et pièce Simulation robot	Coûteux
Ai Sync - Ai Build (AiBuild, 2023)	Parcours multi-axes Détection des collisions robot et pièce Contrôle d'impression automatisé	Manque d'informations pour identifier les inconvénients
5 axis slicer - DotX (5AxisSlicer, 2022)	Parcours multi-axes	Pas de post-processeurs
Robotmaster (Robotmaster, 2022)	Supporte les axes extérieurs Parcours multi-axes Plan de parcours par régions Détection des collisions robot et pièce	Fanuc seulement
Adaxis - Evo 3D (Adaxis, 2022)	Large choix de robots Optimisation/automatisation des tâches Détection des collisions robot et pièce	Manque d'informations pour identifier les inconvénients
RobotStudio - ABB (Robotstudio, 2023)	Configuration automatique du robot Détection des collisions robot et pièce Optimisation des déplacements	ABB seulement
RobotDK (RoboDK, 2023)	Large choix de robot Détection des collisions robot et pièce	Pas de <i>slicer</i> code-G uniquement

1.1.6 Exemples d'applications de la fabrication additive de grandes dimensions

La fabrication additive grand format est de plus en plus convoitée et ce dans des secteurs variés. Le secteur des transports est particulièrement intéressé par l'impression de grandes dimensions que ce soit pour l'aéronautique, l'aérospatial, l'automobile ou le maritime. En effet cette technologie permet de fabriquer des pièces de grandes dimensions ou de l'outillage pour des usages uniques ou de productions de petites séries à des prix et délais relativement faibles. En 2019, l'université du Maine a ainsi imprimé une coque de bateau en une pièce de 7,6 mètres pesant 2300 kg, baptisée 3Dirigo, le tout en à peine plus de 3 jours (Figure 1.5). Cette coque de bateau a été imprimée grâce au système Masterprint acquis par l'université du Maine (University, 2019).



Figure 1.5 Coque de bateau imprimée à l'université du Maine (USA)
tirée de University (2019)

Dans le domaine de l'aéronautique, Thermwood a imprimé en partenariat avec Bell un moule de pale d'hélicoptère (Figure 1.6) de 6 mètres de long en 3h. Ce moule a été imprimé en une

seule pièce avec le Polyethersulfone (PESU) renforcé en fibres de carbone à 25% massique de TechmerPM, afin de pouvoir garantir l'étanchéité et la tenue mécanique lors du moulage en autoclave à 180°C sous 6,2 bars de pression (Thermwood, 2022c).



Figure 1.6 Moule d'une pale d'hélicoptère imprimé par Thermwood en collaboration avec Bell tirée de Thermwood (2022c)

Les secteurs de la construction et de la décoration sont eux aussi demandeurs de cette technologie. Thermwood a ainsi imprimé la torche du mémorial Al Davis au stade des Las Vegas Raiders (Figure 1.7) avec la LSAM 1020. Le défi de ce projet se situe au niveau de la tenue mécanique de la structure en raison des dimensions et de la masse très élevée d'une structure de ce type. Après différentes études de simulations des chargements, Thermwood a réalisé l'impression, l'usinage et l'assemblage des 225 morceaux de cette torche pesant 45 360 kilos et faisant 28,3 mètres de haut (Thermwood, 2022b).

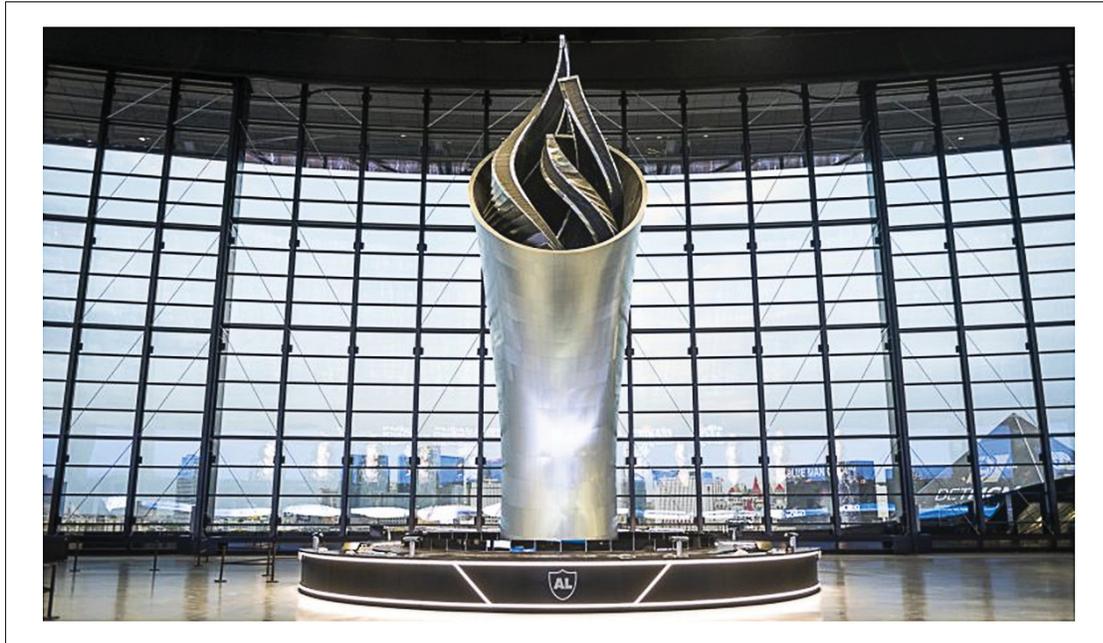


Figure 1.7 Structure de la torche du mémorial Al Davis tirée de Thermwood (2022b)

1.2 Caractérisation des polymères utilisés en fabrication additive de grandes dimensions

Cette section détaille différents principes qui caractérisent les polymères utilisés pour l'impression de grandes dimensions. Cette section traite du choix des polymères, de leurs propriétés mécaniques et physiques.

1.2.1 Choix des polymères pour l'impression de grandes dimensions

Le choix des polymères pour réaliser les pièces est particulièrement important afin de respecter les exigences mécaniques et dimensionnelles souhaitées à l'impression et à l'utilisation des pièces, notamment lorsque celles-ci sont de l'outillage pour du moulage de structures en matériaux composites.

Différents types de matériaux polymères sont disponibles pour l'impression de grandes dimensions. Tous ces polymères sont produits sous forme de granules (Figure 1.8) cylindriques ou sphériques faisant quelques millimètres.

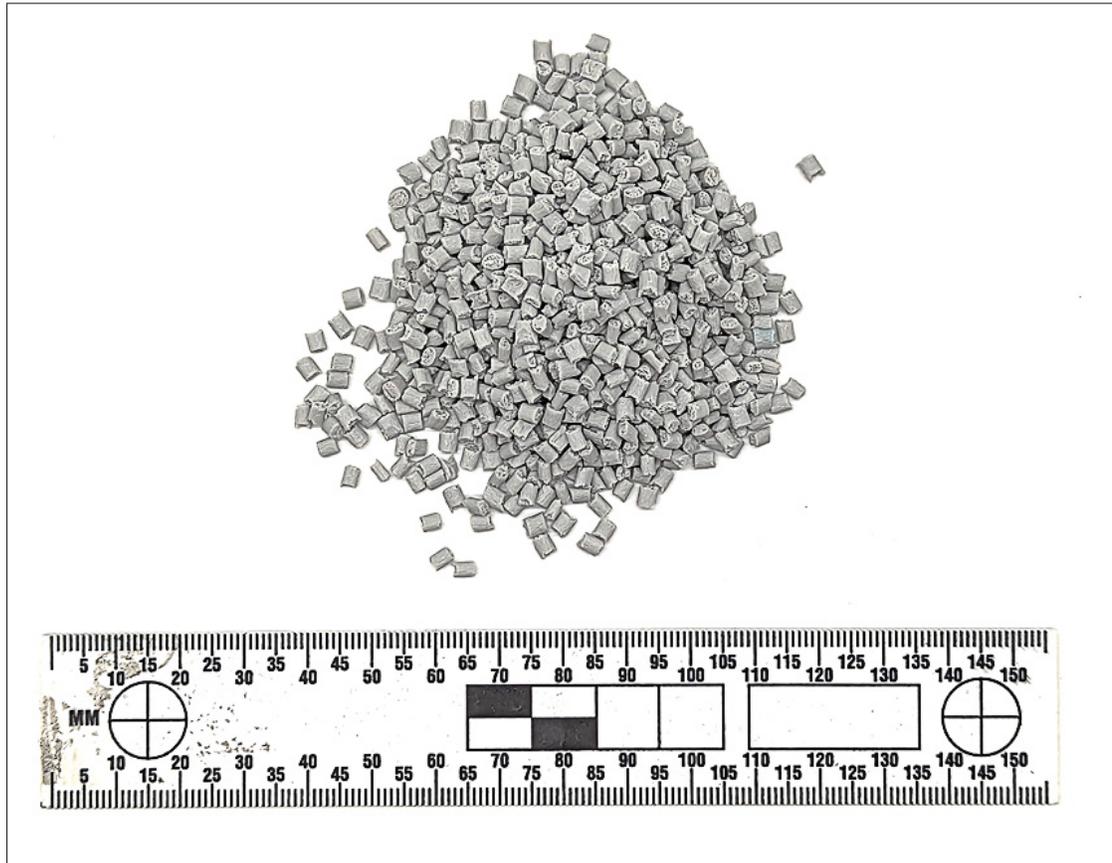


Figure 1.8 Exemple de granules de polymères utilisés pour l'impression, Post industrial PETG (PIPG) de Mitsubishi Chemical Group (MCPG)

Selon les fournisseurs de granules tels que Mitsubishi Chemical (MCPG) (Mitsubishi, 2022), Airtech (Airtech, 2022) ou TechmerPM (TechmerPM, 2022) différents polymères sont disponibles pour la fabrication additive de grandes dimensions. Une distinction est faite entre les polymères amorphes et semi-cristallins ainsi que les polymères avec ou sans renforts. La Figure 1.9 montre les différents polymères utilisables pour la fabrication additive en fonction de leur type et de leur domaine d'utilisation selon leur performance.

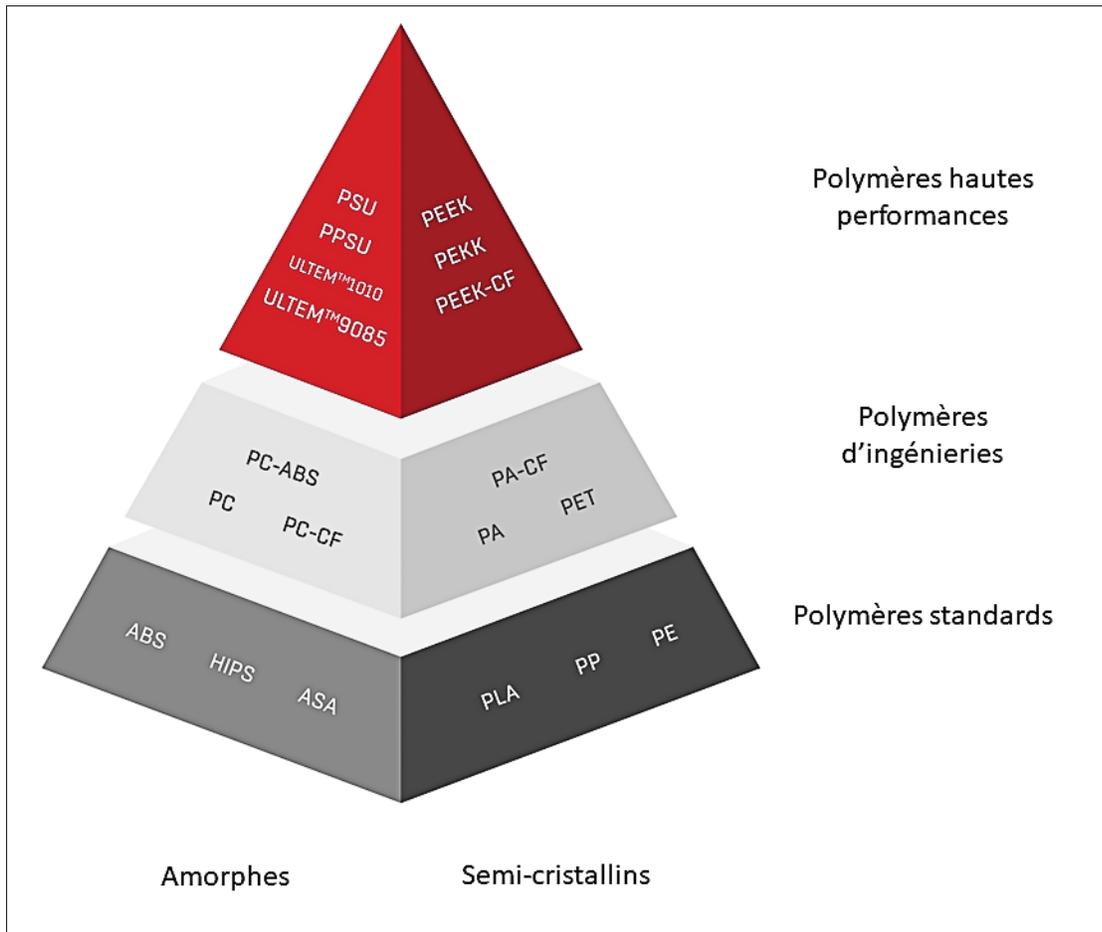


Figure 1.9 Pyramide des polymères utilisés pour l'impression 3D en fonction de leur type (amorphes et semi-cristallins) et leur performance thermo-mécanique adaptée de 3dgence (2022)

La Figure 1.9 montre les polymères classés selon leur degré de performance, plus le polymère est haut dans la pyramide plus ses performances thermo-mécaniques sont élevées. Cela joue bien entendu sur le prix des polymères qui varie de 5 \$/kg pour les polymères communs à environ 150 \$/kg pour les polymères hautes performances.

De plus, les polymères sont souvent disponibles avec des renforts, sous forme de fibres courtes de carbone ou de verre ayant une longueur de l'ordre de 500 μm selon Mortier (2022). Ces renforts peuvent être composés de fibres "neuves" ou recyclées comme le propose MCPP. Le Tableau 1.3 présente quelques fournisseurs de granules (liste non-exhaustives).

Tableau 1.3 Principaux polymères et fournisseurs de granules pour l'impression de grandes dimensions

Fournisseurs et polymères disponibles	
Fournisseur	Polymères
Mitsubishi Chemical (MCP3DP, 2023)	PIPG - PP - PLA - PETG - ASA - ABS - PC
Airtech (Airtech, 2023)	Dahltram® S-150CF (ABS) - Dahltram® C-250CF (PC) - Dahltram® C-250GF (PC) - Dahltram® I-350CF (PEI) - Dahltram® U-350CF (PESU)
TechmerPM (wpdev, 2021)	Electrafil PESU 1810 / Electrafil PSU 1701
Sabic (Sabic, 2023)	ABS - PPE/PPO - PC - PBT - PEI - PSU/PESU

1.2.2 Effet de l'orientation des fibres courtes sur les propriétés mécaniques des cordons

D'après Colón Quintana *et al.* (2022), lors de l'extrusion de la matière, les fibres contenues dans le polymère fondu ont tendance à s'aligner avec l'écoulement de celui-ci dans l'extrudeuse. Les fibres dans le cordon sont ainsi orientées dans le polymère en fonction de la direction d'impression comme le montre la Figure 1.10.

Selon Duty *et al.* (2017) et Hill *et al.* (2018), les renforts permettent d'augmenter la tenue mécanique ainsi que le coefficient d'expansion thermique du polymère extrudé (cordon). Le graphe Figure 1.11 montre l'influence du renfort en fibres courtes sur la rigidité du polymère. Selon Duty *et al.* (2017), l'ajout de 13% en masse de micro-fibres de carbone dans l'ABS extrudé augmente de 4 fois son module d'Young (passant de 2 GPa à 8 GPa) dans le sens de l'extrusion (l'axe des X). Toutefois, dans les sens transverses du cordon (axes Y et Z), le module

d'Young reste inchangé (Figure 1.11). Sur le même principe, la résistance à la traction augmente lorsque l'on ajoute des fibres courtes dans le polymère. L'orientation des fibres dans la direction d'impression est responsable de l'augmentation des propriétés mécaniques du cordon car les caractéristiques mécaniques de la fibre, qu'elles soient de verre ou de carbone, sont bien plus élevées que celles des polymères. Ainsi lorsqu'une certaine quantité de fibres est ajoutée au polymère, les propriétés du composite sont accrues. Par exemple, les fibres de verre et de carbone ont respectivement des modules d'Young de 86 GPa et 240 GPa tandis que les polymères ont des modules d'Young de l'ordre de quelques GPa. Le module du composite à fibres courtes alignées peut-être estimé selon les équations d'Halpin-Tsai (équations 1.1 à 1.3), les caractéristiques du matériau composite sont plus élevées que celle du polymère seul (équations tirées de (Yi, 2018) et de (Hsueh, 2000)).

$$\frac{E_c}{E_{matrice}} = \frac{1 + \xi\eta V_{fibre}}{1 - \eta V_{fibre}} \quad (1.1)$$

$$\eta = \frac{E_{fibre}/E_{matrice} - 1}{E_{fibre}/E_{matrice} + \xi} \quad (1.2)$$

$$\xi = \frac{2L}{D} \quad (1.3)$$

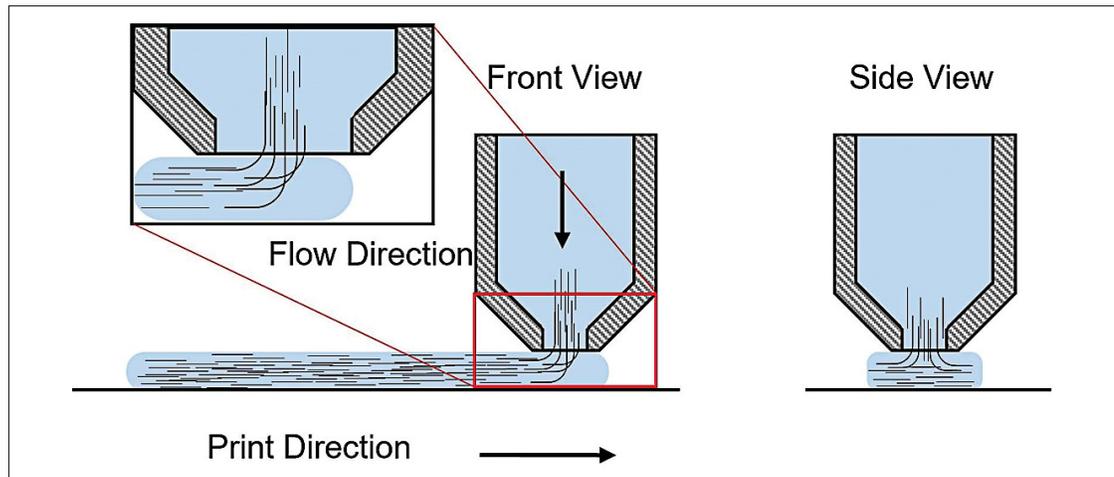


Figure 1.10 Orientation des fibres dans la direction d'impression lors de l'extrusion du polymère
tirée de (Colón Quintana *et al.*, 2022, p. 16)

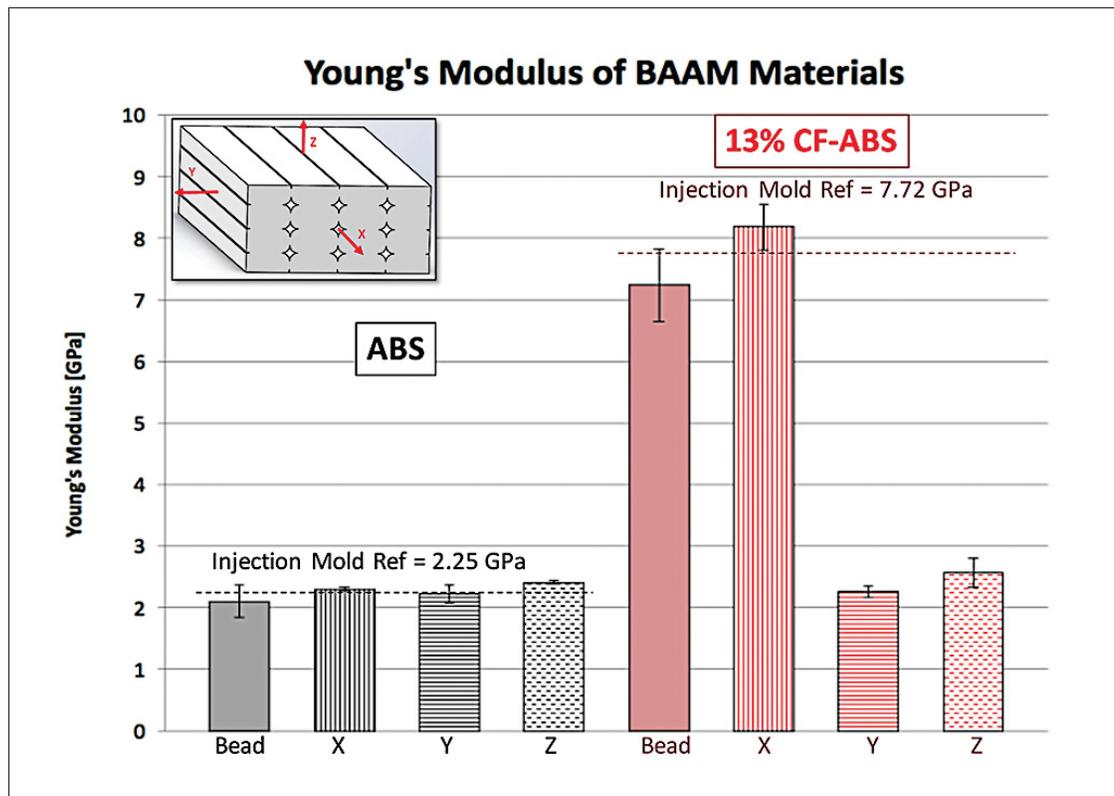


Figure 1.11 Comparaison du Module d'Young de L'ABS seul et l'ABS renforcé en fibres de carbone à 13% en masse selon l'orientation du chargement en X,Y et Z
tirée de (Duty *et al.*, 2017, p. 184)

1.2.3 Expansion thermique des cordons extrudés

L'utilisation de polymères renforcés en fibres (verre ou carbone majoritairement) pour l'impression de grandes dimensions impliquent une orientation des fibres courtes dans la direction d'extrusion, comme mentionné dans la section 1.2.2. Cet alignement des fibres dans la direction d'extrusion implique une anisotropie de l'expansion thermique (Hill *et al.*, 2018). En effet, dû à la différence du coefficient d'expansion thermique (CTE) entre le polymère et le renfort ($\alpha_{fibre} < \alpha_{polymere}$) et à l'orientation des fibres dans la direction d'extrusion, l'expansion thermique des cordons est plus faible dans cette direction que dans les directions orthogonales à celle-ci, comme le montre la Figure 1.12. De plus, les polymères possèdent une expansion importante. A titre d'exemple, le polymère Electrafil® PESU 1810 3DP de la compagnie Techmer PM, qui est un polymère destiné à imprimer des moules utilisés à des températures d'environ 180°C, a un coefficient de dilatation thermique $\alpha_1 = 11\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ dans la direction d'impression et $\alpha_2 = 97\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ dans la direction transversale. En comparaison, l'invar, qui est métal utilisé pour produire ce même type de moules, a une expansion thermique α_{invar} de $1,2 - 2\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$. Le caractère anisotropique du matériau imprimé implique ainsi un retrait et des distorsions importantes des outillages imprimés en comparaison des outillages usuels (voir Figure 1.16).

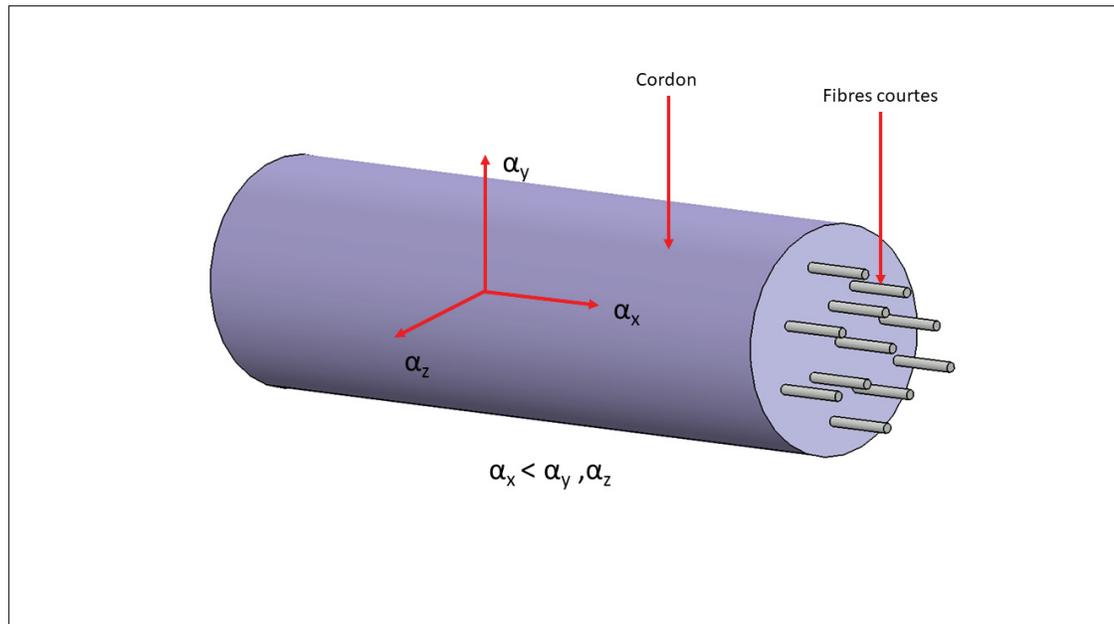


Figure 1.12 Caractère anisotrope de l'expansion thermique des cordons en fonction de l'orientation des fibres

1.2.4 Adhésion des couches entres elles

Le phénomène d'adhésion des cordons repose sur le principe de diffusion intermoléculaire entre les molécules des cordons voisins (Yin, Lu, Fu, Huang & Zheng, 2018). Le principe de liaison par diffusion entre molécules correspond à la formation d'une liaison intermoléculaire entre les chaînes de polymères de deux cordons adjacents par cicatrisation entre eux lors du contact (Figure 1.13). La liaison se forme grâce à l'enchevêtrement des chaînes polymériques, qui se produit à des températures supérieures à la température de fusion (T_f) du polymère pour les semi-cristallins et au-dessus de la température de transition vitreuse (T_g) pour les polymères amorphes. La liaison par enchevêtrement est entravée par la diminution de la température à l'interface des cordons dû aux phénomènes de transfert de chaleur par diffusion au reste de la pièce et par convection avec l'environnement alentour. Ce phénomène est largement décrit par les équations de transfert de chaleur utilisées dans les modèles de liaisons (Bellehumeur, Li, Sun & Gu, 2004). De plus, les polymères semi-cristallins débutent leur cristallisation juste

après avoir été déposé, la formation de cristaux à l'interface des cordons peut alors affecter les déplacements des chaînes de polymères et donc diminuer l'adhésion entre les couches. (Vaes & Van Puyvelde, 2021).

L'autre phénomène important concernant l'adhésion entre les couches est la pression appliquée entre les deux cordons lors de l'extrusion. En effet, la pression appliquée permet d'augmenter la qualité de l'interface entre les cordons évitant les porosités entre les ceux-ci.

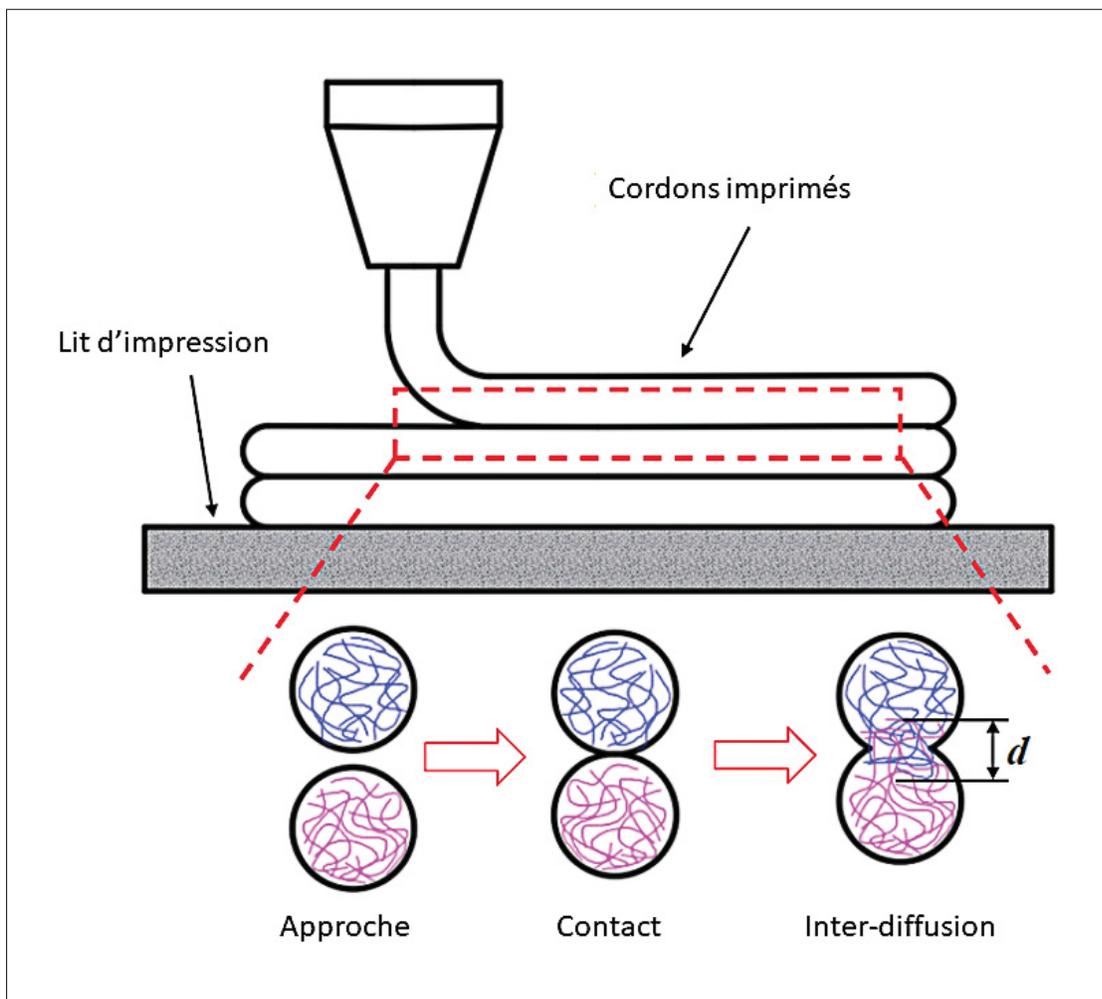


Figure 1.13 Formation des liaisons entre deux cordons : surfaces de contacts suivies par l'inter-diffusion des chaînes de polymères tirée de (Yin *et al.*, 2018, p. 13)

1.3 Différences de conceptions entre l'impression 3D usuelle et de grandes dimensions

La fabrication additive repose sur la fabrication par couches successives. Cependant, il existe des différences dans la manière de concevoir les pièces pour de l'impression 3D usuelle et pour de l'impression de grandes dimensions. Cette section résume ces différences de conception.

1.3.1 Remplissage et cordons continus

Lorsqu'une pièce est réalisée par fabrication additive, il y a deux parties distinctes, la peau qui correspond à la surface extérieure de la pièce et le remplissage qui correspond au volume compris à l'intérieur de la peau (Figure 1.16). Étant donné qu'il s'agit d'un procédé d'ajout de matière visant à limiter la quantité de matière utilisée, les pièces ne sont pas imprimées pleines. Un taux de remplissage est défini pour avoir une tenue mécanique qui convient aux exigences tout en minimisant la quantité de matière déposée.

Dans le cas de la fabrication additive classique, un pourcentage de remplissage et un motif de remplissage sont déterminés afin d'arriver à cet objectif (Figure 1.14). Selon Cincinatti (2019), dans le cas de l'impression de grandes dimensions, le parcours est tranché en fonction du contour de la pièce dessinée comme le montre la Figure 1.15 (b). De plus, Cincinatti (2019) mentionne qu'avec le logiciel de tranchage développé en interne, le parcours doit être continu, ce qui implique certaines conditions pour le CAD. En effet, il faut prévoir la bonne épaisseur pour réaliser un mur simple afin de pouvoir le bâtir avec un "aller-retour" et non un "aller" simple (Figure 1.15 (a)). Dans l'impression par extrusion de grandes dimensions, il est déconseillé de réaliser un remplissage de style quadrillage (Figure 1.14) sur de grandes pièces pour les raisons suivantes :

- Les cordons doivent être continus sur un parcours, ils ne peuvent se croiser les uns les autres sur une même couche, sans quoi ils se chevauchent l'un dans l'autre.
- Le seul moyen de créer un remplissage est d'avoir une pièce pleine, soit un remplissage de la pièce imprimée de 100%. Or pour des raisons de diffusion et d'expansions thermiques

cela n'est pas judicieux puisqu'il y a une accumulation de chaleur qui peine à s'évacuer de manière uniforme. Cela risque donc de créer des contraintes internes importantes.

- La dimension des pièces ne justifie pas un remplissage complet, car cela demanderait trop de matière et de temps de fabrication.

Le dimensionnement des renforts internes n'a pas encore fait l'oeuvre de recherche poussée. Cependant, il est possible de définir une approximation en s'appuyant sur les pièces déjà imprimées par les fournisseurs de machines. Selon les dimensions des cordons et de l'utilisation, les renforts ne sont pas espacés de la même longueur. Par exemple l'outillage de la pale de la Figure 1.6 a des renforts placés tous les mètres et les pièces imprimées sur le système BEAD de la figure 1.16 ont des espacements environ tous les 30cm à 50cm.

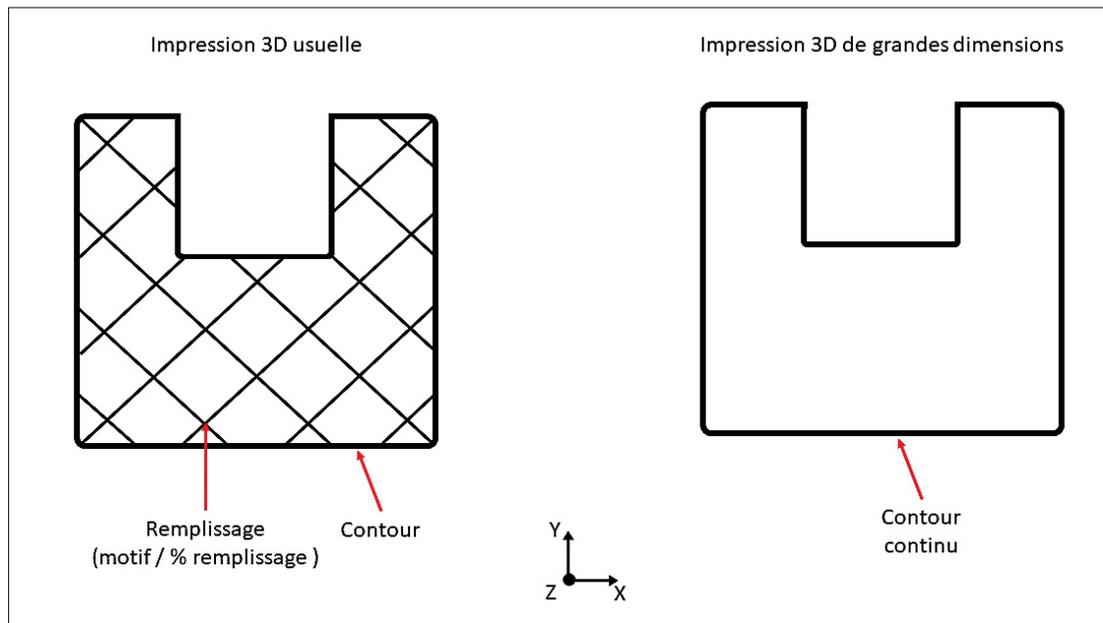


Figure 1.14 Différences entre le contour continu de la FA grandes dimensions et le remplissage de la FA usuelle

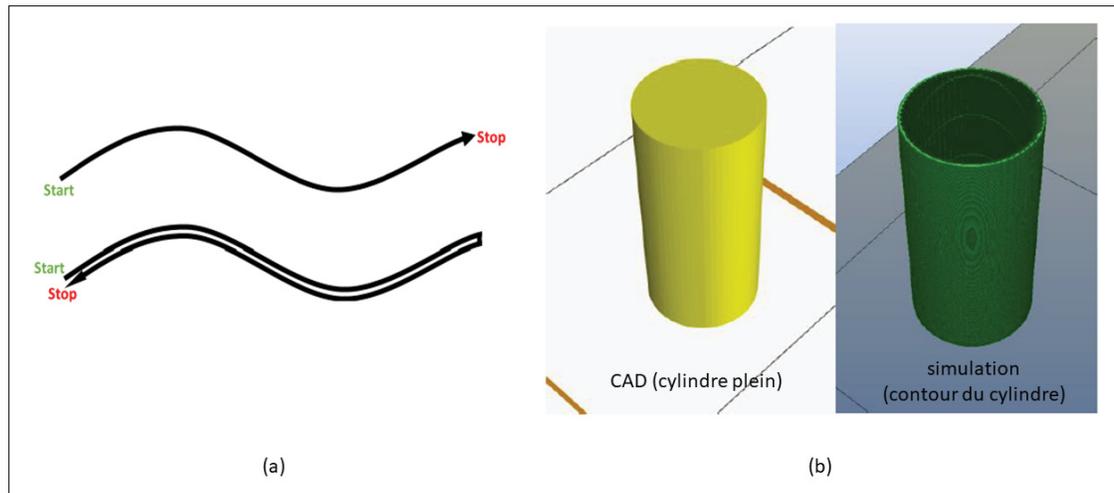


Figure 1.15 Parcours d'impression : parcours d'impression d'un mur simple (a), cylindre tranché en hélicoïdal (b) adaptées de (Cincinatti, 2019, p. 5)

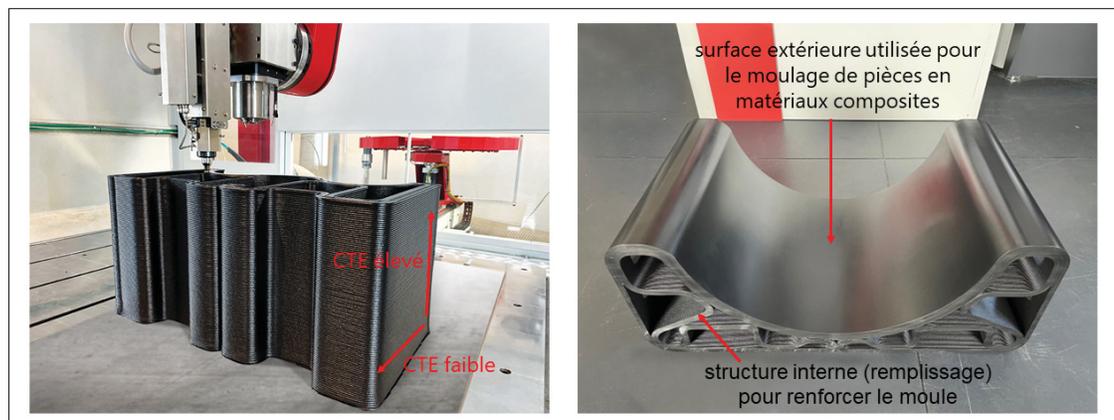


Figure 1.16 Espacement des renforts sur des outillages tirée de Belotti (2023)

1.3.2 Supports d'impression

La Figure 1.17 illustre un exemple d'impression 3D usuelle avec un angle de dévers supérieur à 45° , correspondant à la limite d'angle de dévers pour les procédés d'impression FDM. Cette géométrie requiert alors la présence de supports pour la maintenir la pièce durant son impression

et une fois complétée, ceux-ci sont retirés. Cincinatti (2019) souligne le fait que la notion de supports d'impression présente dans de nombreux procédés de fabrication additives usuels (tel que présenté sur la Figure 1.17) n'existe pas dans la fabrication additive de grandes dimensions. Il est donc nécessaire de prendre en compte le fait que l'angle de dévers est de maximum 45° lors de la conception et le tranchage d'une pièce pour l'impression de grandes dimensions. La Figure 1.18 présente le principe d'angle de dévers et montre un exemple de pièce s'étant effondrée à cause d'un angle de dévers trop important.

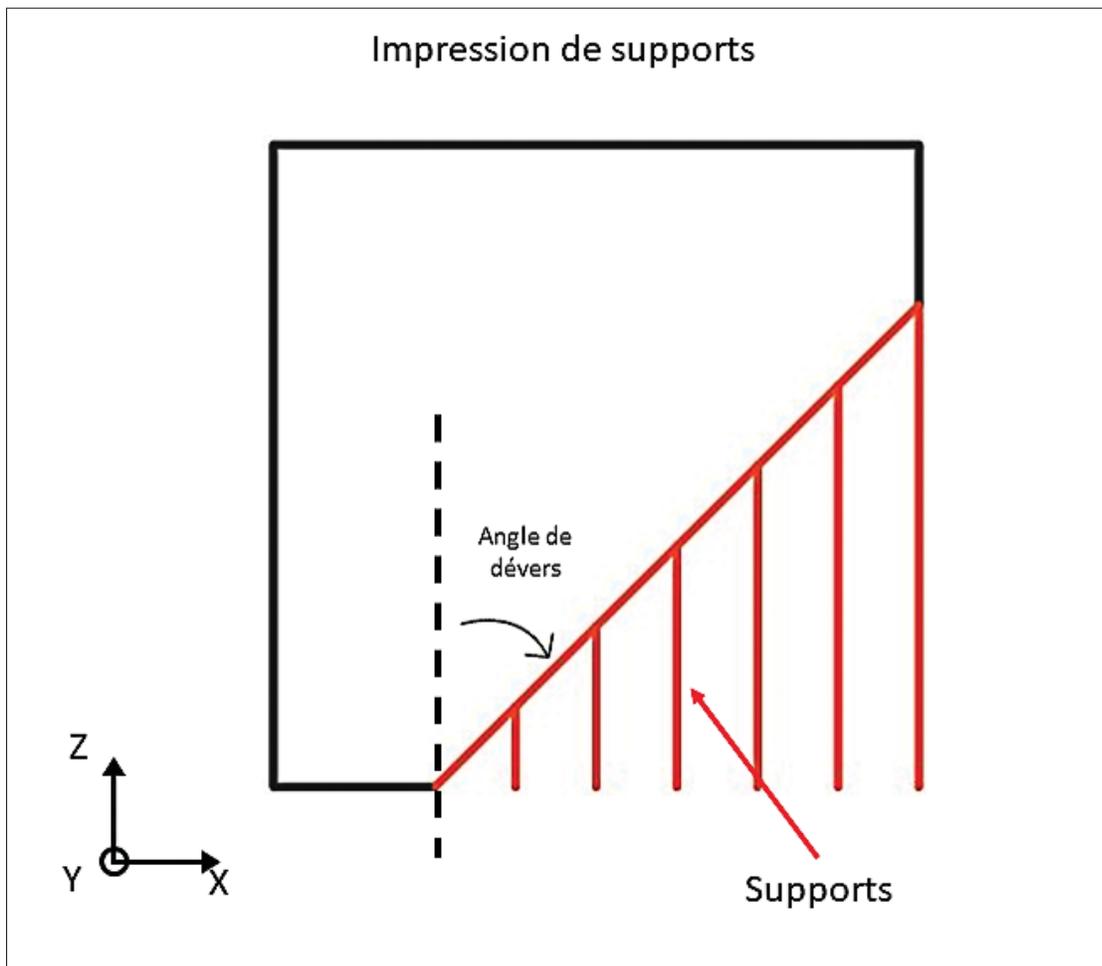


Figure 1.17 Schéma de supports d'une surface de pièce ayant un angle de dévers supérieur au maximum réalisable avec un procédé donné adapté de Hubs (2022)

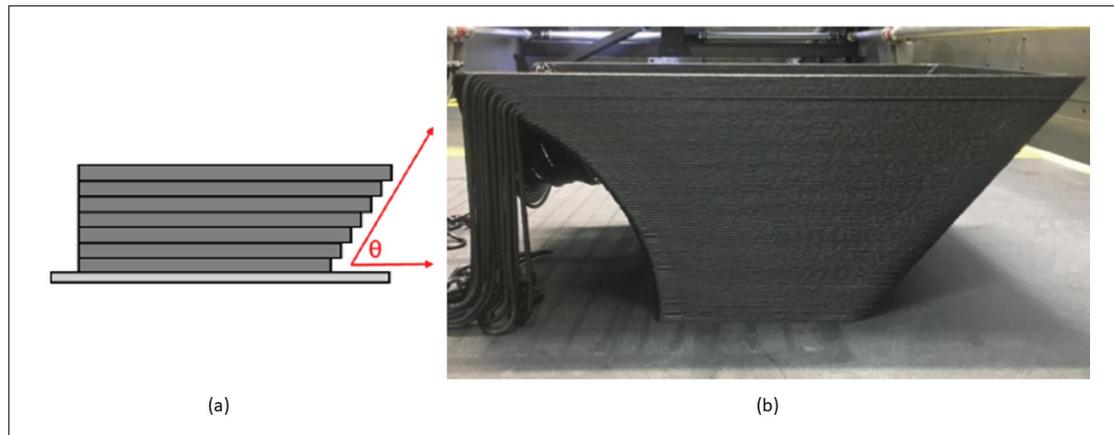


Figure 1.18 Angle de dévers de pièces en impression de grandes dimensions : angle de dévers (a), exemple de pièce effondrée (b) tirées de (Cincinatti, 2019, p. 6)

1.3.3 Dimensions des cordons

A titre d'exemple, une imprimante FDM industrielle Stratasys fortus 900 imprime des cordons d'une épaisseur maximale de 0,508 mm, tandis que le robot CEAD AM flexbot extrude des cordons allant jusqu'à 30mm d'épaisseur selon la buse utilisée. Par exemple, avec une buse de 18 mm de diamètre, le cordon peut aller jusqu'à 30mm de large par 10mm de haut. Quant au système BAAM (Big Area Additive Manufacturing) de Cincinatti, les cordons extrudés peuvent faire 12mm x 5 mm avec un débit de 36Kg/h selon Cincinatti (2019).

Les dimensions des pièces fabriquées, des cordons et le débit de matière sont ainsi des paramètres très différents de l'impression de petites dimensions. Les phénomènes d'expansion et de diffusion thermique prennent une ampleur beaucoup plus importante dans la fabrication additive de pièces faisant plusieurs mètres de long et plusieurs dizaines de kilos, ce qui provoque des instabilités dimensionnelles et du gauchissement importants.

1.3.4 Orientation d'impression

L'orientation d'impression est un paramètre qui est rarement présent dans l'impression classique. En effet, la direction d'impression est toujours verticale avec des systèmes à 3 axes de petites dimensions, que ce soit pour les technologies déposition fil fondu (FDM), stéréolithographie (SLA), fusion sur lit de poudre (SLS), etc. Dans le cas de l'impression de grandes dimensions, un robot multi-axes peut être utilisé et ainsi avoir des directions d'impression qui ne sont pas verticales. L'avantage majeur de pouvoir imprimer avec un angle et de pouvoir réaliser une surface d'impression à l'horizontale sans avoir besoin de supports, ce qui permet par exemple de fermer une boîte sur le dessus sans aucun support, comme le montre la Figure 1.19.

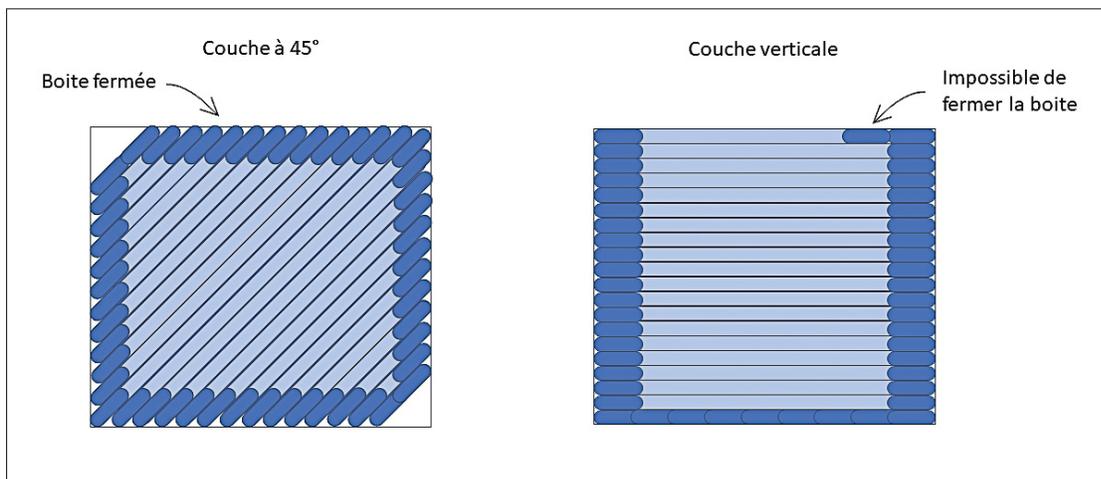


Figure 1.19 Différence de l'orientation d'impression à la verticale et à 45° sur un cube

1.3.5 Durée de couche

La durée de couche, aussi appelé *Layer time*, est la durée qu'il faut pour réaliser une couche complète. Cette couche peut être composée d'un ou plusieurs parcours, comme présentés à la section 3.1.1.

Contrairement à l'impression 3D de petites dimensions, la durée de couche est un paramètre majeur pour la fabrication additive de grandes dimensions. En effet, comme présentée à la section 1.2.4, la température est un paramètre clé pour obtenir une bonne liaison entre les cordons. Il est nécessaire que la température à l'interface entre deux cordons adjacents soit supérieure à la température de transition vitreuse pour un polymère amorphe ou supérieure à la température de fusion pour un polymère semi-cristallin pour que la diffusion intermoléculaire puisse se faire (Cincinatti, 2019). Si la durée entre les deux couches est trop longue, la température à l'interface est trop faible et les deux cordons n'adhèrent pas suffisamment l'un à l'autre et un délaminage des couches se produit (Cincinatti, 2019).

La durée maximale de couche dépend du matériau et des paramètres d'impression choisis. Par exemple, plusieurs cordons côte à côte ou un cordon épais refroidissent plus lentement qu'un seul cordon fin. Certains matériaux ont aussi tendance à refroidir plus rapidement en fonction de leur taux de renfort et du polymère choisi. Selon Cincinatti (2019), de l'ABS peut avoir une durée de couche maximale d'environ 15 minutes et avoir une bonne adhésion tandis que le Polysulfure de phénylène (PPS) ne peut pas avoir une durée de couche supérieure à 3 minutes.

En plus d'avoir une durée de couche maximale, il est aussi nécessaire de définir une durée de couche minimale. En effet, il faut que le cordon inférieur soit toujours chaud lorsque le suivant est déposé dessus, mais il faut qu'il ait refroidi afin d'être suffisamment rigide pour supporter la couche suivante sans quoi les cordons ne se solidifient pas et s'effondrent. A titre d'exemple, l'ABS a une durée de couche minimale d'environ une minute, mais cela peut varier en fonction de paramètres comme la dimension des cordons.

1.4 Finition et durabilité des moules imprimés

Les impressions de pièces de grandes dimensions pour des outillages doivent respecter les tolérances géométriques et mécaniques définies par l'industrie pour lequel elles sont fabriquées, que ce soit pour l'aérospatial, l'automobile ou toute autre industrie. La Figure 1.20 illustre l'effet du taux de déposition sur la résolution de l'impression. En effet, plus le cordon est fin plus la

résolution sera élevée, (Chesser *et al.*, 2019). Cependant cela diminue le taux de déposition et augmente le temps de fabrication car la vitesse d'impression est limitée. Ainsi il est nécessaire de trouver un compromis entre résolution d'impression et taux de déposition afin d'obtenir une résolution adaptée aux tolérances de la pièce tout en ayant un débit de matière acceptable pour ne pas trop allonger la durée de fabrication de la pièce.

Afin de concilier la résolution d'impression et le taux de déposition Chesser *et al.* (2019) met en place une impression avec une double résolution sur les couches. En effet pour améliorer la résolution, il est possible de réaliser un contour extérieur et un parcours intérieur avec des hauteurs différentes. Comme le montre la Figure 1.21, il est possible de réaliser le parcours intérieur avec une épaisseur élevée et un parcours extérieur avec une épaisseur faisant la moitié de l'épaisseur du parcours interne. Les épaisseurs plus minces du parcours externes permettent d'augmenter la résolution de la surface utile tout en conservant un taux de déposition important sur le parcours interne. Une buse avec deux orifices coaxiaux est requise, comme le montre la Figure 1.22, afin de passer très rapidement d'un diamètre de buse à l'autre.

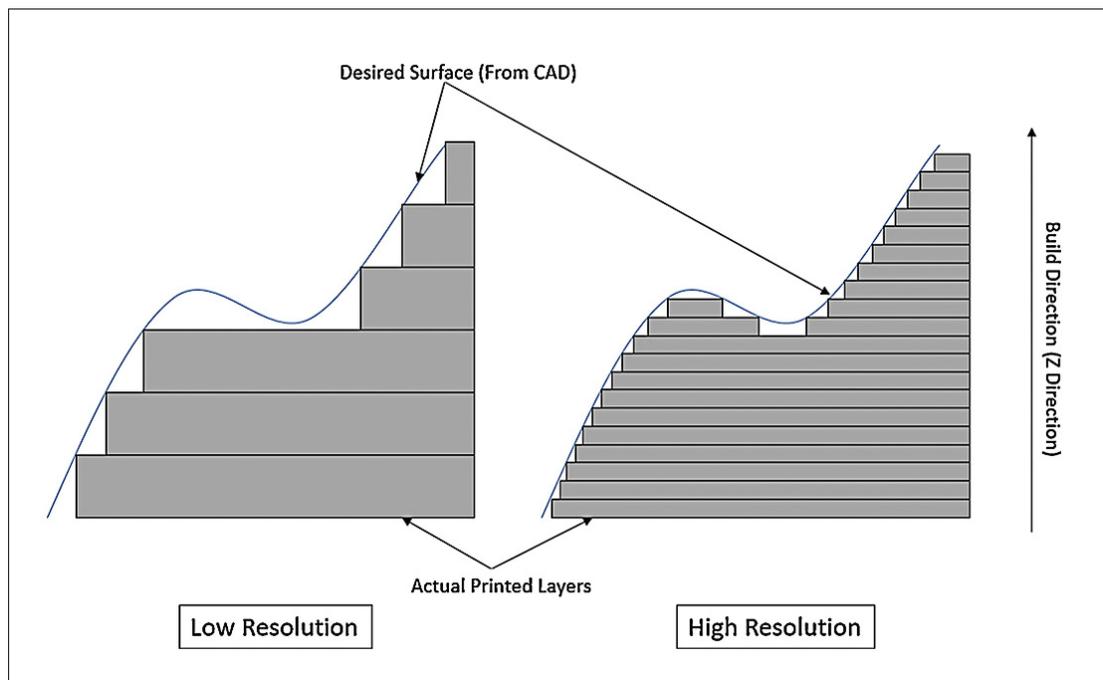


Figure 1.20 Effet de l'épaisseur des couches sur la résolution d'impression tirée de (Chesser *et al.*, 2019, p. 3)

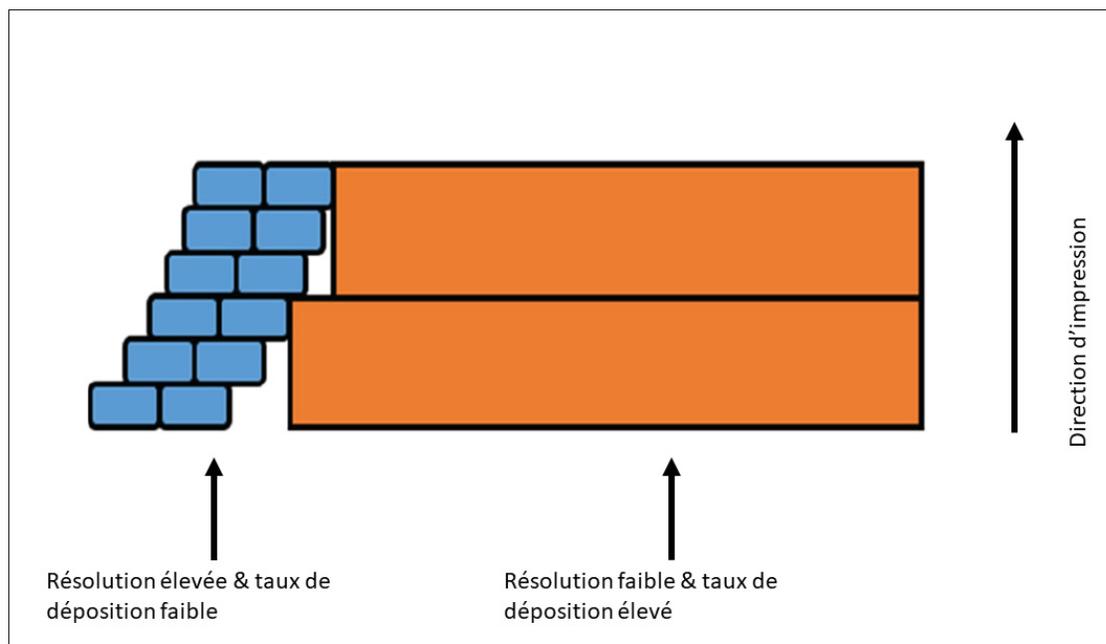


Figure 1.21 Schéma du principe d'impression à double résolution adapté de Chesser *et al.* (2019)

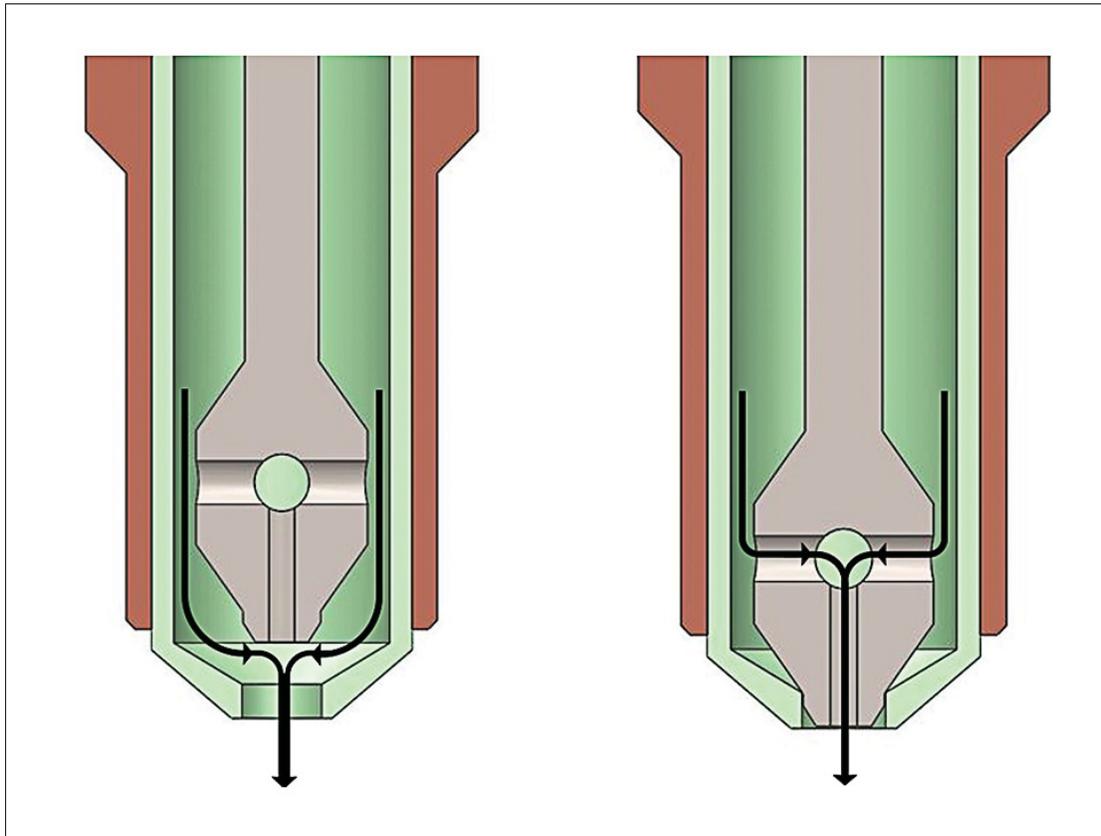


Figure 1.22 Buse à double sortie coaxiale de diamètres différents
tirée de (Chesser *et al.*, 2019, p. 2)

L'état de surface brut d'une pièce imprimée n'est pas adéquat pour l'utiliser tel quel et il est nécessaire d'usiner les surface utiles. Pour cela, il est nécessaire de calculer le surplus de matière à prévoir lors de l'impression. Selon Cincinatti (2019), pour obtenir de meilleur résultat, il faut ajouter une demi-épaisseur de cordon comme surplus d'usinage, comme présenté sur la Figure 1.23.

L'augmentation de la résolution permet d'obtenir une ébauche plus proche de la surface finale, de minimiser les opérations d'usinage et la quantité de matière extrudée. Une autre approche est de réaliser une ébauche avec de plus gros cordons et d'usiner en plusieurs opérations (ébauches et finitions) pour obtenir l'état de surface final, ce qui demande plus d'étapes de finition et consomme plus de matière. Selon Hassen *et al.* (2016), bien que l'impression de

grandes dimensions offre des taux de déposition élevé permettant de réaliser de l'outillage à moindre coût et dans un temps réduit, elle nécessite de réaliser un post-traitement des surfaces. Dépendamment des exigences, le post-traitement peut être juste de l'usinage de la surface utile ou de l'usinage, puis l'application d'un revêtement de finition. L'étude réalisée par Hassen *et al.* (2016) s'intéresse à la durabilité des surfaces et l'intégrité dimensionnelle d'un outillage imprimé après 10 moulages avec le procédé d'infusion en suivant le schéma suivant de la Figure 1.24.

Le moule réalisé pour l'étude est fait d'ABS renforcé à 20% massique de fibres de carbone et mesure environ 1m x 0,55m x 0,15m. Il est imprimé avec le système BAAM sur un lit chauffant à 110°C. Pour permettre le moulage sous vide, la surface du moule imprimée a été usinée et recouverte d'un revêtement de finition. Le revêtement de finition permet notamment de garantir l'étanchéité de la pièce et un fini de surface respectant les exigences de moulage. Une fois ces étapes réalisées, l'outillage a pu être utilisé pour mouler des pièces avec le procédé d'infusion. Les résultats obtenus grâce aux mesures réalisées par scan 3D de l'outillage après 10 utilisations montrent que les déviations moyennes sont de +0.029 mm / -0.031 mm.

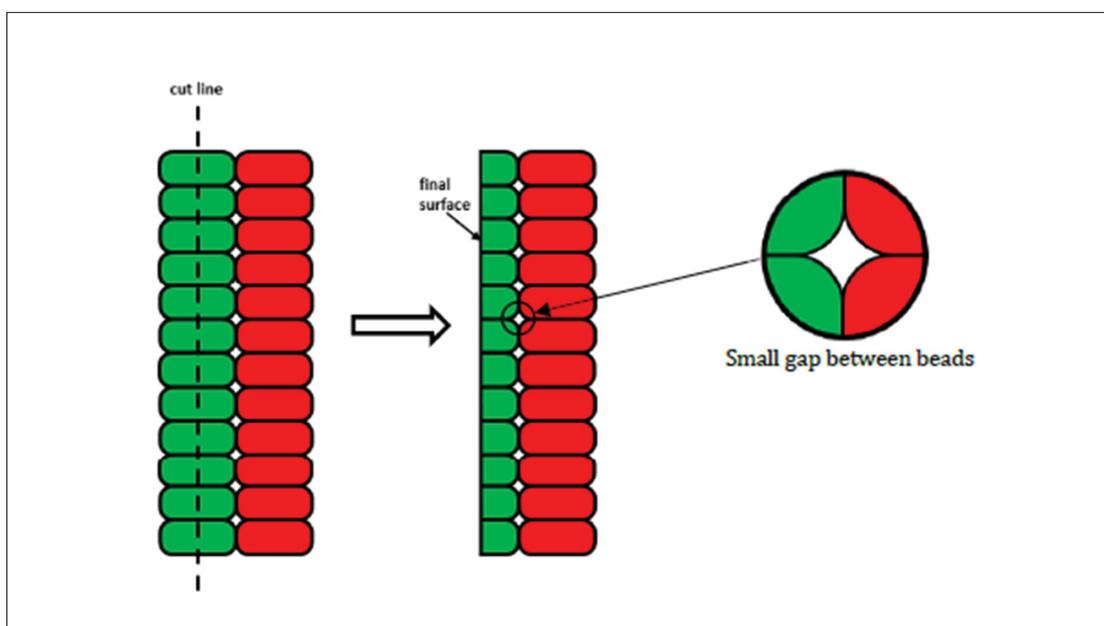


Figure 1.23 Surplus de matière pour l'usinage des surfaces utiles tirée de (Cincinatti, 2019, p. 10)

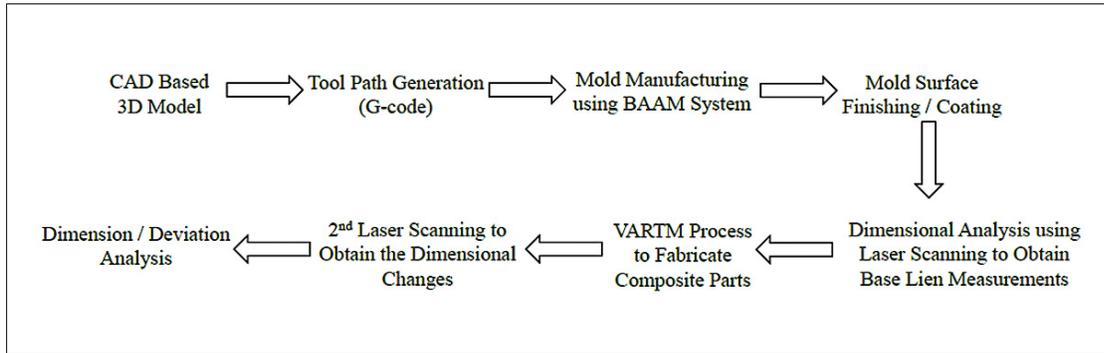


Figure 1.24 Graficet du processus d'expérience mis en place de la conception à l'analyse de la durabilité tirée de (Hassen *et al.*, 2016, p. 2)

CHAPITRE 2

OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

2.1 Objectifs du projet

L'objectif principal du projet est de maîtriser le procédé de fabrication additive grand format pour optimiser et rendre viable l'impression d'outillage destinés à la fabrication de pièces en matériaux composites. Pour atteindre cet objectif, le projet s'est articulé autour des sous-objectifs suivants, qui sont détaillés dans les sections 2.1.1 à 2.1.3 :

- Identifier les limites du procédé de fabrication additive de grandes dimensions en réalisant un outillage relativement grand imprimé à la verticale (section 2.1.1).
- Développer des méthodes de conception et d'impression permettant de répondre aux limitations liées au procédé, notamment en ce qui concerne l'angle de dévers (section 2.1.2).
- Démontrer la validité des méthodes développées permettant de rendre le procédé viable industriellement (section 2.1.3).

2.1.1 Identification des limites du procédé

Étant donné que la fabrication additive grand format est un procédé relativement récent, la revue de la littérature (section 1.3) ne donne qu'un bref aperçu des limitations de celui-ci. Dans le but d'étudier ces limites et d'en identifier de nouvelles, le premier objectif de ce projet était de choisir et d'imprimer une géométrie relativement grande et complexe ayant les caractéristiques suivantes :

- Avoir des angles de dévers qui frôlent 45° ou qui l'excède localement pour identifier les limites de dévers.
- Être de grandes dimensions et avoir une structure interne pour identifier les effets de retrait et de distorsions de la matière, ainsi que de la durée de couche sur l'adhésion de celles-ci.

2.1.2 Développement de méthodes de conceptions et d'impressions pour pallier aux limitations

Les limitations les plus restrictives se situent au niveau de la direction d'impression et des angles de dévers tel qu'expliqués aux sections 1.3.2 et 1.3.4. Dans le but de contourner ces limites, le second objectif du projet était de développer une nouvelle technique qui imprime des géométries avec des surfaces inclinées, autrement qu'en décalant les cordons les uns par rapport aux autres (technique standard, voir Figure 2.1 (a)). L'approche (l'hypothèse) pour générer cette inclinaison de surface était de faire varier les dimensions des cordons extrudés (impression non-planaire, voir figure 2.1 (b)). De plus, cette nouvelle technique d'impression non-planaire exploiterait la flexibilité d'un bras robotique multi-axes comparativement à l'utilisation d'un système portique-CNC (limité à 3 axes de déplacement).

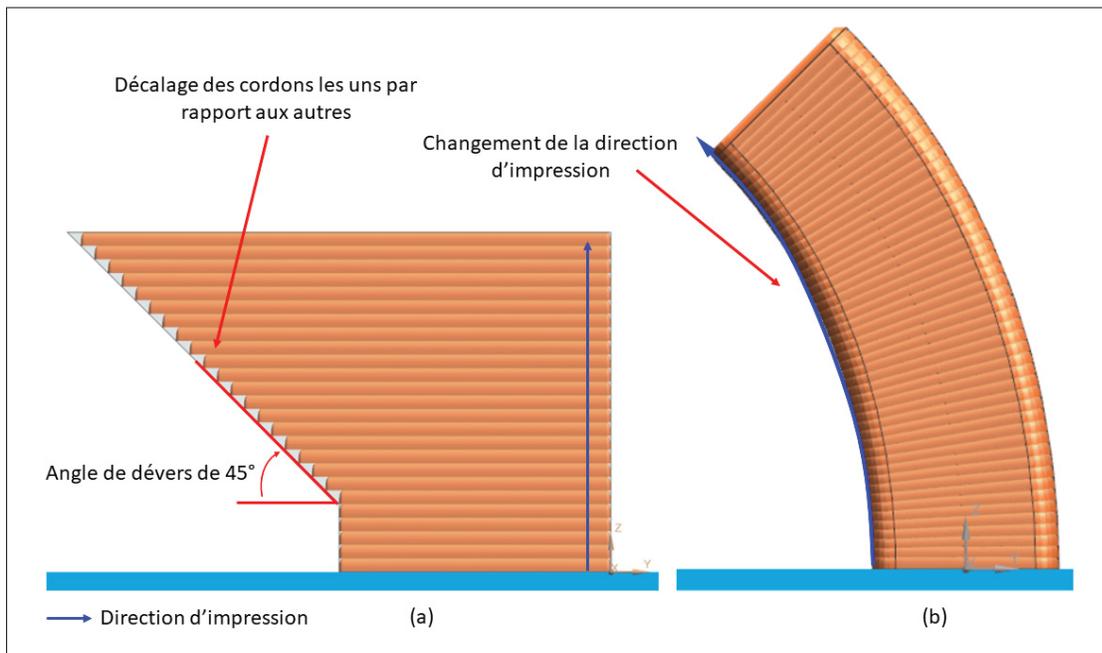


Figure 2.1 Schématisation de l'orientation d'une surface imprimée selon le type d'impression : (a) standard, (b) dynamique

2.1.3 Validation des méthodes développées pour rendre le procédé industriellement viable

Le dernier objectif de ce projet était de comparer la technique d'impression standard verticale à celle développée dans le cadre de ce projet, en imprimant un moule assez complexe. Le moule devait avoir des caractéristiques géométriques permettant de tester les limites d'impression standards (section 2.1.1), ainsi que de justifier l'utilisation des nouvelles techniques développées (section 2.1.2). Ainsi les deux versions de moules imprimés pouvaient être comparées en se basant sur des critères d'inspection qui ont été établis dans le cadre de ce projet. Il est à noter que le choix de la géométrie du moule a été fait en collaboration avec un partenaire industriel. L'objectif du partenaire était d'imprimer un moule déjà existant (non imprimé, mais laminé) pour comparer la qualité de moulage de pièces en matériaux composites. À noter que seulement les étapes de conception et d'impression des moules ont été réalisés dans le cadre de ce projet. Les essais de moulage seront réalisés ultérieurement au projet.

2.2 Équipements et matériaux

Cette section présente l'équipement d'impression de grandes dimensions installé à l'ÉTS avec ses forces et ses faiblesses, les types de granules utilisés lors du projet, ainsi que l'équipement permettant d'évaluer les résultats obtenus.

2.2.1 Description de la cellule robotique AM Flexbot de CEAD

L'ÉTS a fait l'acquisition d'une cellule d'impression de grandes dimensions qui a été installée au début de l'année 2022. Celle-ci est composée du système AM flexbot de la compagnie CEAD Group (Pays-bas) présentée à la Figure 2.2.

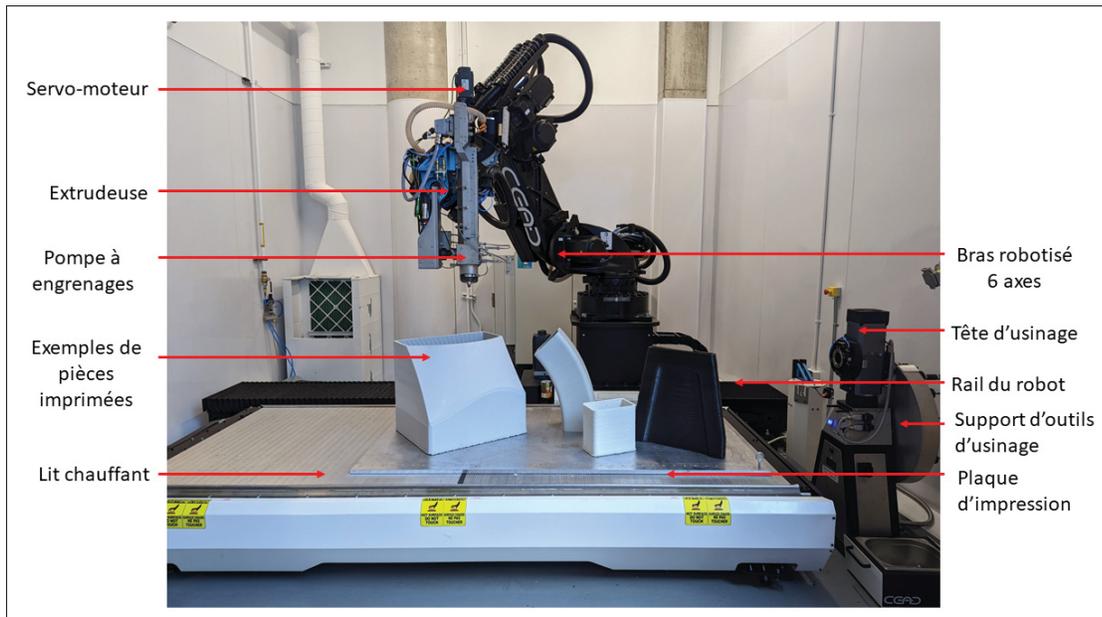


Figure 2.2 Cellule robotique AM Flexbot de l'ÉTS

La cellule robotique est composée d'un robot 6 axes ayant une charge maximale de 130 kg et monté sur un rail. Le bras robotisé peut accueillir une extrudeuse à granules et/ou une tête d'usinage. L'extrudeuse à granules est composée d'une vis sans fin d'un diamètre de 25 mm entraînée par un servo-moteur et un réducteur à engrenages délivrant un couple maximal de 96 N.m, ainsi qu'une vitesse de rotation maximale de 100 RPM permettant d'extruder jusqu'à 12kg/h. Ce modèle d'extrudeuse est le modèle le plus petit fabriqué par CEAD. Il possède un débit limité, notamment lorsqu'il est nécessaire d'extruder de grosses quantités de matière demandant beaucoup de couple et de vitesse de rotation tout en ayant une vitesse de déplacement de l'extrudeuse élevée. L'extrudeuse à granules est munie d'un système de chauffe divisé en 5 zones permettant de chauffer progressivement le polymère jusqu'à une température maximale de 400°C. L'extrusion du polymère est gérée par une pompe à engrenages située entre la vis sans fin et la buse. Cette pompe à engrenages gère adéquatement le débit de matière, que ce soit pour les arrêts et départs de cordons ainsi que pour la gestion du débit au cours de l'impression, tandis que la vis sans fin applique la pression en entrée de la pompe. La pression maximale de l'extrudeuse est limitée par des fusibles remplaçables qui s'enclenchent à 240 bars évitant ainsi

les bris de machines. Les cordons ainsi extrudés peuvent varier de 3mm x 0,5mm à 30mm x 9mm (Largeur x épaisseur) pour des buses allant de 2 à 18 mm de diamètre. Une petite trémie placée à l'extrémité de la vis sans fin permet d'alimenter l'extrudeuse par gravité. Cela peut alors poser problème lorsque l'extrudeuse n'est plus à la verticale. Le lit d'impression de 3000 mm x 1200 mm est chauffant (jusqu'à 100°C) et strié, ce qui permet à la pièce imprimée d'y être fixée solidement. Le lit peut supporter une charge de 650kg.

Une tête d'usinage peut aussi être montée sur le bras du robot. Cette tête d'usinage possède une vitesse de rotation maximale de 20 000 RPM. Le porte outil rotatif peut contenir 16 outils qui sont interchangeables automatiquement sur la tête d'usinage.

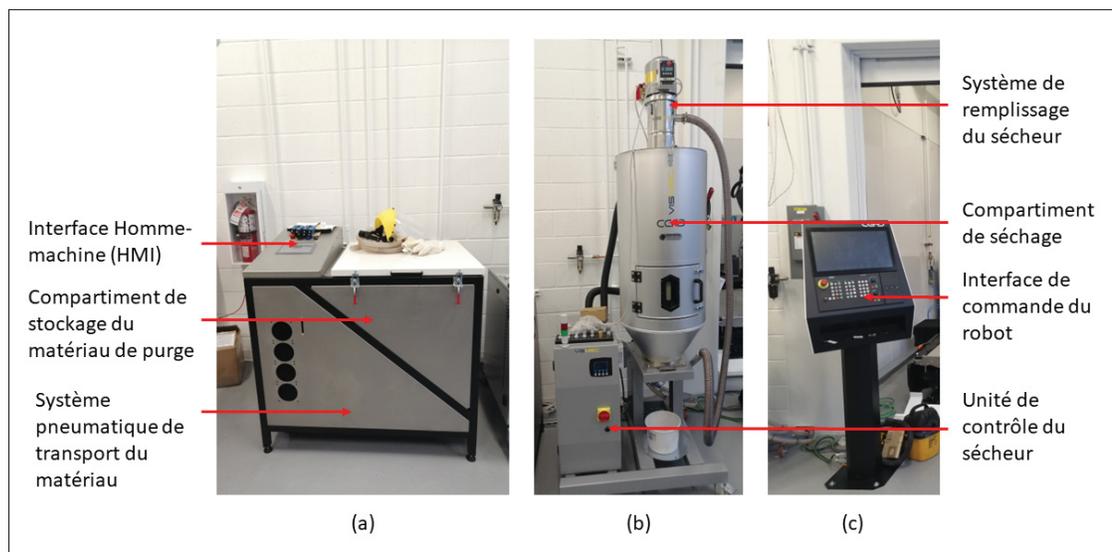


Figure 2.3 Unité de commande de la cellule CEAD : unité de base (a) , unité de séchage (b) et unité de contrôle (HMI) (c)

L'autre partie de la cellule robotique est composée des organes de commandes permettant l'utilisation du robot tel que montré à la Figure 2.3. La Figure 2.3 (a) présente l'unité principale de commande. Elle est composée du système de commande de l'extrudeuse, qui contrôle le chauffage de l'extrudeuse et du lit, les servo-moteurs de la vis sans fin et de la pompe à engrenages, le système de refroidissement de l'extrudeuse, ainsi que le système pneumatique servant au transport des granules. Une interface Homme-machine simplifiée (HMI) permet

d'afficher ces informations. Un compartiment de stockage de matériau d'environ 50kg est présent dans cette unité. Il permet de stocker le polymère de purge (HDPE) qui ne nécessite pas d'être séché.

La Figure 2.3 (b) présente le système de séchage avec un silo de 100L pouvant sécher en continu à une température comprise entre 50 et 185°C. Le système fonctionne avec de l'air chaud ayant un débit de 20-25 m^3/h permettant ainsi de sécher toutes les granules de polymères que l'on peut trouver sur le marché.

La Figure 2.3 (c) présente l'unité de contrôle principale (HMI) permettant à l'utilisateur d'interagir avec l'ensemble des paramètres de la cellule. Cette interface permet de gérer tous les paramètres du robot que ce soit le réglage des températures du lit et de l'extrudeuse, les déplacements manuels du robot, la gestion des programmes d'impression et d'usinage. Cette interface permet aussi d'avoir les graphes en temps réel d'informations telles que la pression de l'extrudeuse, la vitesse et le couple du servo-moteur de la vis sans fin, les températures des 5 zones de l'extrudeuse, etc.

2.2.2 Principe de fonctionnement de cellule robotique AM Flexbot

Afin de réaliser une pièce avec la cellule d'impression AM Flexbot de CEAD, plusieurs étapes clés sont nécessaires (illustrées sur la figure 2.4) :

1. Concevoir le CAD de la pièce en adaptant le design au procédé de fabrication additive. L'utilisation de la suite Siemens NX est conseillée afin d'utiliser le même logiciel du début à la fin pour plus de fluidité dans le flux de travail (Figure 2.4 (1)).
2. Placer la pièce dans l'environnement CEAD sur le logiciel NX (Figure 2.4 (2)).
3. Créer le ou les parcours d'impression avec les paramètres souhaités (Figure 2.4 (2)). L'opérateur fait à cette étape tous les choix d'impression tels que le type de buse, la dimension des cordons, le type d'impression (hélicoïdal, couche par couche, avec un angle etc.) et le type d'entrée et sortie pour chaque couche. Cette étape est la plus cruciale, elle est responsable du bon déroulement de l'impression par la suite.

4. Placer le robot de sorte à ce qu'il soit en mesure de réaliser l'impression en s'assurant qu'il n'y a pas de collisions, de limites d'axes atteintes ou bien de singularité des axes (Figure 2.4(2)).
5. Post-processer et exporter le parcours créer pour l'impression (Figure 2.4 (2)).
6. Réaliser l'impression (Figure 2.4 (3)).
7. Réaliser l'usinage (Figure 2.4 (4)).

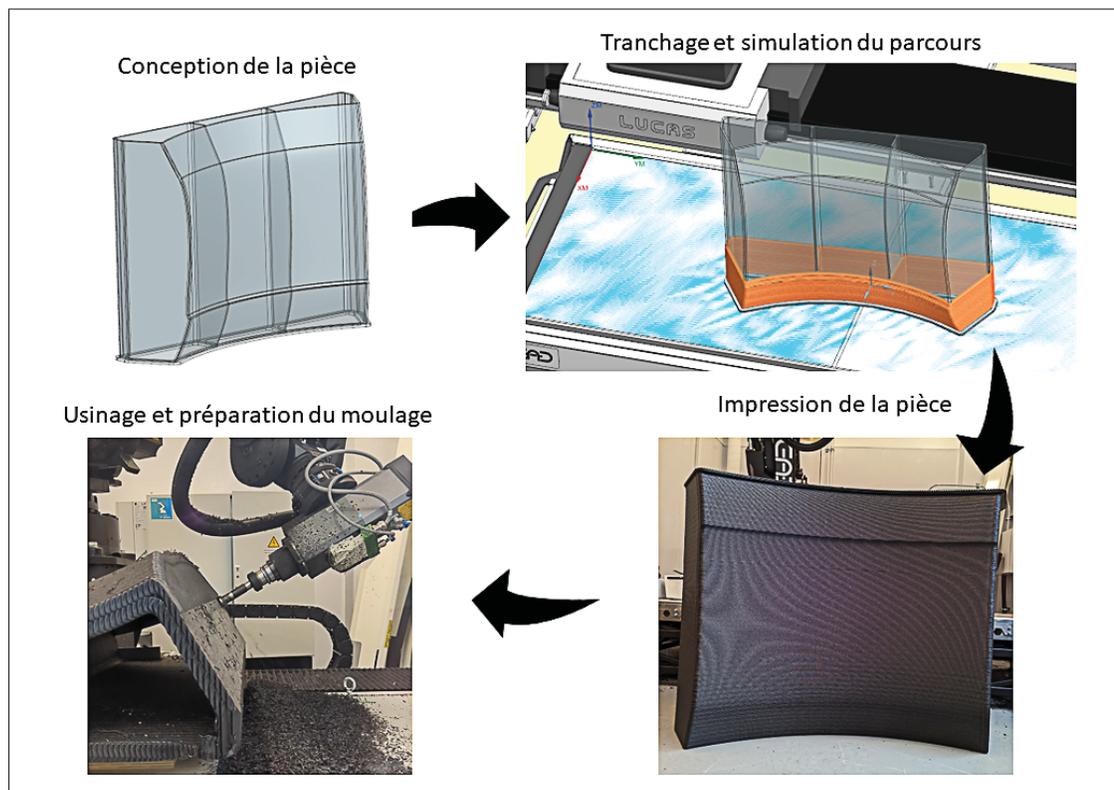


Figure 2.4 Étapes majeures du processus d'impression 3D avec le robot AM Flexbot et l'environnement Siemens NX

2.2.3 Règles de conception CEAD

La société CEAD, qui a développé le robot utilisé pour imprimer les différents outillages, a mis en place des règles de base de conception récapitulées dans le tableau 2.1 et aux Figures 2.5 et 2.6 :

Tableau 2.1 Règles de conception mises en place par CEAD

Règles de conception pour l'impression avec le robot AM FLEXBOT :	
1	Réaliser un parcours continu
2	Éviter au maximum les doubles cordons
3	Avoir un angle de dévers maximal de +/-45° par rapport à la direction d'impression
4	Ne pas avoir un profil de surface montant et descendant lors d'impression à 45°
5	Éviter les impressions nécessitant une structure interne discontinue
6	Éviter les ponts (Figure 2.6)
7	Réaliser des congés adaptés à la buse

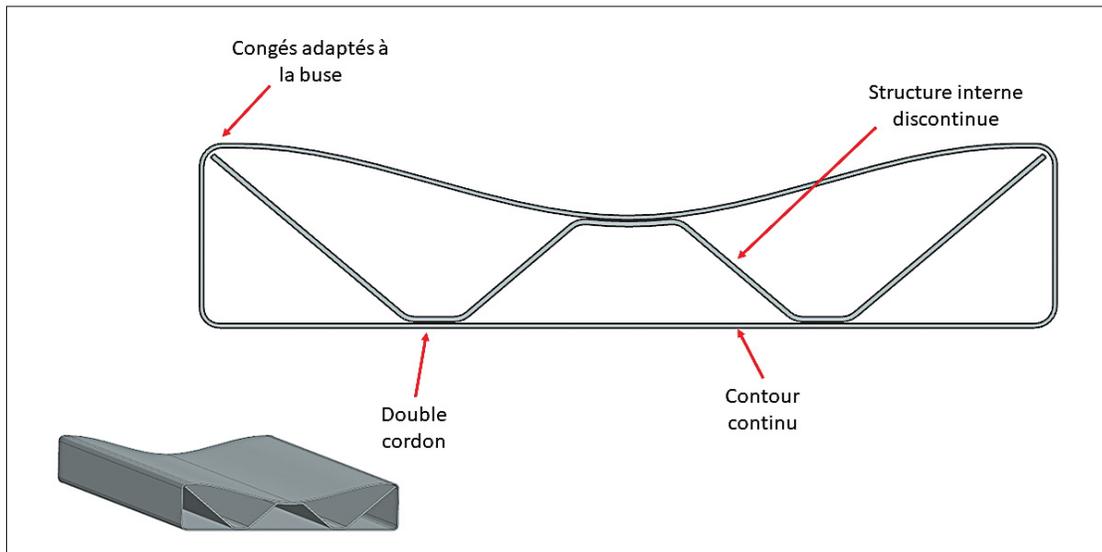


Figure 2.5 Schéma des règles de design expliquées sur une pièce

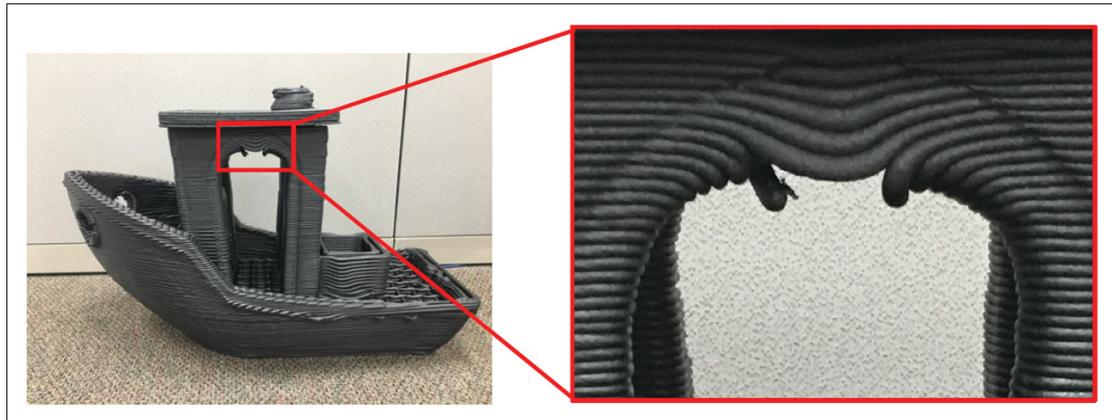


Figure 2.6 Exemple de pont à éviter
tirée de (Cincinatti, 2019, p. 7)

Le parcours continu vient du fait que l'extrudeuse initiale de CEAD était munie uniquement d'une vis sans fin pour gérer l'extrusion de la matière, ne permettant pas de couper le débit facilement (puisque même lorsque la vis s'arrête de tourner, la pression exercée sur le polymère demeure et celui-ci continue de sortir). De ce fait, CEAD a pris l'habitude de concevoir des pièces dont le parcours d'impression est continu pour pallier à ce problème en réalisant le moins d'arrêts possibles.

L'impossibilité d'avoir un profil de pièce qui soit montant et descendant, comme expliqué à la section 4.1, rend très complexe beaucoup de géométries d'outillages ayant une forme convexe ou concave. Il est alors souvent nécessaire de revoir toute la conception et l'orientation d'une pièce pour pouvoir l'imprimer.

Il est important d'éviter les points chauds afin d'obtenir un refroidissement homogène et c'est pourquoi il est préférable d'éviter au maximum les doubles cordons selon CEAD. Cela permet d'éviter d'avoir des zones beaucoup plus épaisses qui sont plus lente à refroidir qu'un cordon simple, ce qui crée des contraintes et du gauchissement dans la pièce. Un exemple d'une utilisation adéquate du double cordon est présenté à la section 3.1.1.

2.2.4 Description des granules utilisées dans le cadre de ce projet

Dans le cadre de ce projet, différents polymères sont utilisés :

- Le PIPG fourni par MCCP est un PETG recyclé avec 30% massique de fibres de verre (fiche technique à l'Annexe II, Figure-A II-1). Il s'agit d'un polymère facile à imprimer car il a une bonne adhésion des couches, une durée de couche maximale relativement longue et un bon état de surface une fois imprimé. Ce polymère est utilisé pour les impressions validant les méthodes du chapitre 4.
- Le VYTEEN PCGF20 fourni par Lavergne est un polycarbonate (PC) recyclé renforcé avec 20% massique de fibre de verre initialement destiné à l'injection (fiche technique à l'Annexe II, Figures-A II-2 et Figure-A II-3). Il s'agit du polymère utilisé pour l'outillage présenté au chapitre 3. Ce polymère a été choisi pour ses propriétés thermo-mécaniques lui permettant d'être utilisé pour mouler des pièces à des températures allant jusqu'à 120°C. De plus, son coût abordable permet de faire des tests d'impressions à moindre frais.
- Le Dahltram® C-250CF fourni par Airtech est un Polycarbonate renforcé avec 20% massique de fibre de carbone destiné à l'impression d'outillage pour des pièces moulées jusqu'à 120° (fiche technique à l'Annexe II, Figures-A II-4). Ce polymère a des caractéristiques thermo-mécaniques plus élevées que les deux précédents et est utilisé pour les outillages présentés au chapitre 5.

2.2.5 Équipement d'inspection et de caractérisation des pièces imprimées

Afin d'évaluer la précision des pièces imprimées, un scanner est utilisé. Dans le cas présent, il s'agit du bras de mesure, par scan laser "Absolute Arm" fourni par la compagnie Hexagon (Figure 2.7). Ce système de mesure possède un scan mesurant jusqu'à 1,2 millions de points/sec et ayant une précision de 43 μ m selon la documentation technique du fournisseur. L'acquisition et le traitement des données sont effectués avec le Logiciel Polyworks 2021. Cet équipement de métrologie portatif permet ainsi de définir rapidement si une pièce imprimée et/ou usinée est

conforme aux tolérances géométriques requises grâce à l'acquisition et au traitement de données au sein du même logiciel.



Figure 2.7 Bras de mesure par scan laser Absolute Arm, Hexagon

2.3 Méthodologie

Cette section présente la méthodologie mise en place pour répondre aux différents objectifs mentionnés à la section 2.1. Les résultats et plans expérimentaux des trois méthodologies résumées dans les sections 2.3.1 à 2.3.3 sont, respectivement, présentés dans les sections 3, 4 et 5.

2.3.1 Impression à la verticale d'un grand moule pour identifier les limites du procédé

Les caractéristiques géométriques requises pour l'étude des limitations du procédé (listées dans la section 2.1.1) se retrouvent dans l'outillage pour mouler le diffuseur de la voiture éolienne fabriquée par le club étudiant Chinook de l'ÉTS Montréal (Figure 2.8). Cet outillage est composé de deux parties (Figure 2.9), un intrados et un extrados, tous deux circulaires. Le moule a un diamètre d'environ 2m et une hauteur de 1m. Le moule de l'extrados est réalisé en deux sections

avec un plan de joint central afin de pouvoir effectuer le démoulage de la pièce. Cet outillage permettra d'identifier les limites d'angle de dévers grâce au bord d'attaque de l'aile (Figure 2.9) et de quantifier les distorsions grâce à ses grandes dimensions, ainsi que sa structure interne (Figure 2.9). Toutefois, avant de concevoir et d'imprimer les composantes du moule Chinook, les paramètres d'impression (buse, débit d'extrusion, vitesse de déplacement de l'extrudeuse, etc.) ont été définis en imprimant de simples boîtes rectangulaires. L'adhésion entre les couches était le principal critère d'évaluation de la qualité d'impression. Comme mentionné précédemment, un aspect critique de l'impression grand format est la limitation de l'angle de dévers. Pour caractériser cette limite, une boîte ayant une de ses surfaces à inclinaison progressive (Figure 2.10) a été imprimée verticalement, jusqu'à ce que les dernières couches s'affaissent sous l'effet de la gravité, définissant ainsi l'angle de dévers maximal.

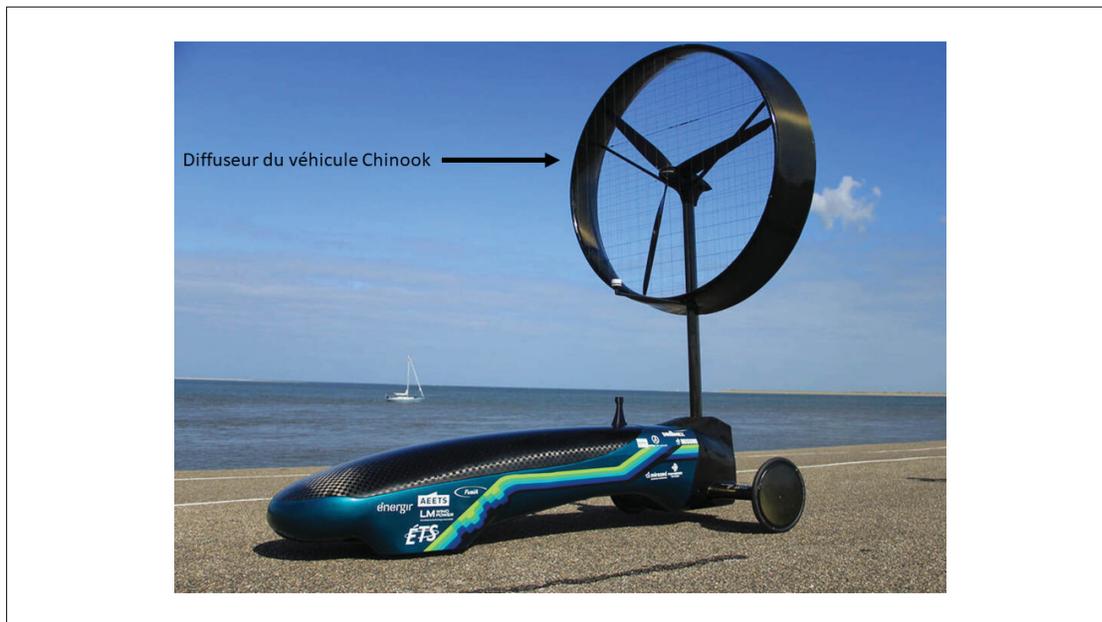


Figure 2.8 Diffuseur de la voiture éolienne Chinook

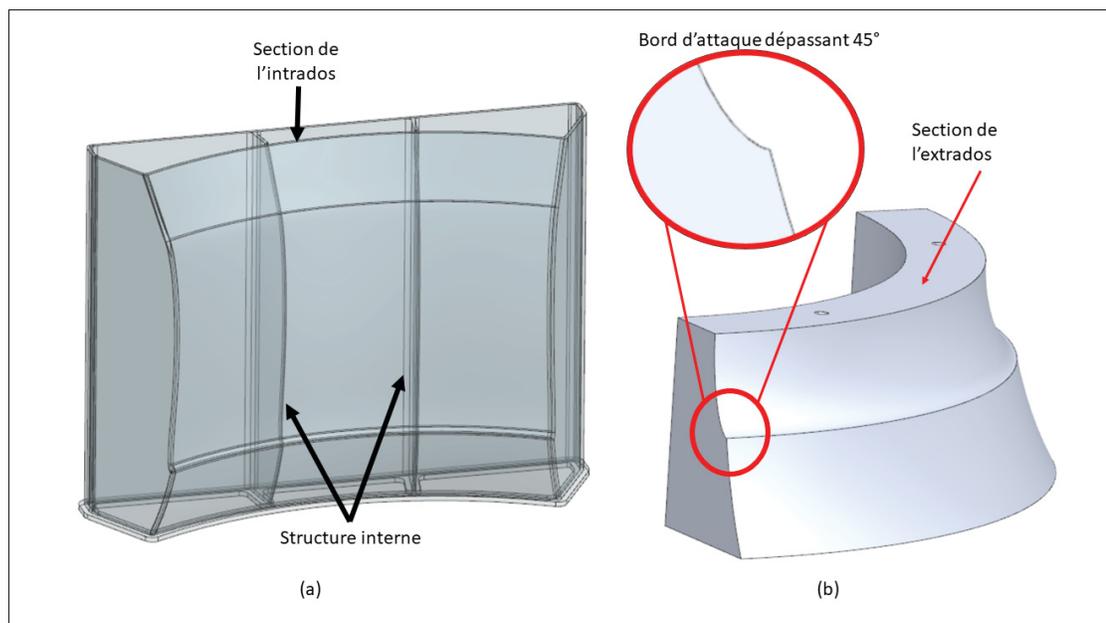


Figure 2.9 Dessins des sections du moule identifiant : (a) les structures internes, (b) le bord d'attaque

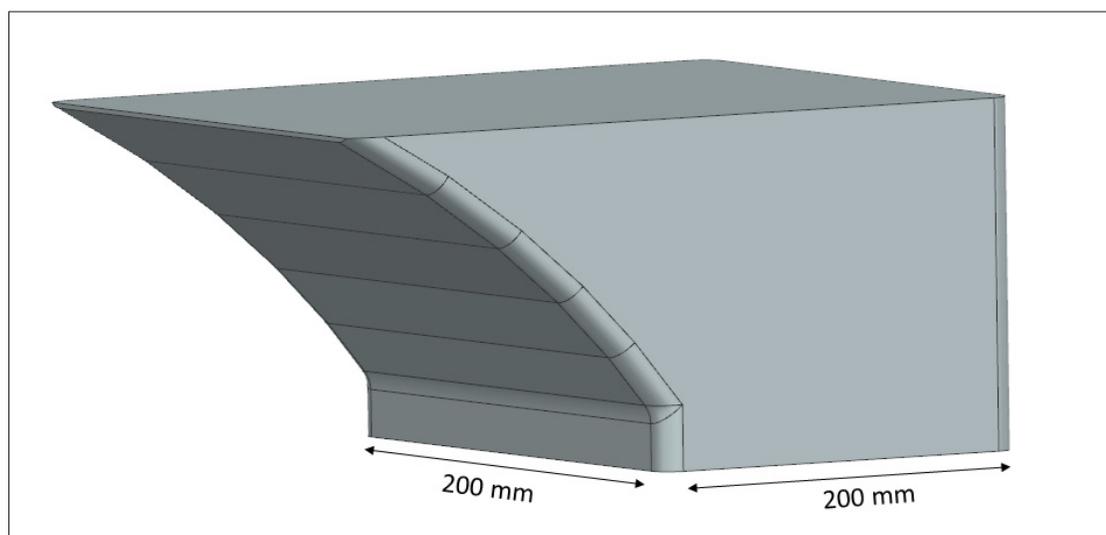


Figure 2.10 Boîte de caractérisation de l'angle de dévers

2.3.2 Impression dynamique et conception d'une buse pour pallier aux limitations du procédé

L'impression dynamique correspond à une impression non planaire combinée à une direction d'impression variable dans le but d'imprimer des surfaces inclinées en limitant le décalage des cordons les uns par rapport aux autres tel que montré sur la Figure 2.1. L'impression de couches non-parallèles les unes par rapport aux autres requiert de faire varier la dimension des cordons au fur et à mesure de l'impression d'une couche. Pour cela, deux solutions étaient possibles : faire varier la vitesse de l'extrudeuse en ayant un débit constant ou faire varier le débit en fonction de la quantité de matière nécessaire. La seconde méthode a été choisie et développée grâce à un script ajustant le débit de l'extrudeuse. Pour démontrer le bon fonctionnement de ce script, un tube courbé a été dessiné pour l'imprimer en débutant avec l'extrudeuse à la verticale et en finissant avec l'extrudeuse à 45° tel que montrée sur la Figure 2.11. D'autre part, les limitations d'inclinaison de l'extrudeuse ont poussé à la conception et la fabrication d'une buse coudée à 45°. Des essais ont ensuite été réalisés en imprimant des boîtes pour démontrer les performances de cette buse en comparant aux résultats obtenus d'une boîte imprimée avec une buse régulière.

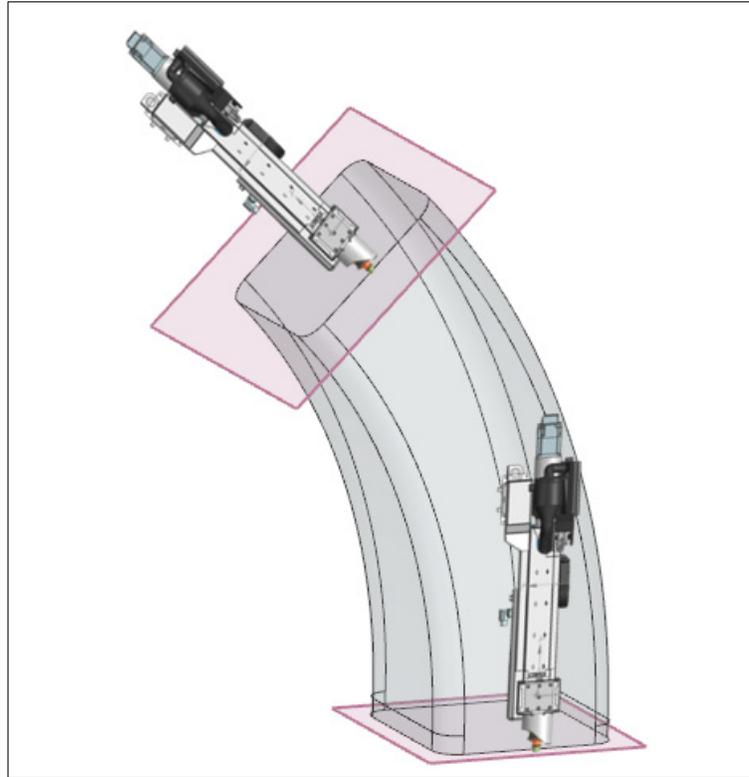


Figure 2.11 Dessin du tube courbé démontrant le fonctionnement de l'impression dynamique

2.3.3 Impression et conception d'un moule industriel pour démontrer la viabilité des méthodes développées

Les caractéristiques requises pour comparer les techniques d'impressions verticales et celles développées dans ce projet se retrouvent dans l'outillage présenté à la Figure 2.12. La géométrie de l'outillage (environ 580mm par 455mm par 330mm) à imprimer en Polycarbonate permet le moulage d'une pièce en matériaux composites jusqu'à des températures de cuisson de 120°C (limite d'utilisation en continu du Polycarbonate). L'outillage possède des trous sur les surfaces adjacentes à la surface de moulage qui servent à la fixation de brides pour le moulage. Cet outillage permettait de répondre aux critères suivants :

- Les petites dimensions de l'outillage permettent de l'imprimer plusieurs fois avec la quantité de matière disponible.

- Les changements brusques des surfaces frôlent les limites du procédé.
- L'angle de dévers est compris dans $\pm 45^\circ$ pour l'impression verticale.

Cette géométrie a été imprimée avec la méthode d'impression verticale et avec la méthode d'impression dynamique pour démontrer et comparer les performances de ces méthodes. Les paramètres d'impression (buse, dimensions des cordons, températures d'extrusion, durée de couche etc.) ont fait l'objet d'essais préliminaires pour déterminer les paramètres optimaux de ce matériau. Une post-cuisson a été réalisée pour diminuer les contraintes internes. Pour évaluer les performances des méthodes d'impression et les effets de la post-cuisson, les pièces ont été scannées à chaque étapes du processus pour s'assurer qu'elles respectent les requis. Pour l'usinage, les pièces devaient respecter un surplus suffisant d'environ +3mm. Quant à la déviation suite au relâchement des contraintes, elle devait être négligeable (maximum $\pm 0.5\text{mm}$) au vu de la taille de l'outillage.

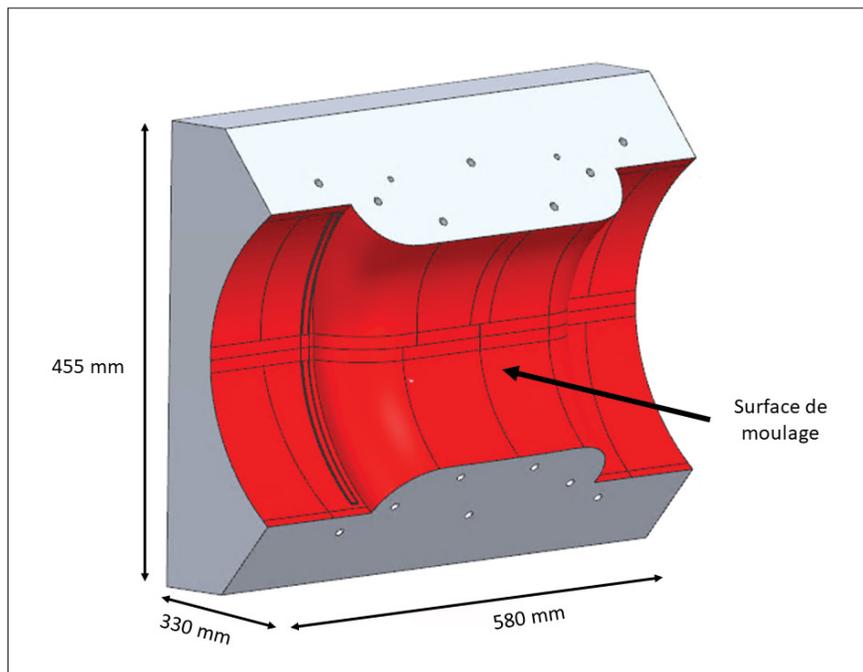


Figure 2.12 Outillage utilisé pour valider les méthodes d'impressions développées

CHAPITRE 3

CONCEPTION ET FABRICATION D'UN OUTILLAGE DE GRANDES DIMENSIONS PERMETTANT D'IDENTIFIER LES LIMITATIONS PHYSIQUES ET NUMÉRIQUES DU PROCÉDÉ

3.1 Conception de la géométrie de l'outillage du véhicule Chinook

Cette section présente l'outillage du diffuseur du véhicule Chinook (Figure 2.8 , la manière dont il a été conçu et réalisé, le tout dans l'objectif d'identifier les limites du procédé lors de la fabrication d'outillage de grandes dimensions imprimés à 90°.

Cet outillage étant de trop grandes dimensions pour le lit d'impression installé à l'ÉTS, il a dû être segmenté en 6 parties pour chaque anneau, afin de pouvoir les réaliser sur lit d'impression et que l'accès aux différentes surfaces de joints entre les pièces à usiner soit possible. En résumé, le moule comporte 18 parties dont 12 parties pour l'extrados et 6 pour l'intrados comme le montre la Figure 3.1.

Chaque morceau est imprimé avec un tranchage vertical. L'usinage des surfaces de jointures entre les morceaux est réalisé avec le robot AM Flexbot à l'ÉTS. L'outillage est assemblé puis envoyé à un prestataire extérieur pour l'usinage de la surface de moulage étant donné que l'outillage assemblé est trop grand pour être usiné avec l'équipement de l'ÉTS.

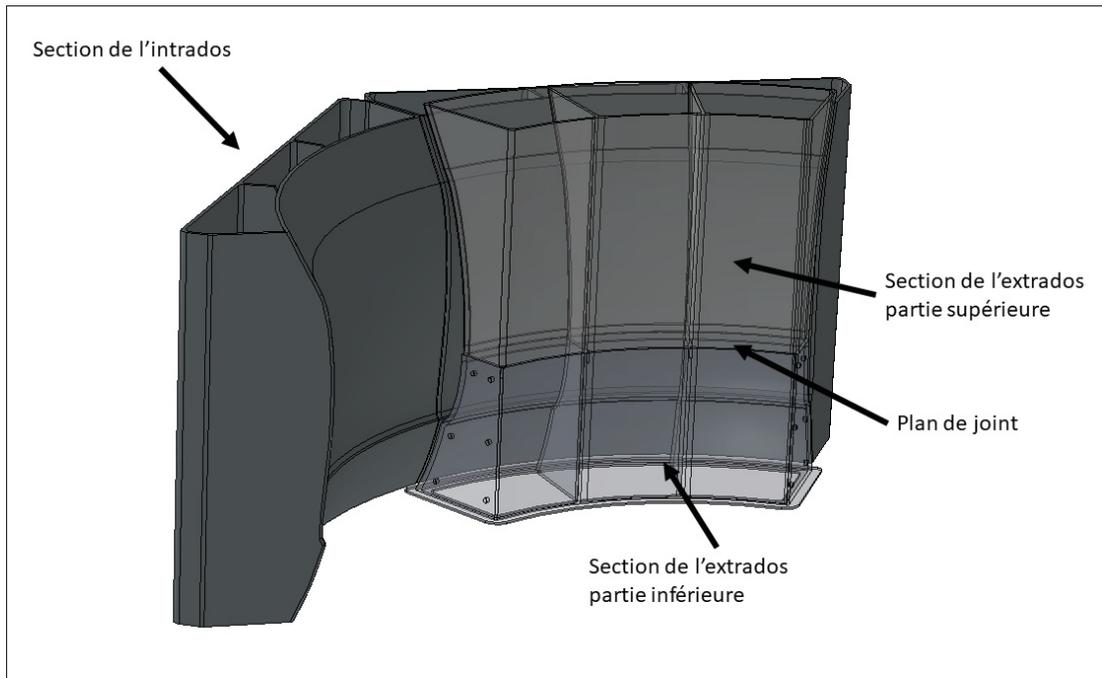


Figure 3.1 Segmentation du moule du diffuseur de la voiture éolienne en 18 parties : 12 pour l'extrados et 6 pour l'intrados

Après avoir segmenté le moule, la conception et l'impression des 18 parties sont réalisées. Pour cela, les opérations suivantes sont réalisées afin d'apporter les modifications nécessaires pour l'impression :

- Choisir la dimension des cordons ainsi que le surplus d'épaisseur pour l'usinage (section 3.1.1.3).
- Choisir les dimensions des congés et la forme de la structure interne (section 3.1.1.3).
- S'assurer que l'angle de dévers ne dépasse jamais 45° (section 3.1.2).

3.1.1 Impression de la structure interne

3.1.1.1 Principe de l'impression d'une structure interne

L'objectif d'imprimer une structure interne en plus de la peau extérieure est de renforcer la coque à certains endroits, ce qui permet d'augmenter sa tenue mécanique et sa stabilité dimensionnelle. La Figure 3.2 montre une géométrie de pièce ayant deux renforts internes.

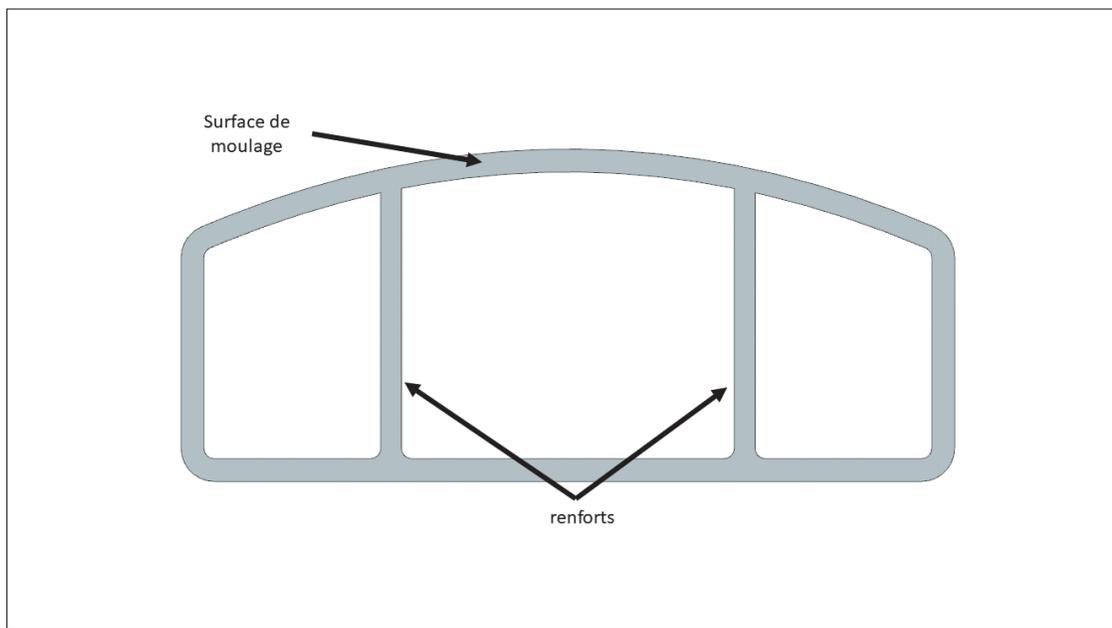


Figure 3.2 Schématisation du renfort à l'intérieur d'une pièce imprimée

Pour réaliser cette structure interne, il faut donc réaliser un ou plusieurs parcours continus par couches qui remplissent différentes fonctions :

- Permettre à la structure de respecter les exigences dimensionnelles de la pièce. Par exemple, dans la Figure 3.5, la structure interne permet de supporter le contour extérieur notamment au niveau de la partie incurvée dans le cas d'une impression à 45° . En effet, lorsque cette pièce va être imprimée à 45° la partie incurvée aura tendance à s'affaisser dû à la gravité

et étant donné que c'est une surface imprimée à l'horizontale sans matière qui supporte le cordon (Figure 3.4).

- Permettre à la structure de respecter les exigences de résistance mécanique et de rigidité. En effet, s'il y a seulement le contour de la pièce qui est réalisé, la pièce risque d'être trop flexible et de difficilement résister aux contraintes mécaniques, à moins d'imprimer un cordon très épais. Par exemple, dans la Figure 3.3, si une force est appliquée sur la partie incurvée, lors de l'usinage de cette surface ou lors d'un moulage, la surface risque de se déformer fortement. La présence de la structure interne ayant un point de contact avec le contour sur des zones particulières permet d'obtenir une pièce plus rigide et résistante aux efforts.
- Permettre de limiter l'expansion thermique de la pièce lors de l'utilisation de celle-ci. La structure interne a alors pour objectif d'aider au respect des exigences dimensionnelles de la pièce, notamment lors du chauffage en ayant un cordon imprimé dans une direction différente de celle du contour, ce qui donne une structure plus rigide sur le même principe que les systèmes de structures en treillis.

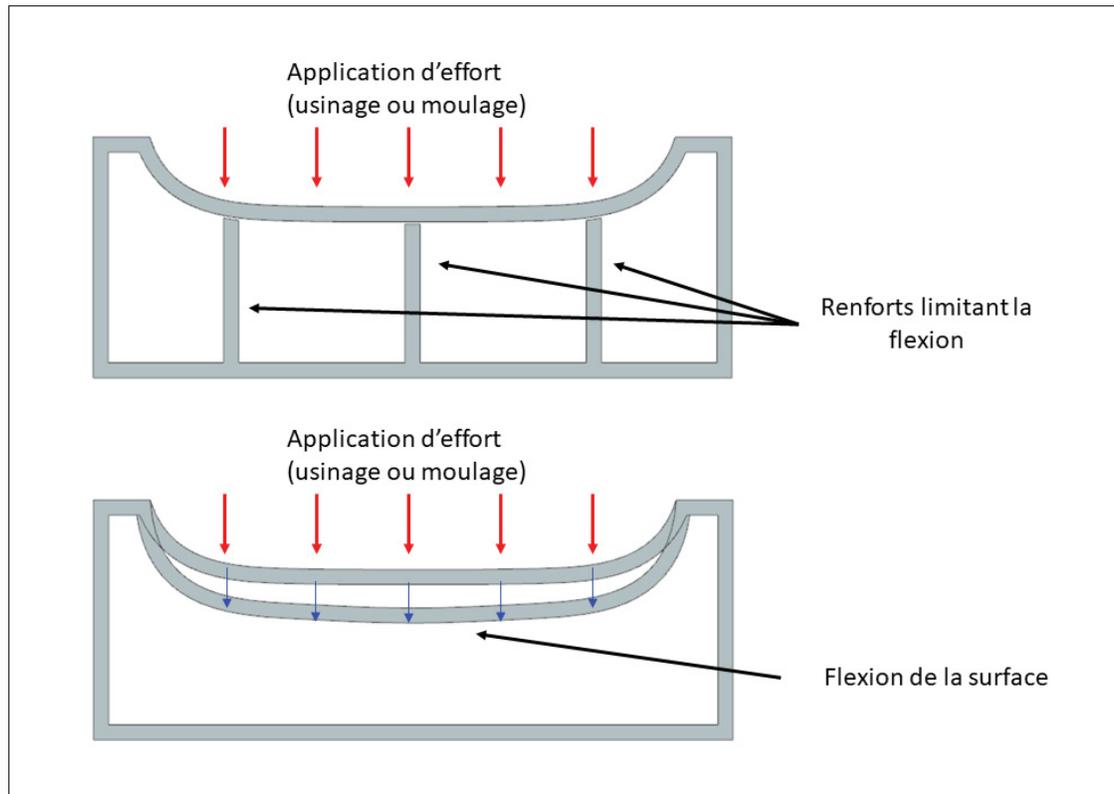


Figure 3.3 Limitation de la flexion de la surface grâce aux renforts

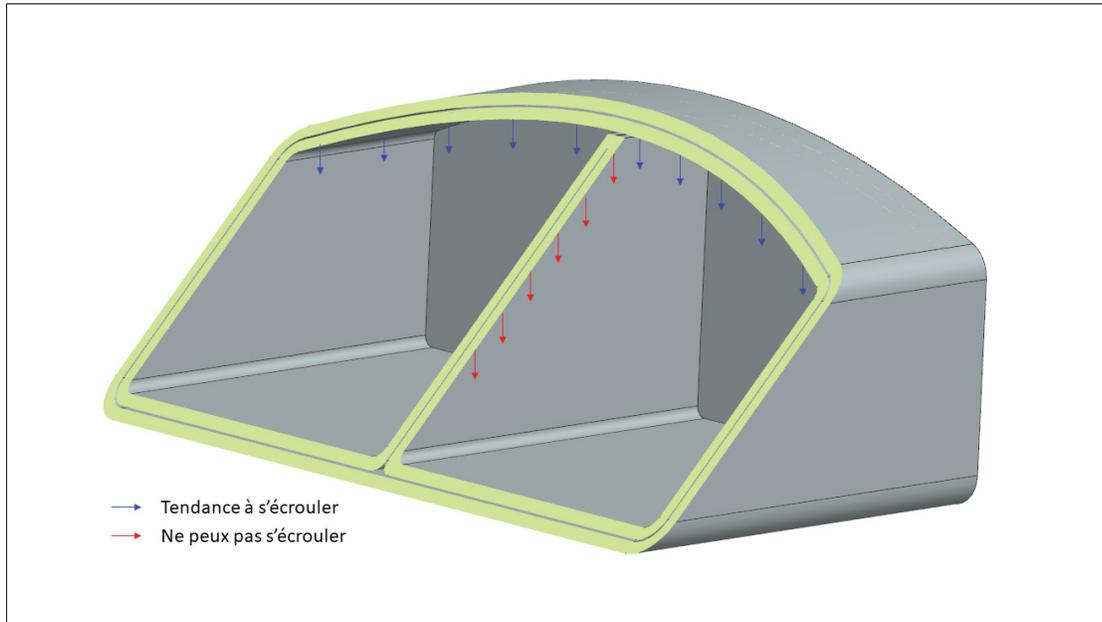


Figure 3.4 Support de la surface horizontale grâce au renfort lors de l'impression à 45°

3.1.1.2 Tracé de parcours discontinu

L'extrudeuse CEAD, qui est utilisée à l'ÉTS, comporte une pompe à engrenages entre la vis sans fin et la buse qui permet de gérer précisément le débit de l'extrudeuse. Cela permet ainsi de tracer des parcours d'impression discontinus puisqu'il est possible de couper l'extrusion de matière efficacement. L'idée est de pouvoir réaliser différents parcours imprimés sur une même couche notamment en traçant le contour et une structure interne avec deux parcours distincts comme représentés sur la Figure 3.5. Il est à noter que la possibilité de gérer le débit de matière permet de réaliser plus facilement l'arrêt d'impression d'un cordon. Cependant, il n'est pas intéressant de réaliser du dépôt de matière discontinu comme le ferait une imprimante 3D en FDM classique car réaliser beaucoup de cordons de faible longueur augmenterait fortement le temps d'impression en créant beaucoup de déplacements inutiles, comme expliqué à la section précédente. De plus, avec de nombreux cordons de petites tailles, il y aurait beaucoup de zones

de joints avec un manque de matière entre les cordons qui provoquerait de nombreuses faiblesses dans la pièce comme le montre la Figure 3.6.

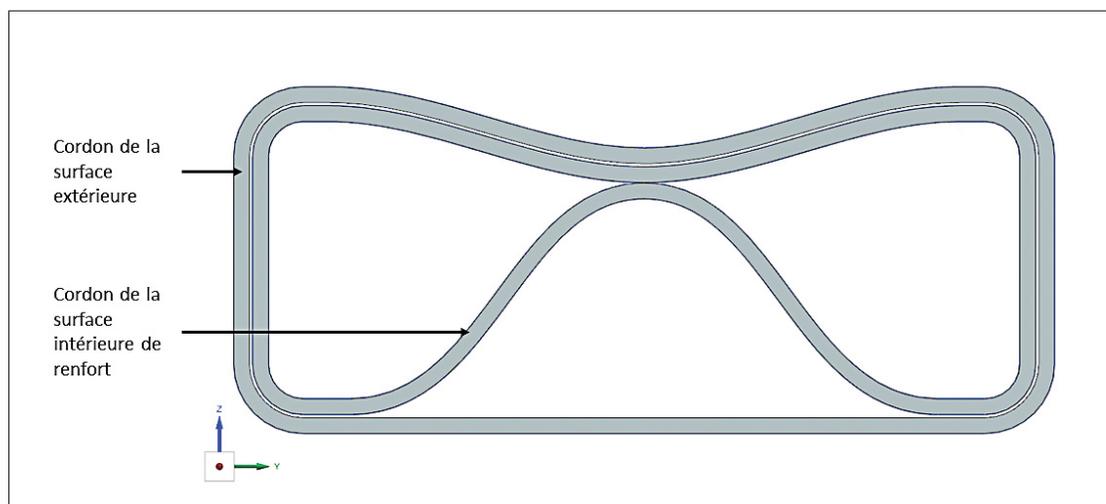


Figure 3.5 Principe de la structure interne avec un cordon extérieur pour la surface utile et un cordon intérieur pour le renfort

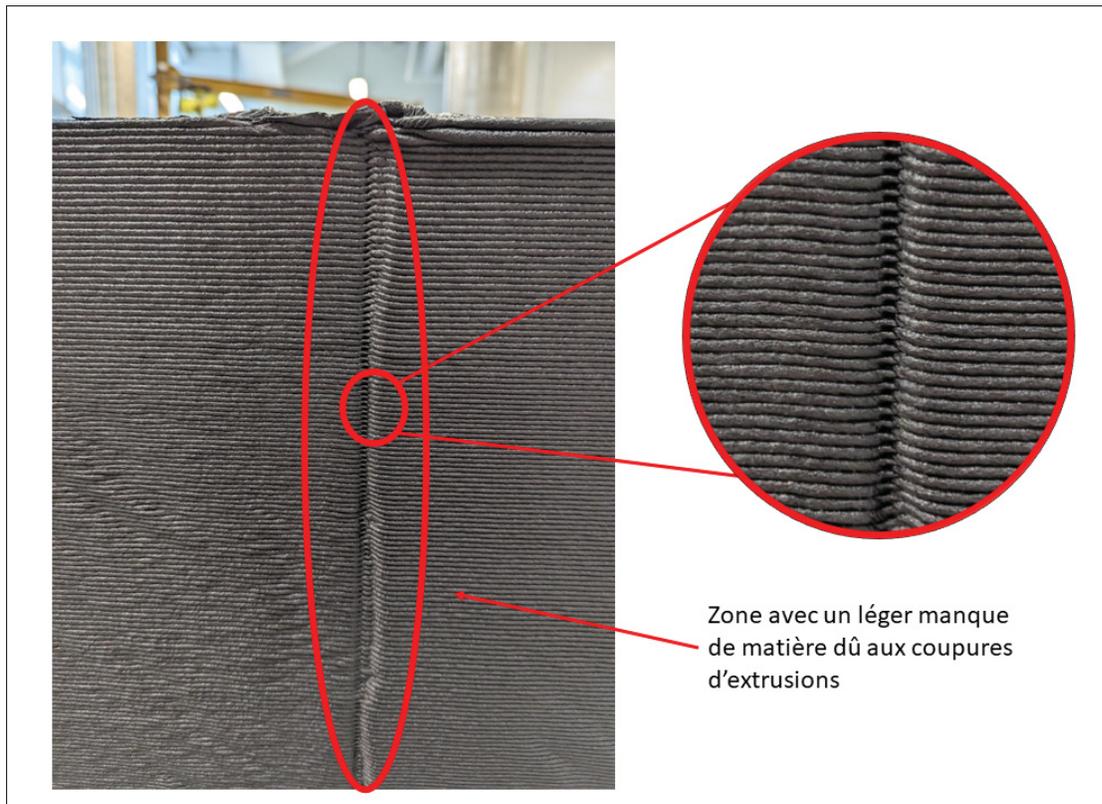


Figure 3.6 Manque de matière lors de la fin d'un cordon provoquant un léger manque de matière et/ou une faiblesse de la pièce

3.1.1.3 Cordons doubles

Afin d'imprimer l'outillage avec une structure interne, deux manières d'envisager la conception sont possibles. La première consiste à réaliser un unique cordon qui, sur la surface utile, sert de peau à l'outillage et qui fait une structure interne supportant la surface utile, comme le montrent les schémas (b) et (c) de la Figure 3.7. La seconde consiste à réaliser deux cordons, un servant de peau sur tout le contour de l'outillage et l'autre à l'intérieur de la peau servant de seconde épaisseur de peau et de renforts, comme le montre le schéma (a) de la Figure 3.7.

Afin de pouvoir usiner la surface utile, il est nécessaire de réaliser un cordon suffisamment épais pour y retirer environ 5mm à l'usinage tel qu'expliqué à la section 1.4. La première méthode nécessite ainsi de réaliser un gros cordon sur l'ensemble de la pièce, ce qui provoque

un déséquilibre de la pièce dû aux différences d'épaisseur de la pièce selon les sections. En effet, l'utilisation du cordon simple induit dans un cas des renforts deux fois plus épais que la peau (schéma (c)) et dans l'autre cas une épaisseur variable sur la surface utile et une absence de matière sur la surface opposée (schéma (b)). Cette non-homogénéité induit des distorsions importantes dues à la non-uniformité du refroidissement selon les zones de la pièce. La méthode utilisée pour le schéma (a) permet d'obtenir des surfaces de mêmes épaisseurs sur l'ensemble de la pièce permettant un refroidissement homogène minimisant les déformations.

Avec un modèle d'extrudeuse ayant un débit limité à 12kg/h, il devient alors difficile de réaliser de grandes pièces avec un cordon épais. En effet, avec un cordon épais, la vitesse d'impression est fortement réduite. Cela a pour conséquence de créer un gradient de température sur la couche, puisque l'extrudeuse apporte de la chaleur là où elle se situe, mais le reste de la couche a le temps de refroidir. Il y a donc sur une même couche une zone chaude et une zone froide à cause de l'augmentation de la durée de couche. De plus cette augmentation de la durée de couche rend parfois l'impression impossible car la durée de couche dépasse la durée maximale permettant l'adhésion des couches (voir section 1.3.5). L'utilisation de cordons doubles permet d'extruder des cordons plus fins et donc d'avoir une vitesse d'impression plus élevée. Cela permet ainsi de déposer plus régulièrement de la matière et donc de diminuer les gradients de température dans la pièce sur une même couche. Cependant, la quantité de chaleur apportée est plus faible et refroidi plus vite, car il y a moins de matière déposée. Il faut ainsi trouver un juste milieu pour réussir à limiter les gradients de températures en extrudant suffisamment vite tout en conservant suffisamment de chaleur en déposant des cordons suffisamment gros. La Figure 3.8 présente le principe expliqué ci-dessus, une étude thermique serait nécessaire afin de définir et optimiser la méthodologie qui serait la plus efficace pour conserver le maximum de chaleur.

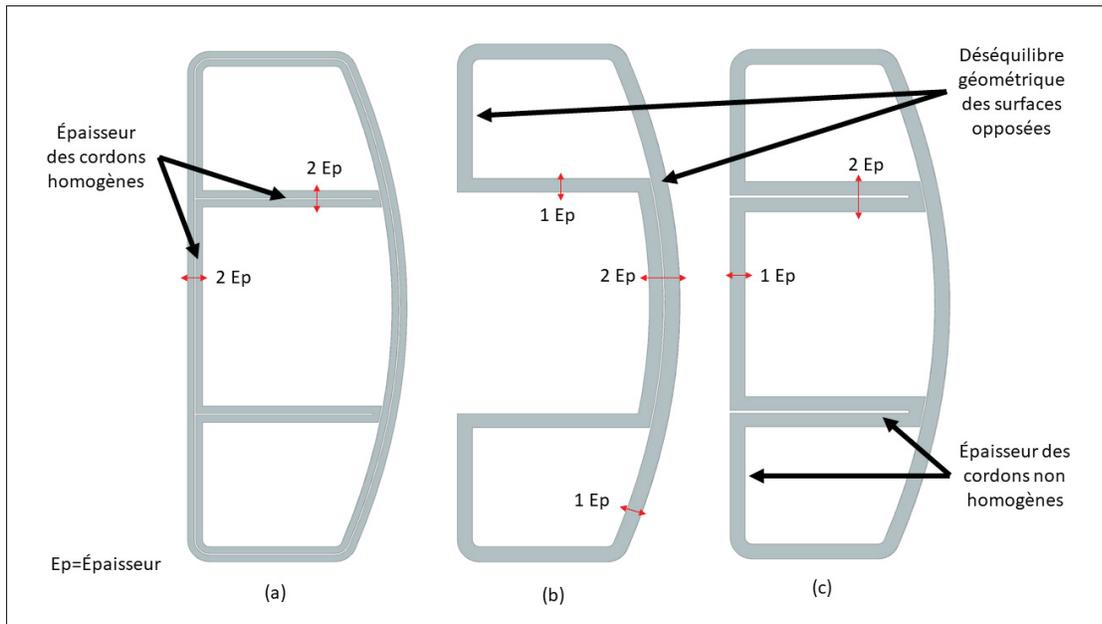


Figure 3.7 Géométrie des cordons et des renforts à privilégier (a) / à éviter (b) et (c)

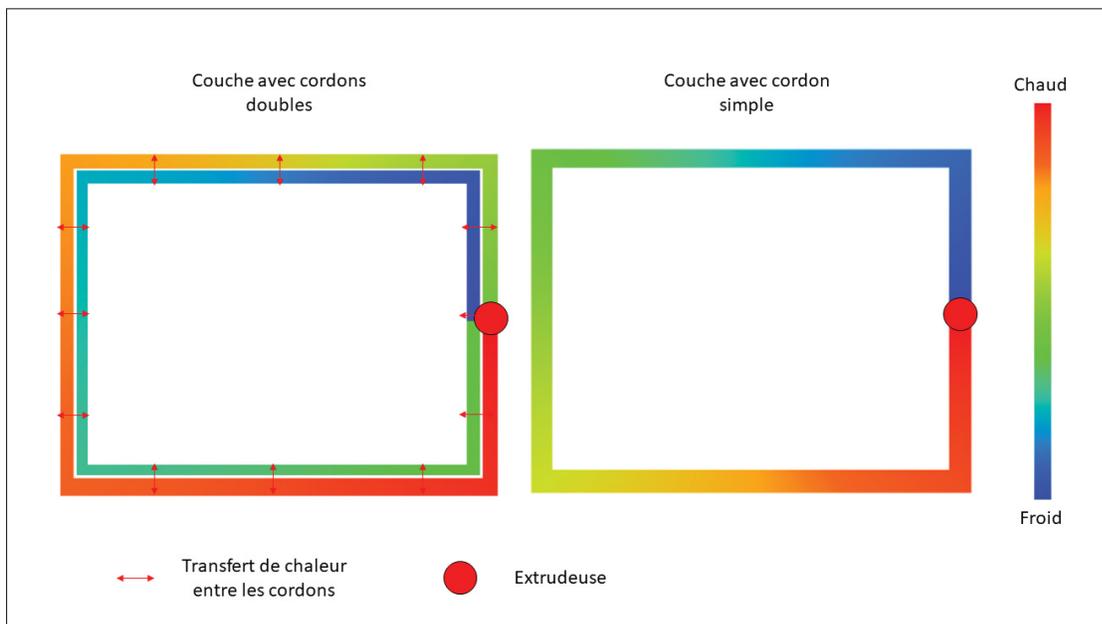


Figure 3.8 Principe de diffusion de la chaleur sur une couche

Dans le cas de l'outillage à imprimer, une structure interne avec 2 renforts est réalisée. Les cordons sont imprimés avec une buse de 6mm pour une largeur de cordon de 10mm et une

hauteur de 2.5mm. L'utilisation de cordons doubles (un pour la peau et un pour la structure interne) avec un chevauchement de 1mm permet d'obtenir une épaisseur de paroi d'environ 19mm.

Le surplus d'usinage est choisi selon les préconisations données à la section 1.4. Comme les cordons mesurent 10mm de large, un surplus de 5mm est prévu, ce qui permet d'obtenir une surface finale de 14 mm une fois le moule usiné. De plus, des congés sont ajoutés dans les coins, ils varient de 15 mm pour les coins sur la surface utile à 20mm pour les coins non usinés (voir Figure 5.3).

3.1.2 Géométrie du bord d'attaque

D'après les règles de conception définies par CEAD, l'angle de dévers maximal est de 45° , cependant avec certains paramètres, certains matériaux peuvent s'imprimer avec un angle de dévers légèrement plus important. Afin de déterminer l'angle maximal auquel le polycarbonate de Lavergne peut être utilisé, une boîte avec des cordons de 9mm, ayant un angle de dévers progressif allant de 40° à 60° par incrément de 5° a été imprimée (Figure 3.9). Cette boîte permet de déterminer l'angle à partir duquel l'effondrement du polymère apparaît. La Figure 3.10 montre une vue en coupe superposant le scan de la pièce avec le profil du CAD. À partir de 55° , l'impression ne respecte plus le profil désiré. L'angle maximal avec ces paramètres est donc d'environ 50° .

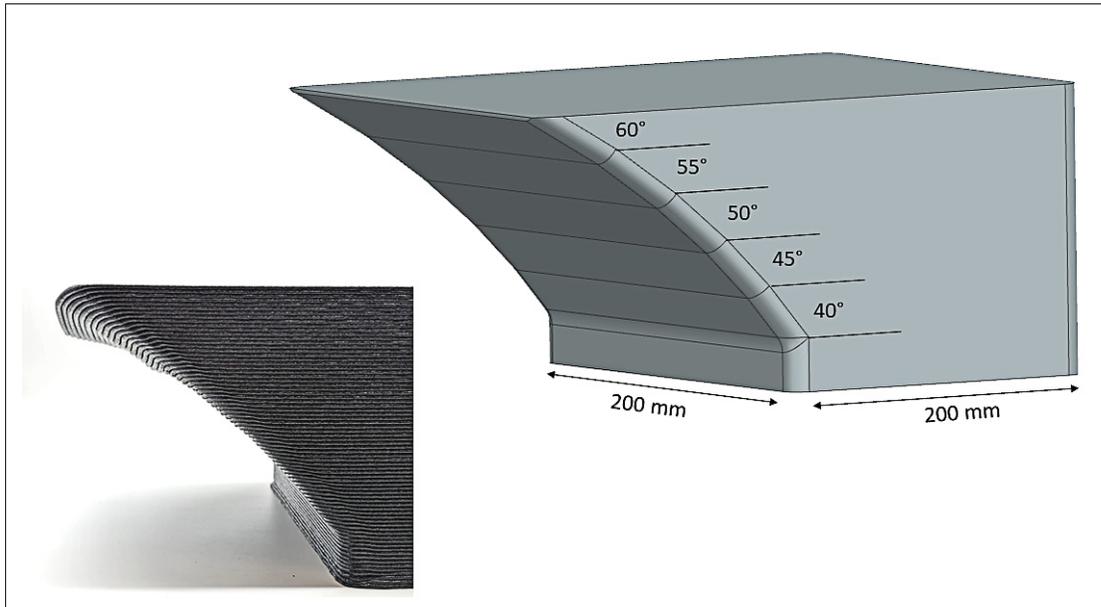


Figure 3.9 boîte simple avec un angle de dévers progressif de 40° à 60° par intervalle de 5°

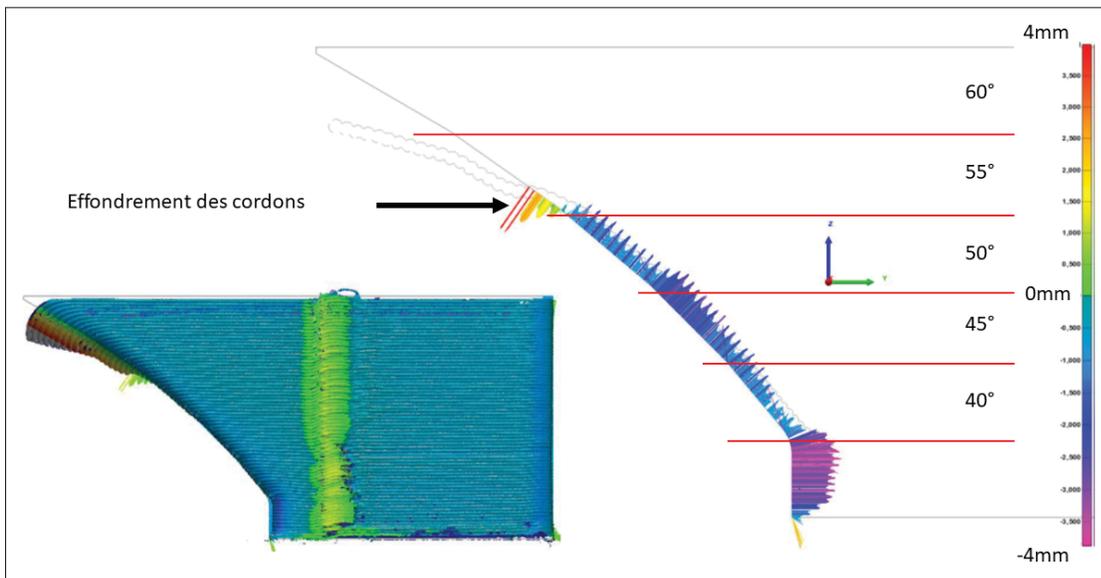


Figure 3.10 Vue en coupe du scan montrant l'angle de dévers maximal du VYTEEN PCGF20

La boîte de la Figure 3.9 indique que l'angle de dévers maximal est de 50° , cependant le bord d'attaque de l'extrados a une géométrie qui n'a que très localement un angle de dévers supérieur à 50° (Figure 3.11). Il a donc été nécessaire de déterminer s'il était possible d'imprimer cette section de l'outillage en suivant la forme initiale du bord d'attaque ou si une modification était nécessaire.

Pour cela, la zone de l'outillage avec le bord d'attaque a été imprimée puis scannée avec le bras de mesure Absolute Arm. Un ajustement par rapport au CAD a été réalisé dans le logiciel Polyworks afin de quantifier le possible effondrement de la matière lorsque l'angle de dévers dépasse 50° . La Figure 3.11 montre une vue en coupe de la section avec la zone dépassant localement les 50° . Le profil obtenu lors de l'impression s'effondre d'environ 6mm, ne respectant pas les tolérances requises, et causant un manque de matière à l'usinage.

Il est ainsi nécessaire de modifier le profil du bord d'attaque pour l'impression afin de ne pas avoir d'effondrement. Pour cela, un plan à 45° a été tracé comme montré sur la Figure 3.12 pour remplacer le profil initial afin de s'assurer qu'il n'y aura pas d'effondrement à l'impression et que le profil initial peut être usiné dans ce nouveau profil. La Figure 3.12 montre en rouge le profil initial du bord d'attaque et en bleu le nouveau profil avec l'épaisseur réelle des cordons montrant qu'il reste suffisamment de matière dans la zone modifiée pour obtenir la forme initiale du bord d'attaque.

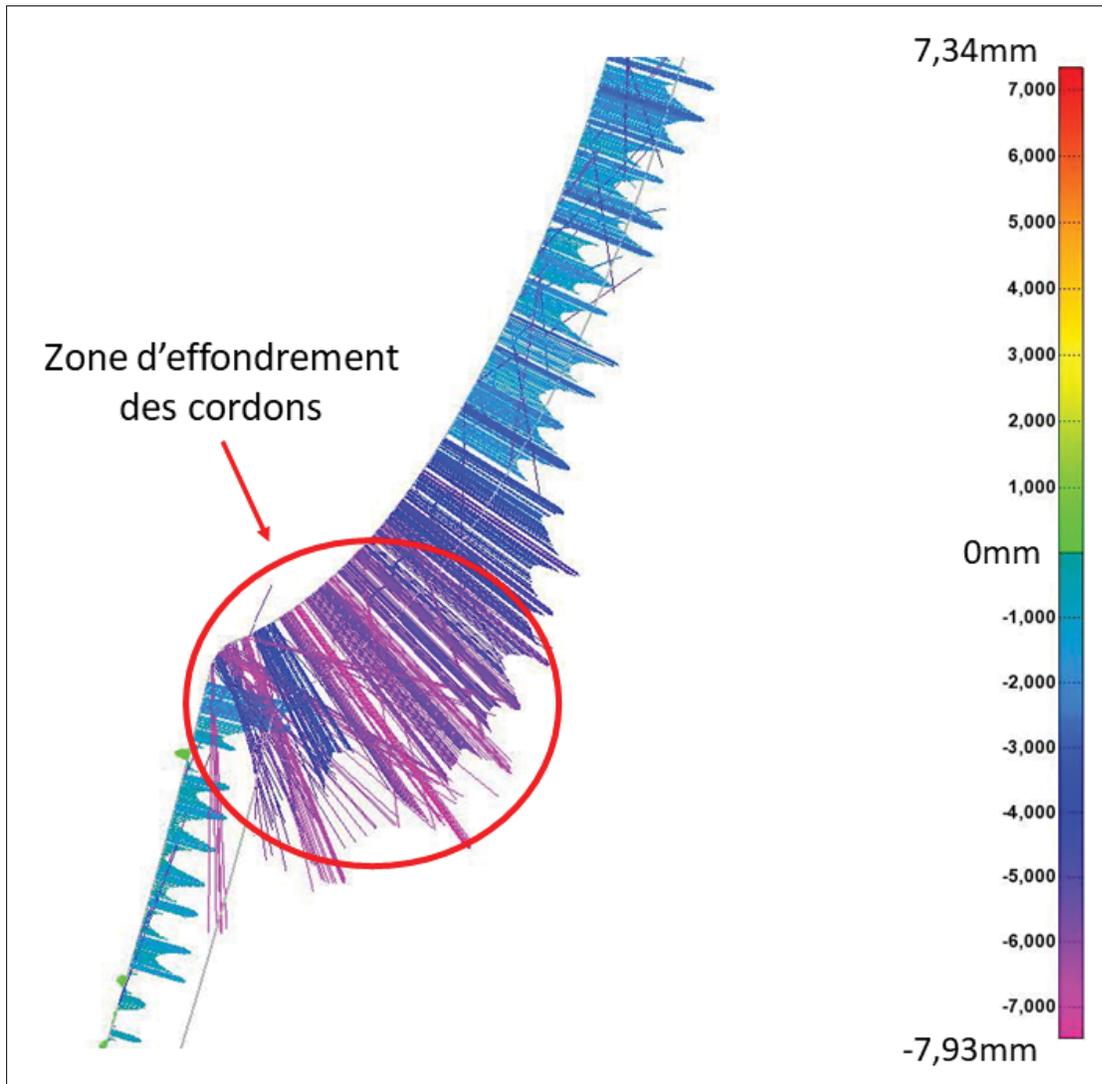


Figure 3.11 Vue en coupe de l'effondrement du profil du bord d'attaque de l'extrados

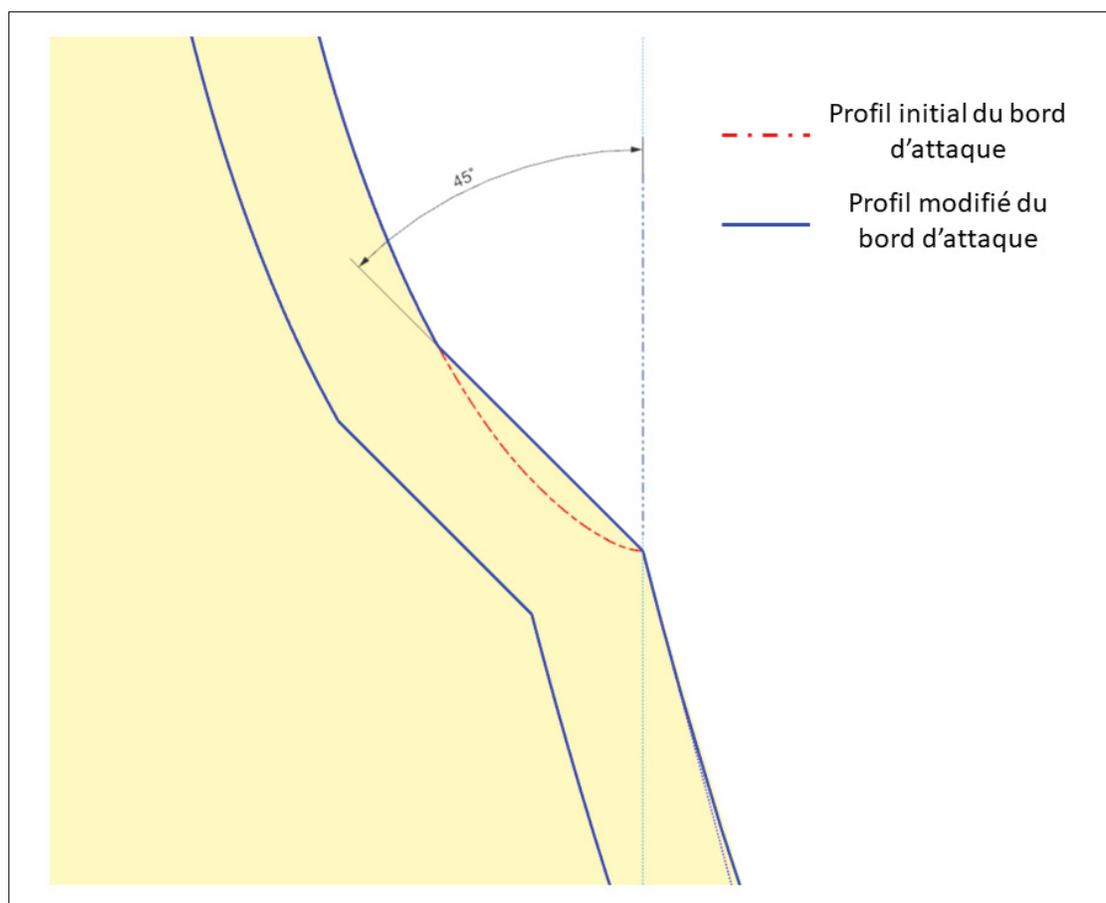


Figure 3.12 Schéma de la modification réalisée pour l'impression du bord d'attaque

3.2 Défis d'impression et défauts courants

Lors de l'impression de l'ensemble des parties de l'outillage, un certain nombre de difficultés et de défauts d'impressions récurrents sont apparus. Cette section présente les difficultés et défauts majeurs rencontrés ainsi que l'origine de ceux-ci.

3.2.1 Retrait et distorsion des pièces

Selon la fiche technique fournie par le fournisseur, le retrait au moulage calculé du polycarbonate de Lavergne, selon la norme ASTM-D955, est compris entre 0,3 et 0,5%, en comparaison le PIPG

(Post industrial PETG) fourni par MCPP a un retrait au moulage de 0,16%. Ce polycarbonate a ainsi un retrait 2 à 3 fois supérieur aux matériaux développés spécifiquement pour l'impression 3D, ce qui implique aussi plus de distorsion. Lors de l'impression des pièces, il est apparu que celles-ci avaient tendance à se déformer. En effet, certaines surfaces comme la surface du dessous ne semblaient pas planes lorsque les pièces étaient posées sur le sol.

Afin de quantifier les distorsions dues au retrait, un scan d'une pièce n'ayant pas de défauts à l'impression a été effectué pour quantifier les déformations et s'assurer que la pièce répond aux critères de tolérance pour l'usinage. La Figure 3.13 montre une vue en coupe au milieu de la pièce. L'écart de tolérance maximal est d'environ + 10 mm dans les coins sur la surface arrière et un écart minimum d'environ - 2,5 mm sur les coins de la surface utile, sachant que la pièce a été imprimée avec un excès de matière de + 5mm. La pièce a ainsi tendance à tirer vers l'arrière au niveau de coins comme le montrent les flèches sur la Figure 3.13. L'impression avec ce matériau cause des déformations des pièces relativement importantes, ce qui pourrait mettre compromettre la conformité des pièces. L'analyse de conformité de cette pièce est détaillée à la section 3.3. Dans le cas d'un assemblage de pièces, comme c'est le cas pour cet outillage, il est nécessaire de porter attention aux déformations et de les prendre en compte lors de l'usinage des surfaces de joints. Cela permet d'éviter une accumulation de déformations d'une pièce à l'autre qui rendraient difficile l'assemblage et l'usinage de la surface de moulage.

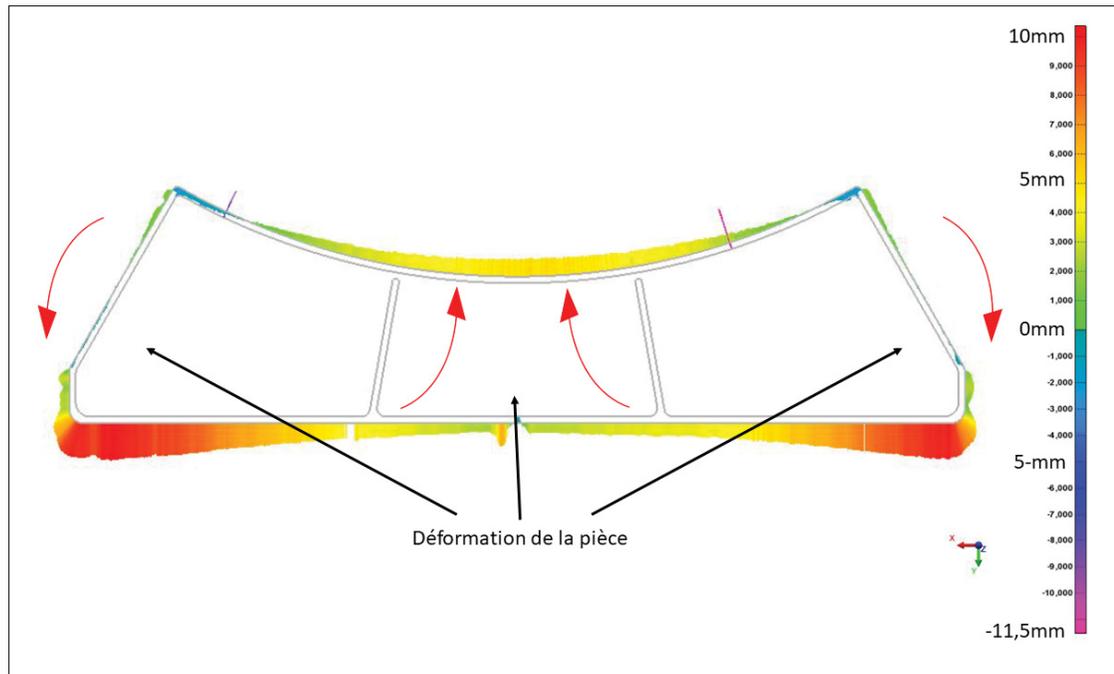


Figure 3.13 Vue en coupe montrant la distorsion de l'outillage

3.2.2 Caractérisation de l'adhésion entre les couches

Cette section présente la caractérisation des paramètres pour l'adhésion des couches et les conséquences qui en découlent.

3.2.2.1 Choix des paramètres d'impression

Comme expliqué dans la section 1.3.5, la durée de couche est un paramètre important pour l'adhésion des couches. Afin de pouvoir mesurer ce paramètre, un test de durée de couche a été réalisé en imprimant une boîte de 200mm de côté avec une buse de 6mm et des cordons de 9mm par 2.5mm en faisant varier la vitesse d'impression de 737mm/min à 147mm/min, comme montré sur la Figure 3.14. Cette boîte a été imprimée en débutant avec une durée de couche de 1min pour une vitesse de 737mm/min, correspondant à 100% de la vitesse du programme. Puis la vitesse a été réduite jusqu'à atteindre 20% correspondant à une durée de couche de 5min.

Suite à l'impression, les couches ayant été imprimées avec une durée de couche de plus de 2min30sec n'ont pas eu une bonne adhésion et se sont décollées.

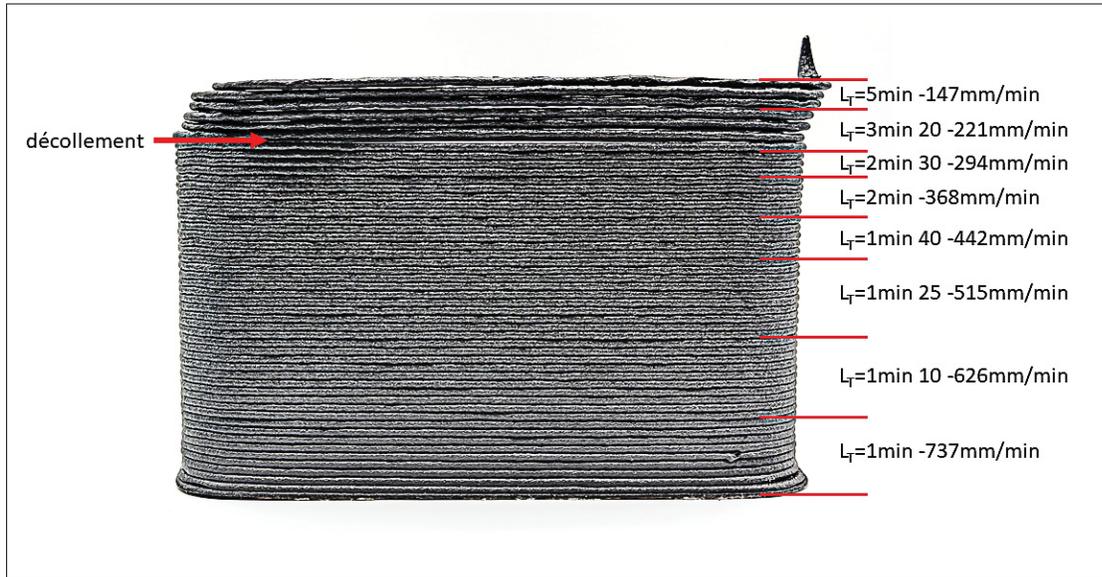


Figure 3.14 Boîte permettant de définir le temps de couche maximal

Ce polymère est donc relativement sensible à la durée de couche. Une couche qui prend plus de 2min30sec aura probablement des problèmes d'adhésion (dans le cas où les paramètres sont les mêmes paramètres que la boîte test). Dans le cas de l'outillage, la largeur de la paroi est deux fois plus large que sur la boîte de test, une durée de couche légèrement supérieure à 2min30sec est alors possible. La durée de couche est ajustée au moment de l'impression par itération notamment en fonction du comportement de la matière dans les coins. La durée de couche obtenue est d'environ 3 min.

3.2.2.2 Problèmes encourus lors de la production des pièces

Lors de l'impression de l'outillage, différents points ont mené à une mauvaise adhésion des couches :

- Les pièces sont imprimées avec une buse de 6mm, cependant, avec une si petite buse, il est difficile d'avoir une bonne pénétration de la matière, dans le lit strié lors de la première

couche, permettant une bonne adhésion de la pièce au lit. La conception de cette pièce est alors faite avec les 3 premières couches plus large. Elles sont imprimées avec une buse de 12mm pour avoir une meilleure pénétration de la matière dans les stries du lit et une meilleure adhésion avec celui-ci. Un changement rapide de buse est ensuite effectué après ces trois couches pour le reste de l'impression (Figure 3.15) . Cette méthode a été choisie afin d'assurer une bonne adhésion avec le lit évitant un décollement brusque de la pièce dû au retrait pouvant engendrer des bris d'équipement.

- A cause d'un problème de transport de la matière du sécheur à l'extrudeuse faisant diminuer progressivement le niveau de matière dans la trémie de l'extrudeuse, un manque de matière apparaît au bout de quelques heures et nécessite de diminuer la vitesse d'impression pendant quelques minutes pour permettre à l'extrudeuse de se remplir à nouveau, ce qui implique un temps de couche élevé pour une couche. Après coup, il s'est avéré que la valve permettant de gérer le débit de matière de chaque salve envoyée du sécheur à l'extrudeuse s'est détériorée avec le temps et a fini par délivrer une quantité de matière trop faible faisant diminuer le niveau de la trémie progressivement, déclenchant l'alarme de manque de matière qu'après plusieurs heures d'impression.

Les effets des phénomènes précédemment expliqués créent des points de faiblesse dans l'impression. Par conséquent, il y a l'apparition de décollements à la première couche et à la couche ayant un temps de couche plus long. La Figure 3.16 montre ainsi les décollements des cordons à la première couche, ainsi qu'à une couche au milieu de l'impression. Ces décollements ont lieu aux extrémités de la pièce et ont chacun une flèche d'environ 15mm.

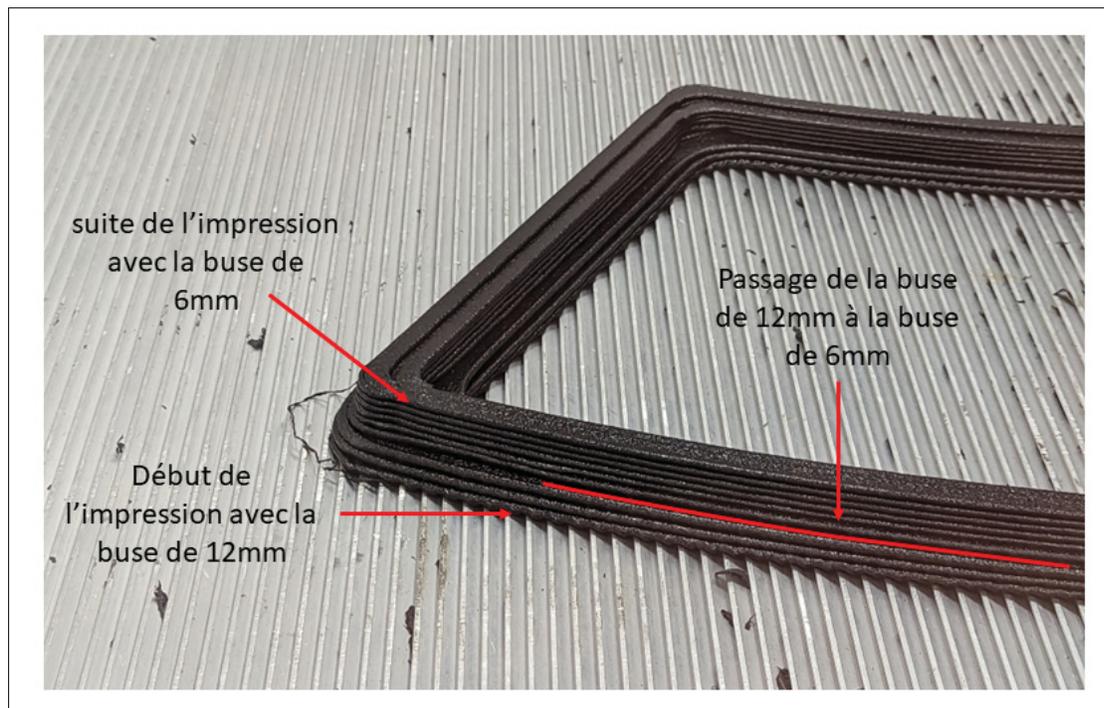


Figure 3.15 Passage de la buse de 12mm à la buse de 6mm

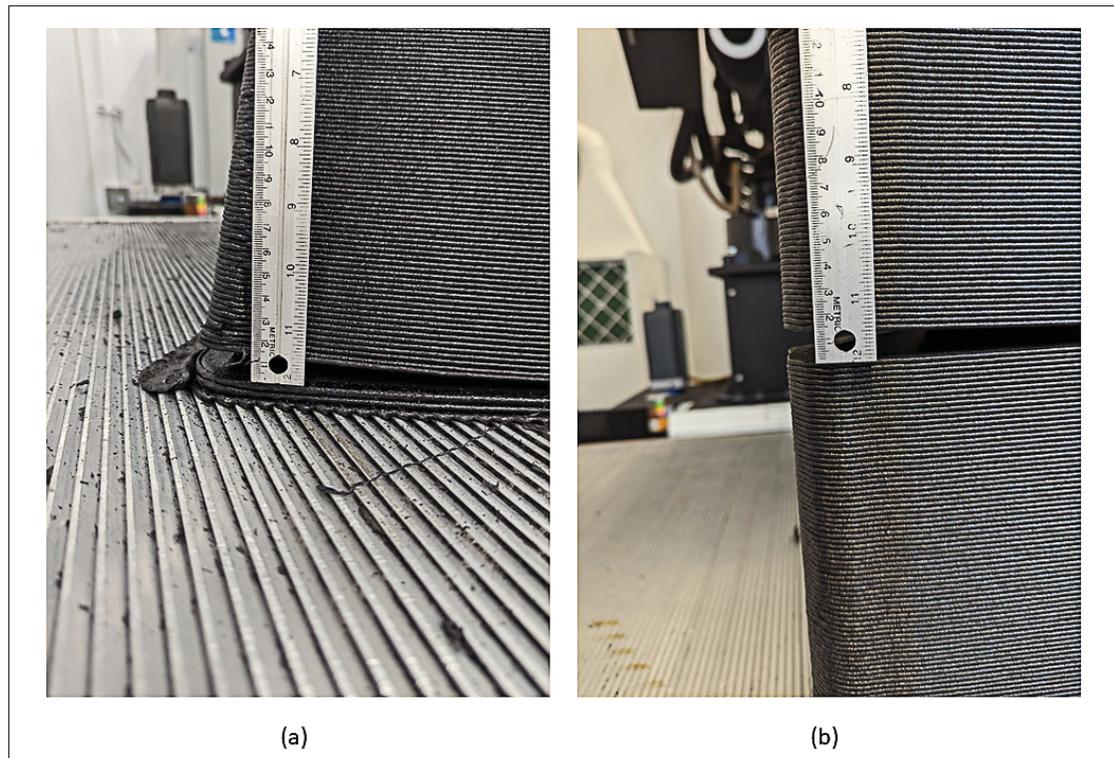


Figure 3.16 Décollement des cordons sur l'intrados à la première couche (a) et à une couche au milieu de la pièce (b)

3.2.3 Surplus de matière dans les congés

Le surplus de matière présent dans les coins est un problème récurrent dans la fabrication additive. Ce surplus de matière est dû à la gestion du débit par l'extrudeuse. Lors de l'impression d'une ligne droite, le débit constant est facilement géré par l'extrudeuse. En revanche lorsqu'il est nécessaire de réaliser un coin ayant un petit rayon la variation de débit instantanée est difficile à gérer. En effet, il faut diminuer très rapidement le débit pour le congé puis le réaugmenter juste après pour repartir sur la ligne suivante. Cette variation de débit combinée à la variation de vitesse de l'extrudeuse qui ralentit dans les coins engendre un surplus de matière dans le coin et un manque de matière à l'accélération juste après le congé comme le montre la Figure 3.17. Le manque de matière cause un espacement des cordons mesurant 29mm de long et 3,5mm de large.

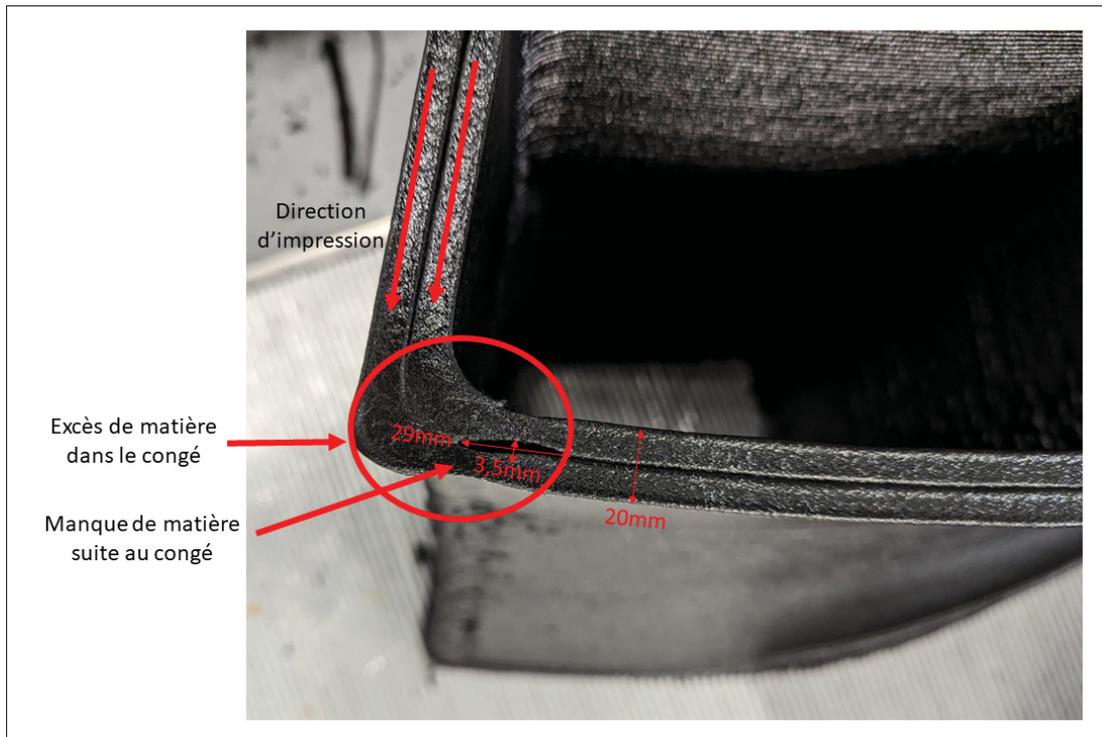


Figure 3.17 Surplus et manque de matière au niveau des congés

3.3 Inspection dimensionnelle des pièces imprimées

L'analyse de la pièce à la Figure 3.18 montre qu'elle s'est fortement déformée due au retrait du matériau (section 3.2.1). Les coins aux extrémités sont tirés vers la surface arrière et il manque environ 7mm sur les bords de la surface utile (-2mm par rapport au +5mm anticipé). La pièce est ainsi hors des tolérances d'usinage car il y a des zones sans matière à usiner. Malgré cette distorsion engendrant une non-conformité, l'impression a été réalisée avec une épaisseur de paroi d'environ 19mm permettant de rattraper ce défaut à l'usinage en réalisant une compensation selon l'axe Y pour usiner environ 10 mm au centre et 5mm sur les coins. Dans le cas d'autres pièces, les difficultés mentionnées aux sous-sections 3.2.1 et 3.2.2 ont parfois mené à des distorsions importantes notamment dues à des difficultés d'adhésion des couches menant à des décollements.

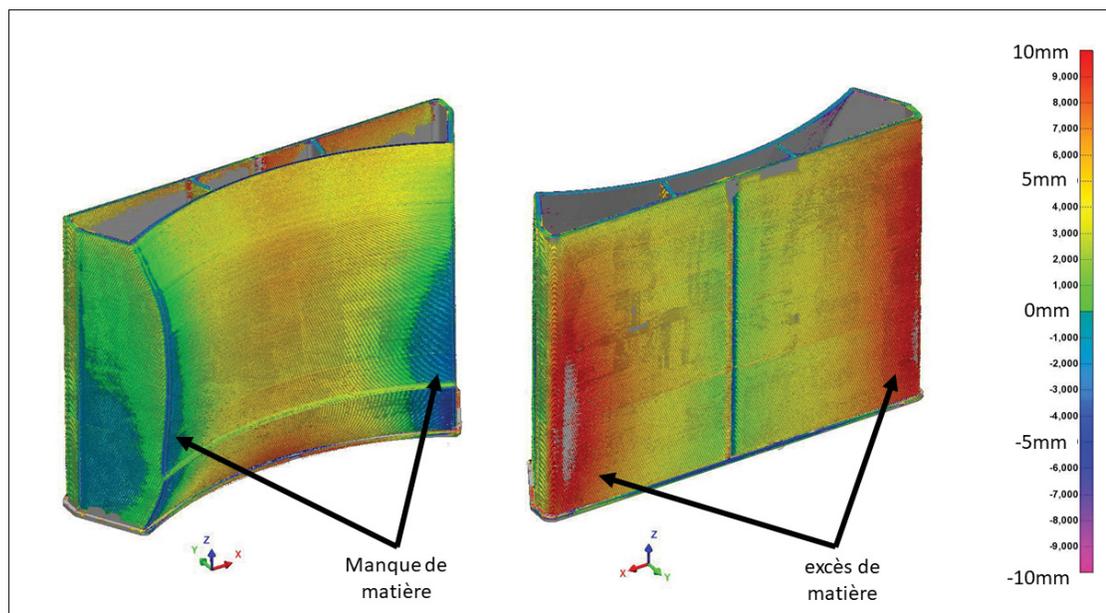


Figure 3.18 Inspection géométrique d'une section de l'intrados

CHAPITRE 4

DÉVELOPPEMENT DE MÉTHODES DE CONCEPTION ET D'IMPRESSION RÉPONDANT AUX LIMITATIONS PHYSIQUES LIÉES À L'ANGLE DE DÉVERS

4.1 Impression dynamique

Cette section présente la méthode mise en place pour le développement, de l'impression dynamique en détaillant son principe de fonctionnement et les moyens utilisés pour son implémentation. Des essais ont ensuite été réalisés pour valider son bon fonctionnement.

Avec le système d'impression CEAD, il est apparu nécessaire d'imprimer avec un angle de 45° afin d'être en mesure d'imprimer des surfaces horizontales, comme expliqué dans la section 2.2.3. Cependant l'impression à 45° possède des limites au niveau de l'angle de dévers. En effet, il est possible d'imprimer avec un angle de dévers des cordons de $\pm 45^\circ$ par rapport à la direction d'impression. Lors d'une impression à 45° , il est alors possible de réaliser une surface verticale comme montrée sur la droite de la Figure 4.1 (a). Cela correspond à un angle de dévers de $+45^\circ$ par rapport à la direction d'impression. Dans le cas d'une surface imprimée à 45° dans le plan de la table d'impression, il n'y a aucun angle de dévers des cordons les uns par rapport aux autres, comme montré sur la Figure 4.1 (b). Dans le cas d'une impression à -45° de dévers, comme le montre la Figure 4.1 (c), la surface obtenue est horizontale et correspond à un angle de dévers de 90° si la pièce était imprimée à la verticale. Cependant, sachant qu'au niveau du cordon il est impossible d'aller au-delà d'un angle de dévers de $\pm 45^\circ$, le profil de la pièce ne peut donc pas "redescendre" car cela impliquerait un angle de dévers supérieur à -45° , comme montré à gauche sur la Figure 4.1 (d).

En résumé, l'impression à 45° permet d'imprimer des surfaces montantes ou horizontales mais ne permet pas d'avoir de surfaces descendantes. Cependant, la majorité des outillages ont des surfaces montantes et descendantes. Il est alors nécessaire d'incliner la pièce pour supprimer la surface descendante et n'avoir plus que des surfaces montantes ou horizontales, tel que montrées sur la Figure 4.2. Cette limitation du procédé est majeure puisqu'elle requiert d'utiliser beaucoup

de matière excédentaire pour rendre possible l'impression de nombreux outillages. C'est alors que l'impression dynamique rentre en jeu pour contourner cette limitation.

Comme mentionné à la section 2.3.2, l'impression dynamique correspond à une impression non-planaire combinée à une direction d'impression variable. L'objectif est de changer la direction de l'impression au fur et à mesure pour permettre l'impression d'une surface descendante sur la pièce tout en restant dans l'intervalle de $\pm 45^\circ$ au niveau des cordons tels que montré sur la Figure 4.3. Sur cette Figure, l'impression débute à la verticale puis la tête d'impression s'incline au fur et à mesure de l'impression. Cela permet d'avoir un angle de dévers par rapport à la table allant jusqu'à 90° (correspondant à une surface horizontale).

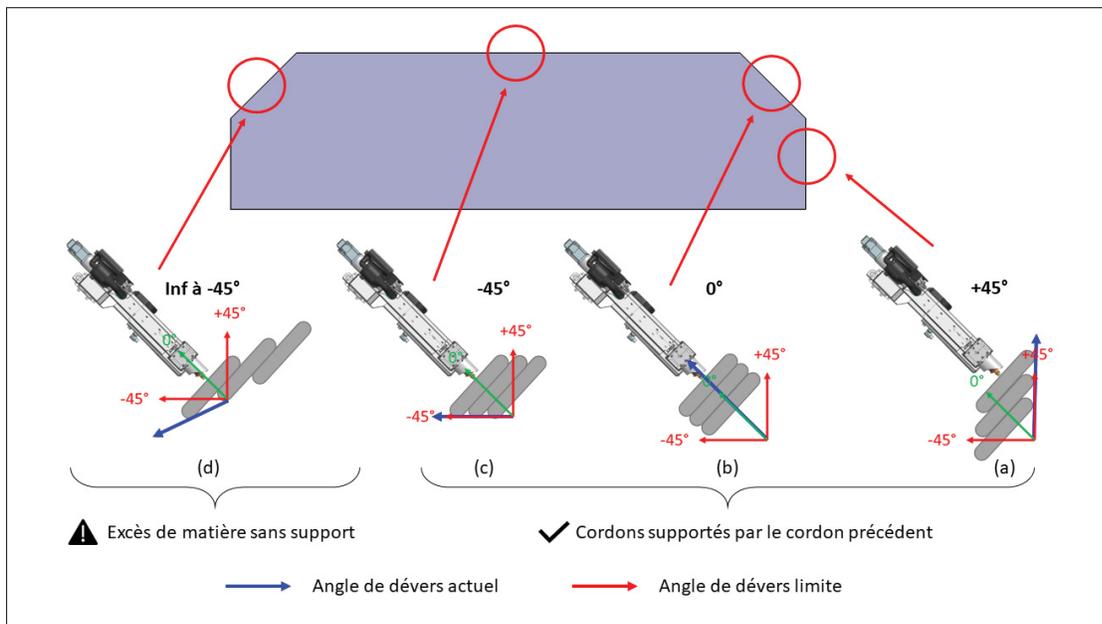


Figure 4.1 Profil d'impression possible avec une direction d'impression à 45° avec le robot CEAD

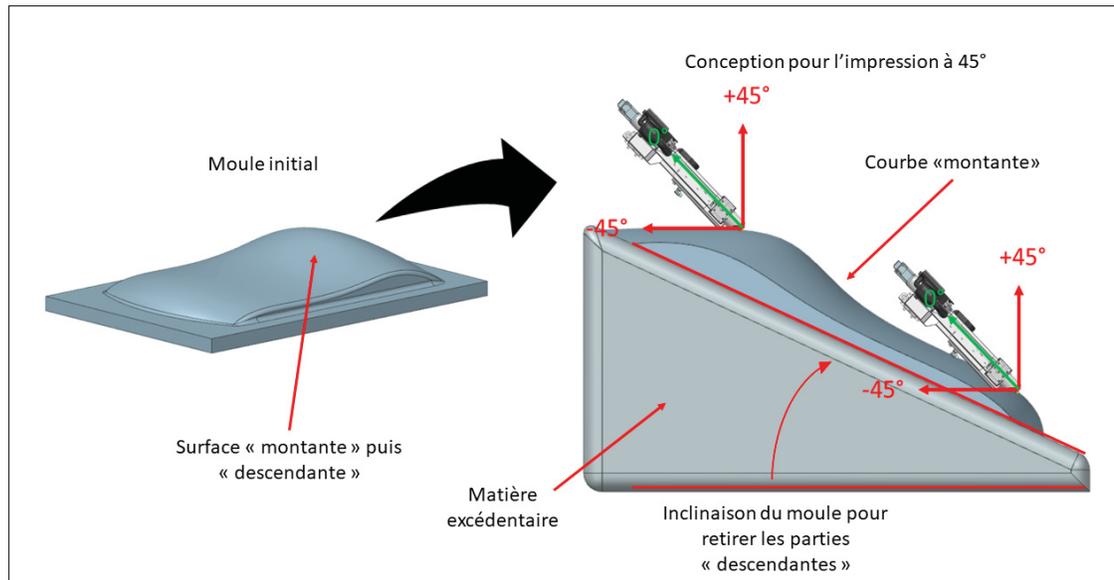


Figure 4.2 Inclinaison de la surface de moulage

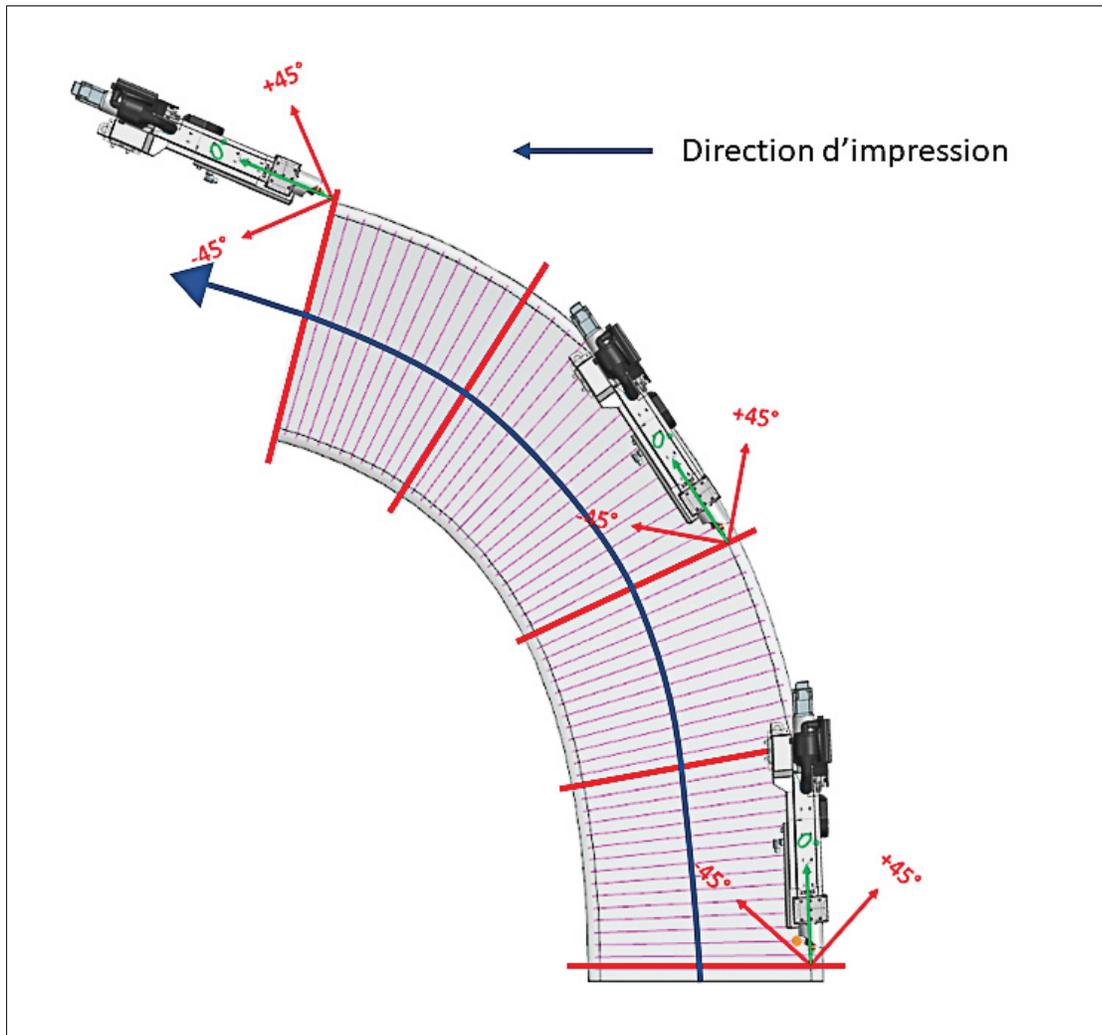


Figure 4.3 Tracé du chemin d'un tube courbé à l'aide de l'impression dynamique

4.1.1 Gestion du débit lors de l'extrusion

La gestion du débit lors de l'impression dynamique est extrêmement importante pour réaliser des impressions avec des couches ayant des épaisseurs qui varient au cours du parcours, comme présenté à la Figure 4.4. Il faut donc être en mesure de gérer la quantité de matière qui est déposée à chaque instant.

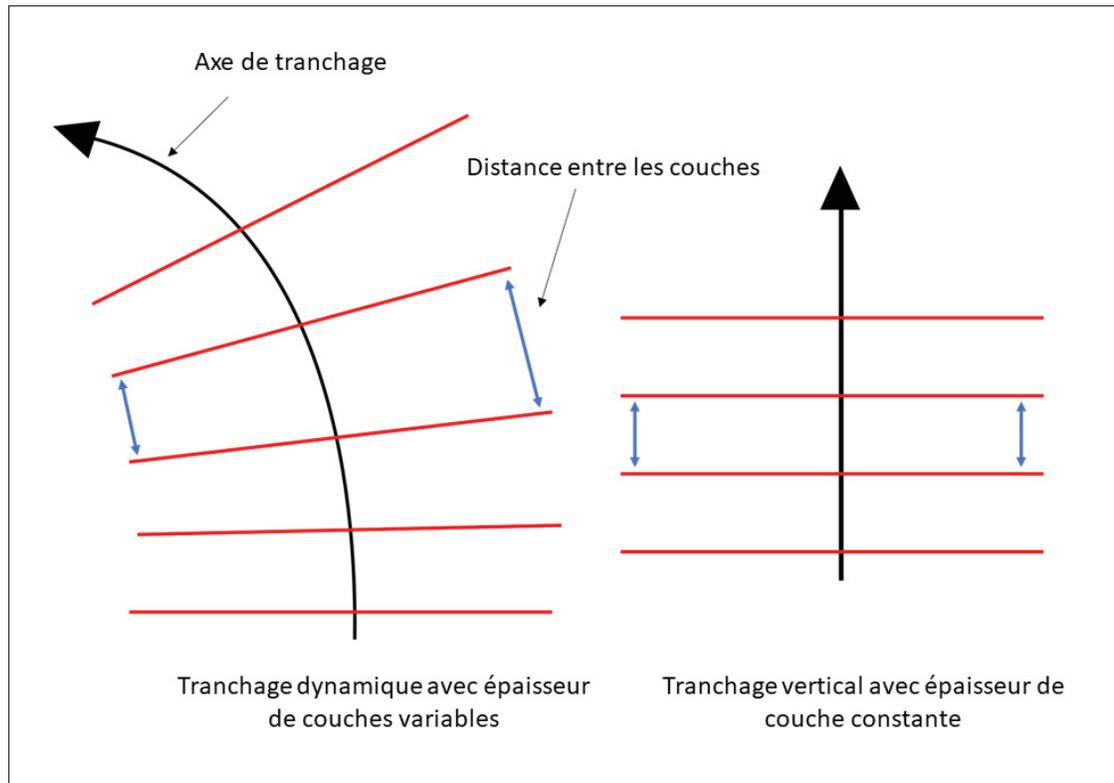


Figure 4.4 Différences d'épaisseurs des couches lors de l'impression dynamique

Pour cela, deux solutions sont envisageables. La première est de gérer la vitesse de dépose de la matière en accélérant lorsqu'il y a besoin de mettre moins de matière et en ralentissant lorsqu'il y a besoin de plus de matière (avec un débit constant). La seconde est de gérer la quantité de matière déposée au cours du parcours. Le logiciel Siemens NX semble être capable de gérer ces variations grâce à la librairie **UGII_CAM_ADD_THINWALL_FEEDRATES** qui renvoie un fichier texte qui comporte 2 colonnes, une pour l'épaisseur et l'autre pour le débit.

Cependant aucune donnée claire n'a été trouvée sur ce point et CEAD ne semble pas en mesure de réaliser cette intégration dans le machine kit (jumeau numérique de la machine dans NX) pour le moment. L'alternative trouvée est de modifier en interne le code-G afin d'inclure la modification du débit en gérant l'axe *E* en fonction du débit nécessaire.

4.1.2 Données à disposition

Le fichier texte à disposition, correspondant au code-G, à la structure suivante :

- Un en-tête donnant les informations nécessaires sur le post-processeur, le fichier correspondant au Code-G, les données de tranchage, les tolérances, etc.
- La structure des couches avec un en-tête puis pour chaque ligne les valeurs des différentes données. Les données suivantes s'y retrouvent :
 - N_i : numéro de ligne
 - X_i, Y_i, Z_i : coordonnées X,Y,Z de la buse
 - A_i, B_i, C_i : orientation de la buse
 - ELX_i : coordonnée du robot sur le rail
 - E_i : Incrément la pompe à engrenages
 - F_i : vitesse d'avance du robot

Ces données correspondent aux variables permettant de gérer les déplacements et rotations de l'extrudeuse ainsi que de l'axe gérant l'extrusion de matière tel que montré sur la Figure 4.5.

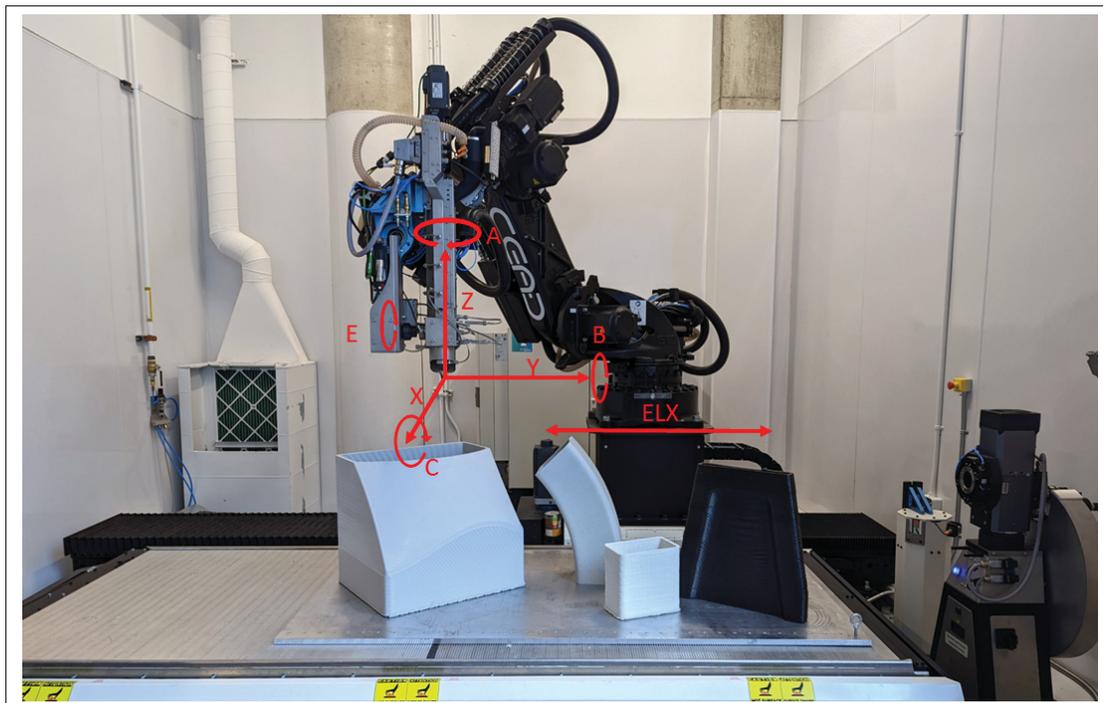


Figure 4.5 Correspondances des différentes variables du code-G avec les axes du robots

4.1.3 Récupération des données

Afin de pouvoir gérer le débit, il est nécessaire de récupérer les données dans le code-G, un script Python est créé pour cela (voir extrait en Annexe III). Dans ce script, une fonction a pour objectif de lire le fichier texte, de récupérer les données importantes de chaque ligne ainsi que de calculer le numéro de couche et d'opération de celle-ci sous forme d'une liste qui est insérée dans la liste nommée "Data", comme présenté sur la Figure 4.6.

Data = [... , [N_i , X_i , Y_i , Z_i , A_i , B_i , C_i , ELX_i , E_i , Num_{layer} , $Num_{opération}$,], ...]											
indice	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Num_{layer} = Numéro de couche i
 $Num_{opération}$ = Numéro de parcours sur la couche i

Figure 4.6 Liste des données récoltées grâce au code-G créé par le post-processeur de CEAD

4.1.4 Traitement des données

La méthodologie de traitement des données est particulièrement importante, c'est elle qui permet d'interpoler correctement la variation de débit nécessaire. La méthodologie retenue consiste à calculer la distance d'un point N sur la couche i avec le point M correspondant au point le plus proche sur la couche $i + 1$. Cela va permettre de mesurer pour tout point l'espace avec la couche suivante pour ajuster la quantité de matière à déposer tel que montré sur la Figure 4.7

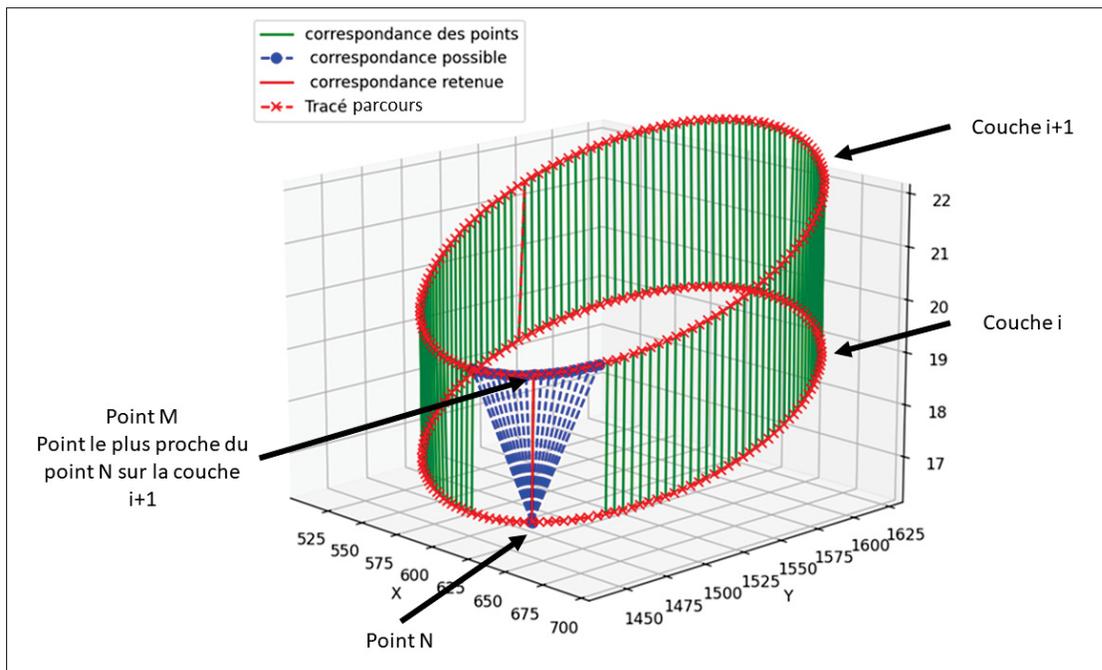


Figure 4.7 Correspondance des points de la couche N avec la couche $N + 1$

Pour cela il faut calculer la position de chaque point N , de la couche i , en calculant sa distance en suivant le parcours de la couche par rapport au début de celle-ci, ce qui donne sa position en terme de longueur. Cette longueur est ensuite divisée par la longueur du parcours de la couche pour avoir sa position relative sur la couche. Chaque point d'une couche possède ainsi sa position relative par rapport à la longueur du parcours. Cette donnée est ensuite ajoutée à la liste des données récoltées précédemment. Il faut ensuite calculer la distance entre le point N de la couche i avec son point M correspondant de la couche $i + 1$ en comparant leurs positions relatives.

La Figure 4.8 montre la méthode de calcul utilisée. A l'aide de la distance entre le point N et le point M , la variation de volume apportée (ΔV) par cette épaisseur de la couche au point N peut être calculée ainsi que l'incrément de débit (ΔE) de la pompe à engrenages associé en sachant que $1E$ est équivalent à $10cc$ de matière :

$$\Delta V = (D_{N/M} - \text{épaisseur}_{\text{couche}}) * \text{largeur}_{\text{couche}} * D_{N-1,N} \quad (4.1)$$

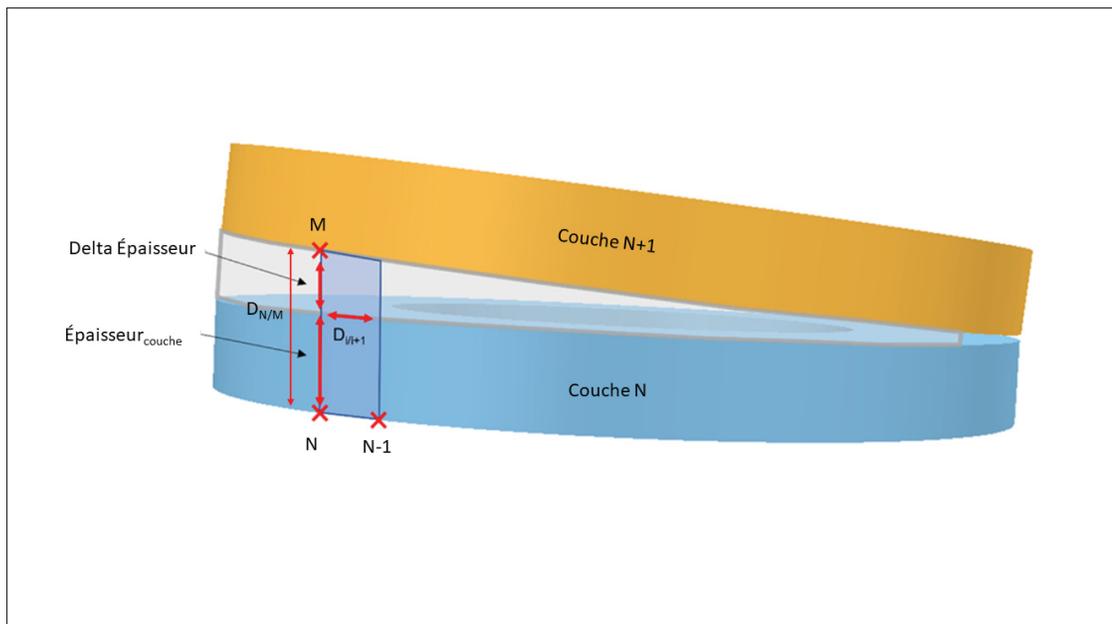


Figure 4.8 Calcul de l'épaisseur au point i de la couche N

L'équation obtenue est la suivante :

$$\Delta E = \frac{\Delta V}{1000} \quad (4.2)$$

Grâce à la variation de débit (ΔE), il est possible de recalculer la valeur de débit (E) pour chaque ligne du fichier et réécrire le nouveau fichier. La valeur de débit (E) est calculée par l'addition de 3 éléments :

- $E_{\text{ligne } i-1}$ correspond à la valeur de E de la ligne précédente
- $\Delta E_{\text{initial}}$ correspond au débit du volume du cordon supposé constant, soit :

$$V_{\text{initial}} = \text{largeur}_{\text{couche}} * \text{epaisseur}_{\text{couche}} * D_{i,i+1} \quad (4.3)$$

$$\Delta E_{\text{initial}} = \frac{V_{\text{initial}}}{1000} \quad (4.4)$$

- E_{ajoute} qui correspond au volume de matière à ajouter/supprimer qui n'est pas pris en compte initialement.

$$E = E_{\text{ligne } i-1} + \Delta E_{\text{initial}} + E_{\text{ajoute}} \quad (4.5)$$

Le fichier peut donc être réécrit avec la nouvelle valeur de débit (E) qui prend en compte la variation de débit, due à la non-parallélité du tranchage.

4.1.5 Impression d'un tube courbé à section carré

A l'aide du programme python réalisé, le tracé du tube courbé à section carrée (Figure 4.3) peut être générée en prenant en compte les variations d'épaisseurs de couches. Cette pièce a une section de 200 mm par 200 mm avec une hauteur de 600mm. L'orientation de la section commence à la verticale au début de l'impression pour finir à 45° à la fin de l'impression.

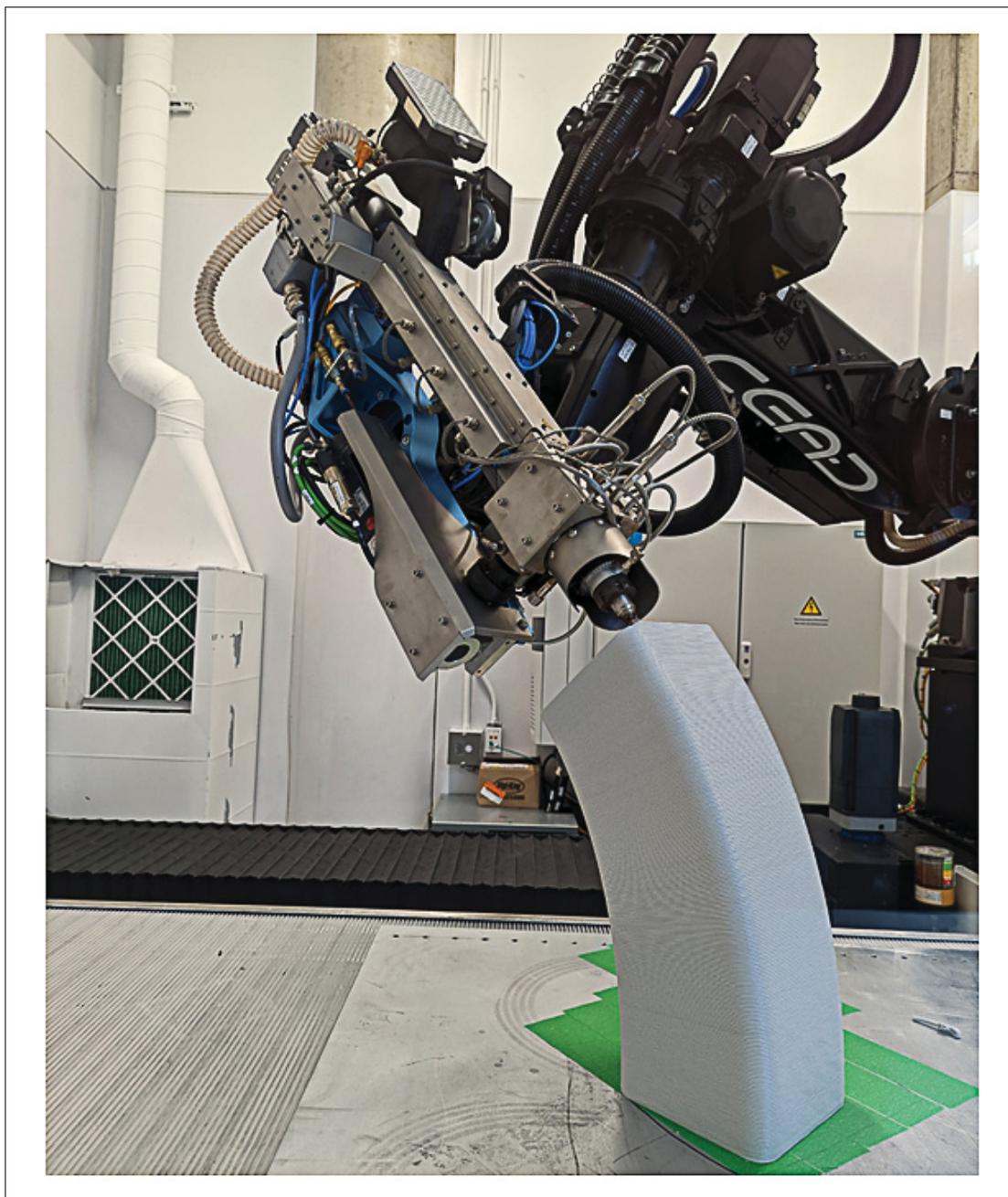


Figure 4.9 Impression du tube courbé à section rectangulaire

L'impression de la pièce présentée à la figure 4.9 a démontré le bon fonctionnement du programme python créé ainsi que le principe d'impression dynamique avec la cellule robotique AM Flexbot. Les couches ont bien une épaisseur variable correspondant visuellement à l'épaisseur voulue.

Quelques zones comportent de très légers excès de matière comme montrés sur la Figure 4.10 liés au placement des points dans le code-G généré par le post-processeur.

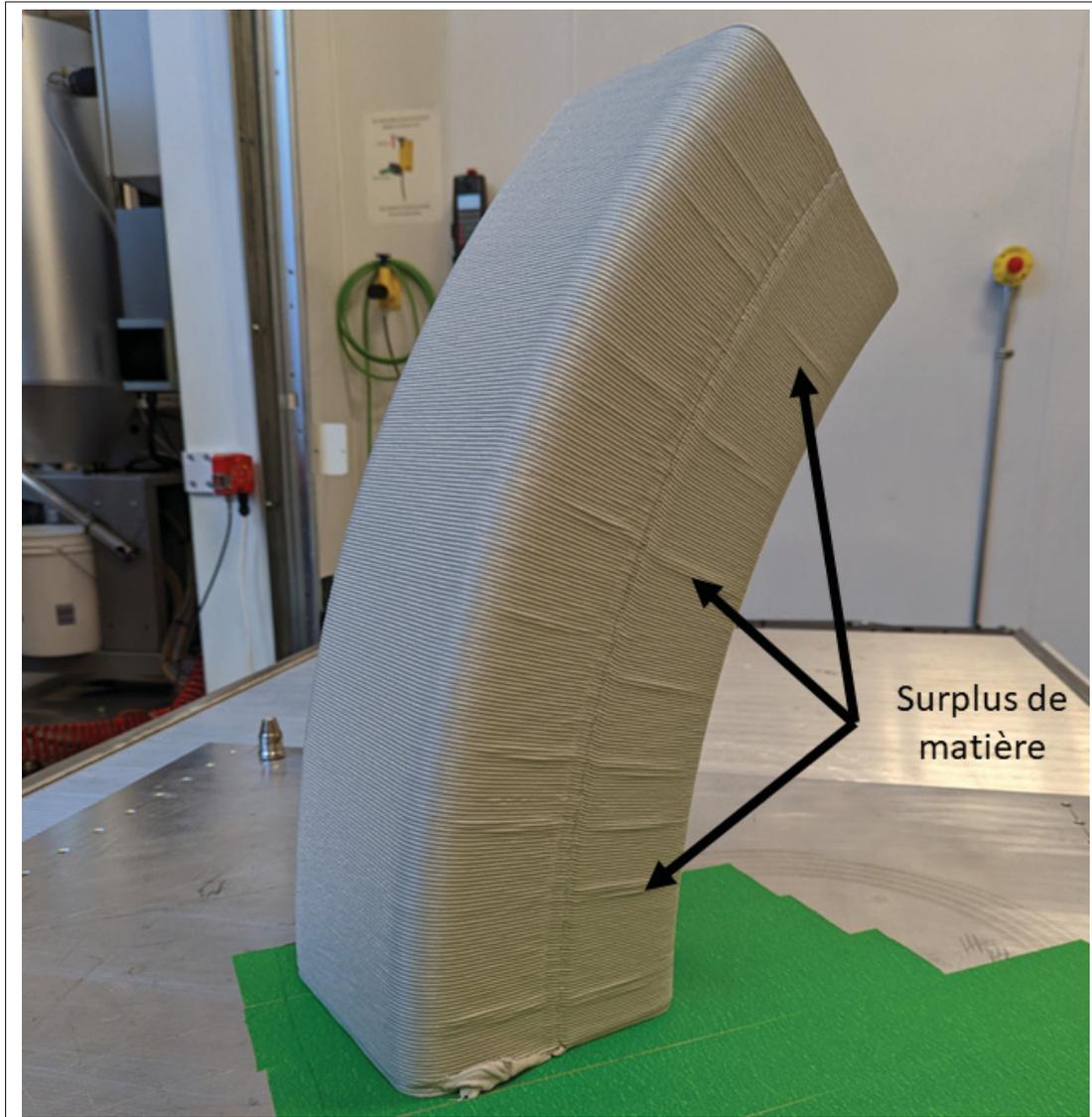


Figure 4.10 Présence de surplus de matière lors de l'impression dynamique

En effet, pour certaines parties, la distance la plus faible entre deux points peut être légèrement exagérée due à la façon dont le post-processeur place les points sur le contour. La Figure 4.11 montre que pour un point donné, le point correspondant sur la couche supérieur est décalé. Cela implique que le script interprète cette zone comme plus épaisse, donc ajoute plus de matière

localement. Cet excès de matière est un problème esthétique qui ne pose pas de problème pour la fabrication d'outillage étant donné que la surface de moulage est usinée par la suite. Dans le cas de pièce esthétique, il est possible de réduire ce phénomène à l'aide de différentes méthodes. Il est possible de générer un code-G avec NX ayant des points plus rapprochés les uns des autres ou bien de créer un script qui interpole des points entre les points existants du code-G. La gestion de la distance maximale entre deux points permet ainsi d'augmenter la précision du script et donc de l'ajustement de la quantité de matière, le tout au détriment du temps de calcul du script.

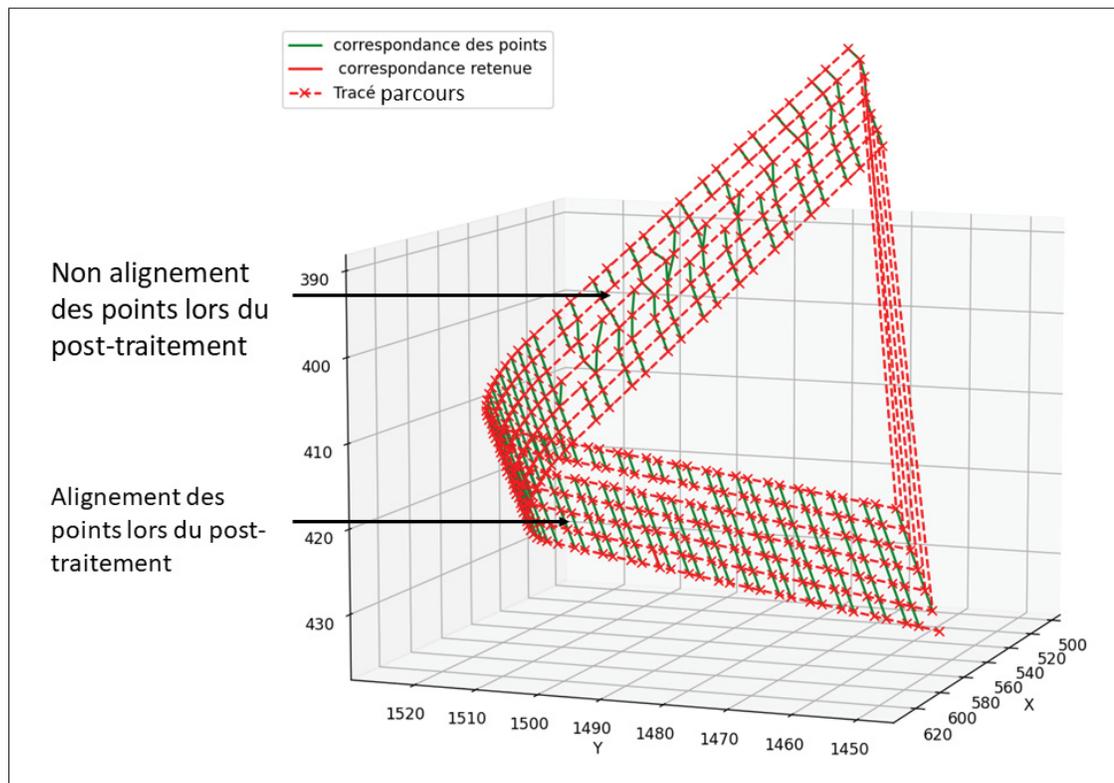


Figure 4.11 Alignement des points par le post-processeur dans Siemens NX

4.2 Développement d'une buse à 45°

Cette section présente le développement d'une buse coudée à 45° en détaillant sa conception et sa fabrication ainsi que les essais d'impression réalisés avec celle-ci.

4.2.1 Utilisation d'une buse à 45°

La section 4.1 démontre le potentiel de l'impression dynamique grâce à la rotation de l'extrudeuse lors de l'impression. Cependant, l'impression dynamique doit tenir compte des points suivants :

- L'inclinaison de l'extrudeuse peut mener à d'éventuelles collisions avec la table d'impression. L'extrudeuse a été conçue pour imprimer jusqu'à 45°, la Figure 4.12 (a) montre que l'extrudeuse atteint sa limite à cette inclinaison et que ces composants rentreraient en collision avec la table si l'inclinaison augmentait à plus de 45°.
- Dans le cas de la cellule de l'ÉTS, l'espace est restreint par les murs qui l'encadrent. Avec l'extrudeuse inclinée à 45°, le volume d'impression disponible est réduit puisque celle-ci rentrerait en collision avec l'enceinte de la cellule si l'extrudeuse à 45° était placée au bout de la table d'impression. (Figure 4.12 (b)).
- L'approvisionnement en granule de l'extrudeuse est limité par l'inclinaison de celle-ci, puisque la trémie fonctionne avec la gravité qui fait naturellement descendre les granules dans la vis. Le matériau ne rentre donc pas correctement dans la vis sans fin lorsque la tête est trop inclinée. De plus, la lecture des données des capteurs permettant d'assurer qu'il y a suffisamment de matière est faussée par l'inclinaison de la trémie.

Pour éviter les risques mentionnés précédemment, pouvoir réaliser une impression à 45° avec l'extrudeuse à la verticale serait avantageux. Pour cela, il suffit de développer une buse coudée ayant un angle de 45°. Par ailleurs, avec cette buse à 45°, il serait possible d'incliner l'extrudeuse jusqu'à 45° et ainsi obtenir une impression à l'horizontale sans aucun dévers au niveau des cordons.

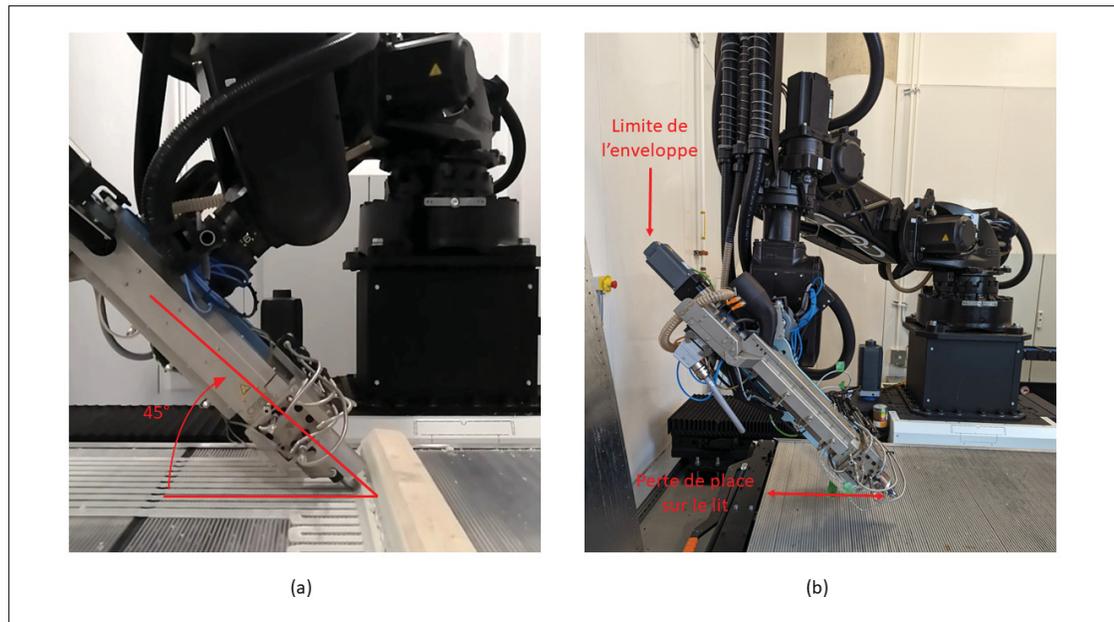


Figure 4.12 Limites de placement de l'extrudeuse : (a) limite selon l'axe Y, (b) limite en orientation à cause des composants et de son environnement

4.2.2 Conception et fabrication d'une buse à 45°

Une buse coudée à 45° est conçue selon le cahier des charges suivant :

- Avoir un système de fixation compatible avec l'extrudeuse actuelle sans modification de celle-ci afin de permettre un changement rapide de buse.
- Permettre une mise en position de l'orientation de la buse par rapport à l'extrudeuse étant donné qu'elle n'est pas axisymétrique contrairement aux buses droites.
- Avoir des dimensions similaires aux buses actuelles afin de conserver le même niveau de perte de chaleur au niveau de la buse.
- Éviter au maximum les variations brusques de sections et de courbures de la buse pour obtenir un flux de matière le moins perturbé possible.

Ce cahier des charges a permis de concevoir la buse présente à la Figure 4.13. La buse conçue a la même longueur et les mêmes épaulements que les buses droites, des surfaces planes ont

été rajoutées sous les épaulements afin de pouvoir orienter la buse lorsqu'elle sera montée sur l'extrudeuse. Une première version de la buse a été réalisée avec un diamètre de 9mm, car c'est une buse relativement polyvalente et lorsque son utilisation aura été approuvée, une gamme plus complète sera à concevoir. En revanche cette conception est particulièrement complexe à réaliser avec des opérations d'usinages classiques au niveau de la surface interne. C'est pourquoi, la réalisation de la buse par fabrication additive métallique avec le procédé SLS a été choisie. Une fois imprimée, les opérations d'usinage sur les surfaces utiles de la buse ont été réalisées comme le montre la Figure 4.14.

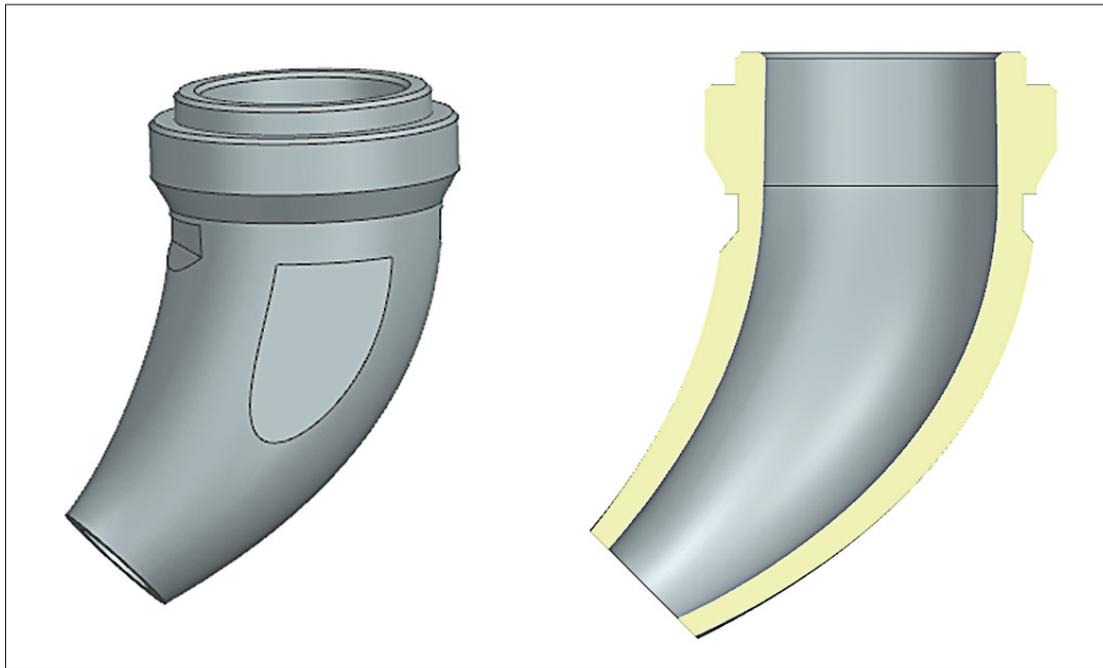


Figure 4.13 Conception de la buse coudée à 45° avec une vue en coupe et une vue isométrique



Figure 4.14 Impression de la buse coudee à 45° réalisée par fusion laser sur lit de poudre

4.2.3 Impression d'une boîte simple avec une buse à 45°

Afin de valider cette buse à 45° pour l'utilisation et l'adaptation au système CEAD, une boîte simple à 45° est imprimée avec la buse droite de 9mm et avec la buse coudee de 9mm afin de pouvoir comparer les deux méthodes d'impression. La boîte imprimée en PIPG avec la buse régulière ne pose aucun souci d'impression (Figure 4.15). En revanche, différents problèmes ont été rencontrés avec l'utilisation de la buse à 45°. La Figure 4.16 présente le résultat du premier essai de boîte avec la buse à 45°, réalisée avec du Polycarbonate de Lavergne. Malheureusement, un décollement de la boîte par rapport au lit a causé quelques irrégularités des cordons et un léger décalage au milieu de l'impression. De plus, cette première buse a été imprimée avec une épaisseur de paroi trop fine, ce qui a causé une déformation sur le dessous de celle-ci à force de frotter sur le radeau. La Figure 4.16 montre l'aplatissement de cette buse.

Une seconde buse avec des parois plus épaisses (épaisseur similaire aux buses régulières) a été imprimée (Figure 4.14) pour le second essai. Dû à un changement de monture de l'extrudeuse entre temps, il a été nécessaire de modifier manuellement le code-G (décalage en Z et rotation

verticale de l'extrudeuse) pour réimprimer cette boîte car le post-processeur de cette nouvelle monture ne prenait pas en compte cette buse. La Figure 4.17 montre l'impression de la seconde boîte, en PIPG, avec la buse à 45°. Les cordons imprimés sont de bonne qualité et ne possèdent pas d'irrégularités comme le montre la figure 4.17. Malheureusement, à cause des changements fait manuellement dans le code-G, la collision des capteurs de la pompe à engrenages avec la pièce n'a pas pu être anticipée. L'impression a ainsi dû être arrêtée.

En conclusion, le manque d'un post-processeur prenant en compte la buse à 45° n'a pas permis de réaliser une boîte complète et des essais approfondis. Cependant les premières utilisations de la buse à 45° sont très prometteuses car elle permet de réaliser des impressions à 45° avec des cordons ayant la même qualité qu'avec les buses régulières.



Figure 4.15 Impression de la boîte avec la buse régulière

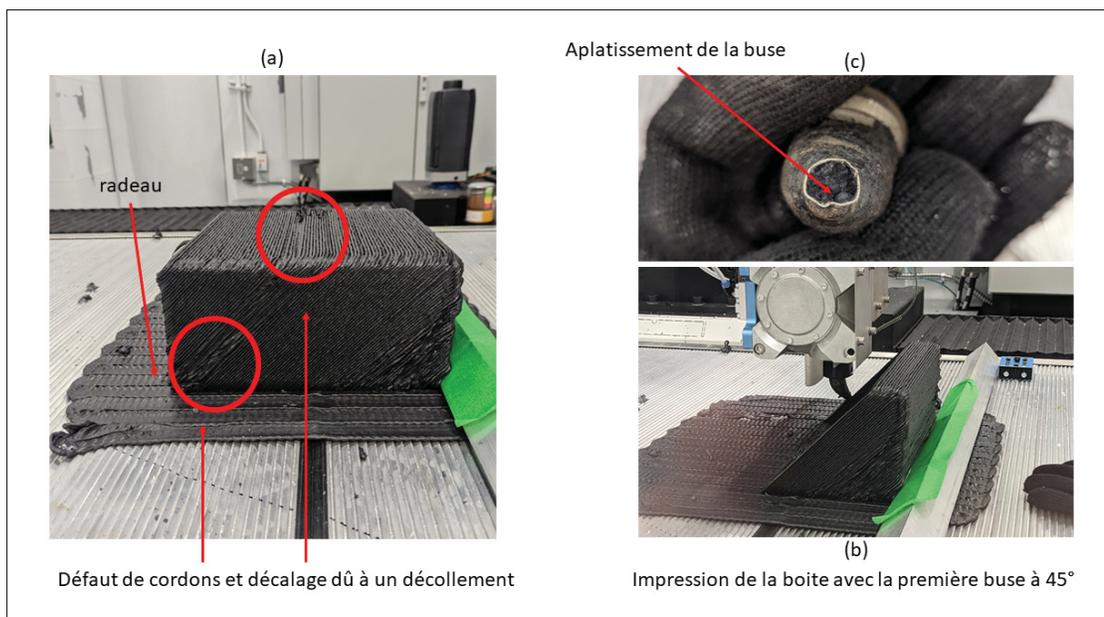


Figure 4.16 Impression de la première boîte avec la buse à 45° (a) et (b), déformation de la buse (c)

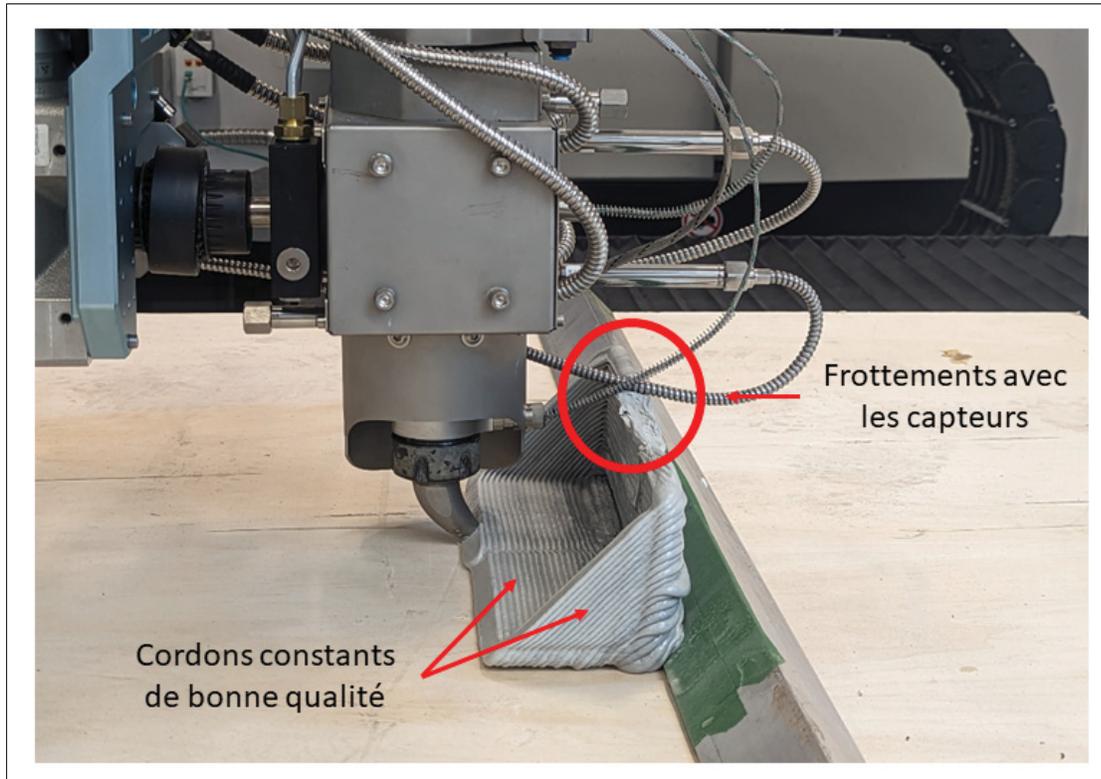


Figure 4.17 Impression de la seconde boîte avec la buse à 45° ayant des cordons de bonne qualité et une collision avec l'extrudeuse

4.2.4 Exemple théorique d'une pièce combinant buse à 45° et impression dynamique

Le premier objectif de la buse à 45° est d'optimiser l'impression usuelle à 45° de pièces en améliorant le transport des granules, en minimisant le risque de collisions entre l'extrudeuse et la table d'impression et en augmentant le volume d'impression disponible sur le lit d'impression comme expliqué à la section 4.2.1.

Le second objectif de cette buse est de la combiner avec l'impression dynamique afin d'imprimer des pièces tranchées à 45° ayant des profils montants et descendants tout en conservant l'extrudeuse dans une plage de plus ou moins 45° par rapport à la verticale. La Figure 4.18 présente la simulation sur NX d'une pièce ayant un profil montant puis descendant tranché avec une courbe guide débutant à 45° puis s'inclinant pour rendre possible l'impression de la section

avec le profil descendant. L'impression de cette pièce n'a pas été possible à cause du nouveau post-processeur qui ne prend pas encore en compte la buse à 45°. Cependant la simulation permet d'avoir une bonne idée du résultat attendu étant donné que les deux méthodes ont été testées séparément avec succès.

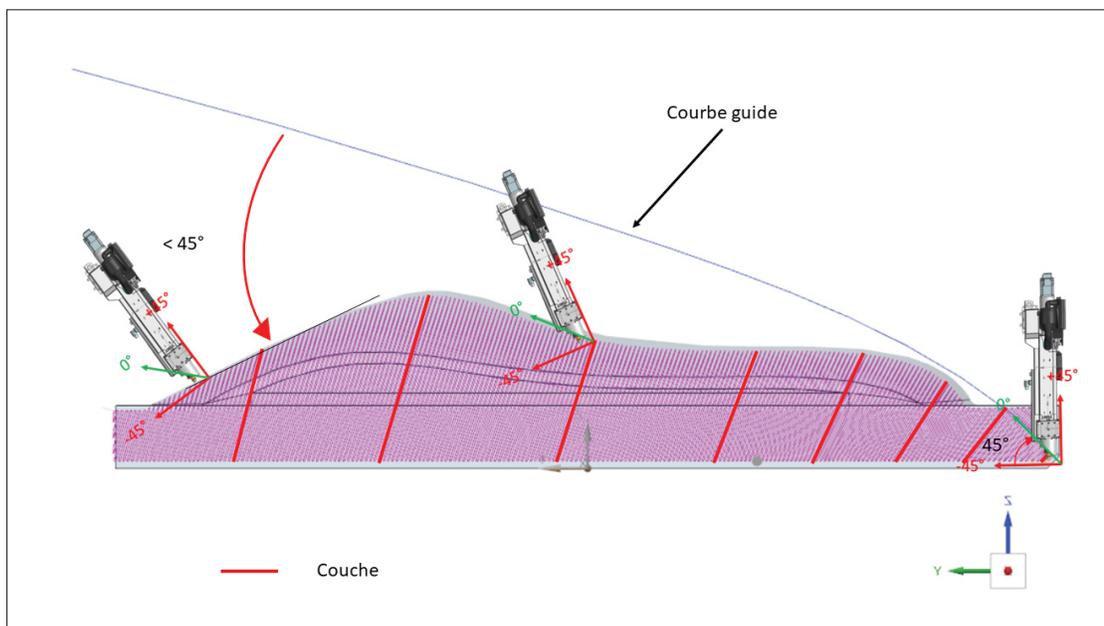


Figure 4.18 Conception d'une pièce combinant impression dynamique et buse à 45° permettant de valider le concept

CHAPITRE 5

VALIDATION DES MÉTHODES DE CONCEPTION ET D'IMPRESSION DÉVELOPPÉES

5.1 Présentation de l'outillage de validation des méthodes

L'outillage présenté à la section 2.3.3 pour valider les méthodes développées au chapitre 4 et les comparer avec les méthodes d'impression usuelles (voir section 2.2.3 et chapitre 3) est un outillage imprimé en polycarbonate Dahltram® C-250CF fourni par Airtech (voir section 2.2.4). Le polycarbonate d'Airtech est choisi pour cet outillage puisqu'il possède un rapport performance coût intéressant (utilisation jusqu'à 120°C) et que l'outillage du diffuseur (chapitre 3) a permis d'acquérir de l'expérience avec ce polymère. Le polycarbonate choisi est celui d'Airtech puisqu'il est spécialement conçu pour l'impression et qu'il possède des propriétés plus intéressantes notamment grâce aux renforts en fibres de carbone (fibres de verre pour le polycarbonate de Lavergne). L'outillage est imprimé en doubles cordons avec une buse de 6mm (cordons de 10mm x 2.5mm) donnant une épaisseur de coque d'environ 20mm. La géométrie de l'outillage a été définie dans un projet collaboratif entre l'ÉTS, le CTA et un partenaire industriel, dont l'objectif est d'évaluer la performance et la rentabilité de cette technologie. Cet outillage a été choisi pour les différents critères et défis pour l'impression mentionnés à la section 2.3.3 :

- La taille de l'outillage requiert environ 14kg de granules, ce qui permet de faire plusieurs pièces avec la quantité de matière disponible.
- L'outillage est imprimable avec l'impression verticale et l'impression dynamique. L'impression verticale est réalisable puisque l'outillage possède des angles de dévers compris entre +/-45° (Figure 5.1). L'utilisation de l'impression dynamique permet ensuite d'améliorer les zones qui ont un changement brusque d'angle de dévers avec des passages à angle droit de +45° à -45° (Figure 5.1) en y diminuant l'angle de dévers au niveau des cordons. Étant donné que la pièce est de petites dimensions, il n'est pas possible d'améliorer toutes les surfaces puisque cela engendrerait des changements de courbures trop important pour la courbe guide

(voir figure 5.6). La Figure 5.2 présente la partie sur laquelle se focalise l'amélioration des surfaces.

- L'outillage possède des changements brusques de directions en passant avec un angle droit d'un dévers de $+45^\circ$ à -45° permettant d'atteindre les limites du procédé de fabrication (Figure 5.1) tel qu'expliqué à la section 3.1.2. La méthode d'impression dynamique est susceptible de permettre un passage plus souple de ces zones.

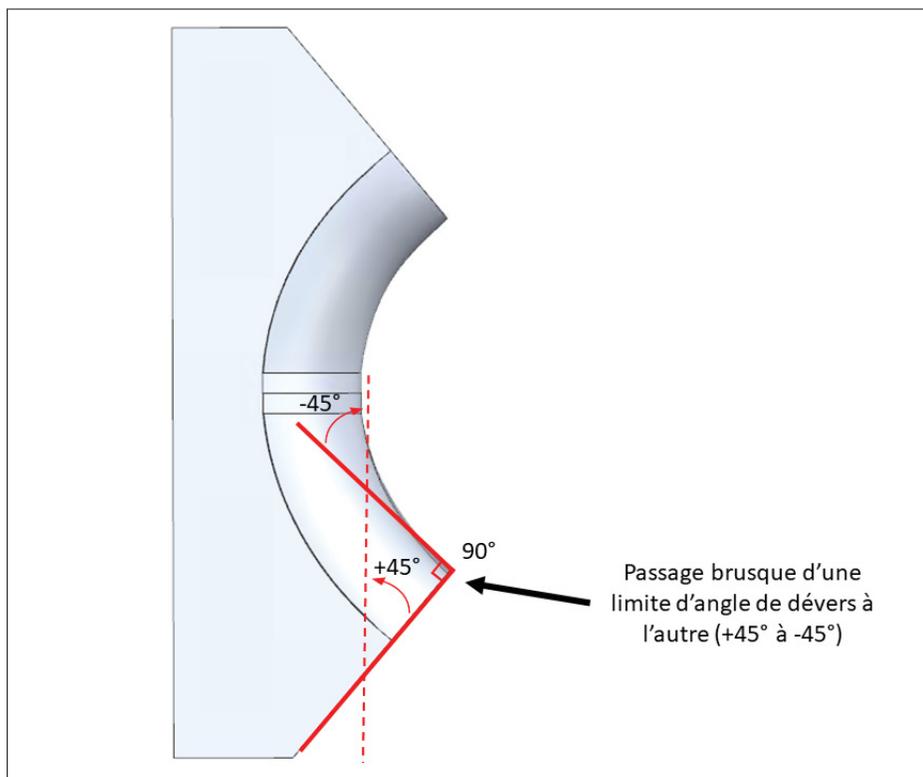


Figure 5.1 Vue de côté de l'outillage montrant la variation brusque de surfaces de $+45^\circ$ à -45°

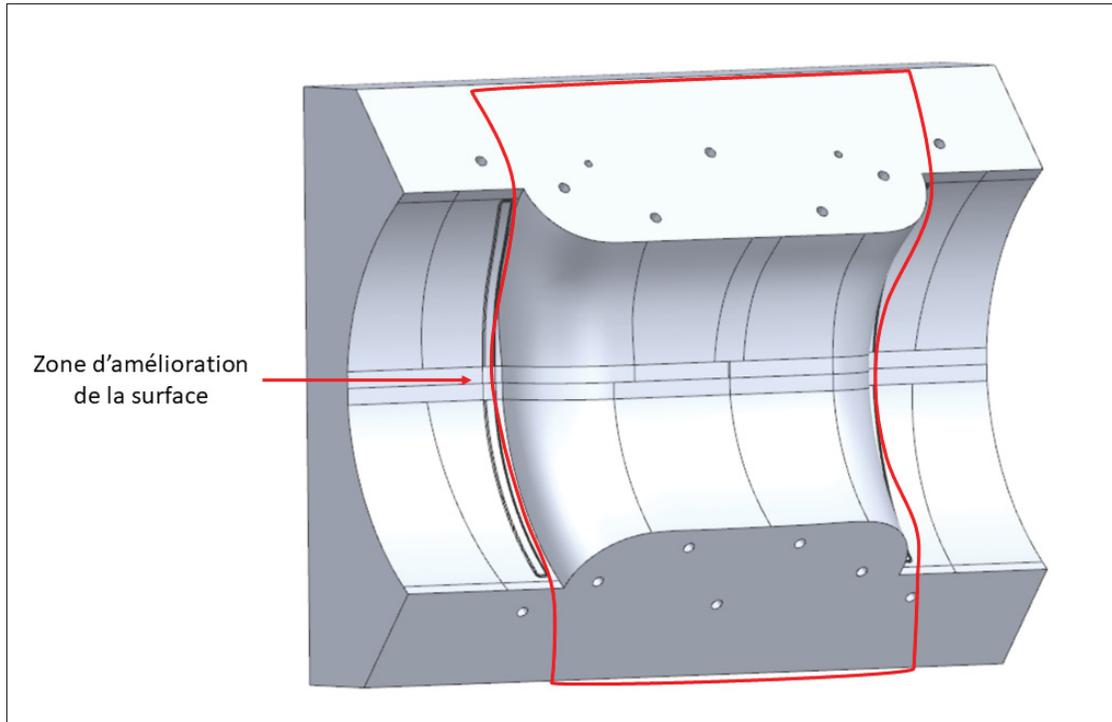


Figure 5.2 Zone d'amélioration de la pièce imprimée avec la méthode d'impression dynamique

5.2 Adaptation de la géométrie de l'outillage et validation des paramètres d'impression

Cette géométrie d'outillage demande de relever des défis lors de l'impression, communs aux deux méthodes d'impression ou spécifiques à chacune d'elles. La géométrie requiert des angles droits à usiner sur la surface utile du moulage. Cependant, il est nécessaire d'y ajouter des rayons pour l'impression, plus ces rayons sont grands moins l'extrudeuse a besoin de ralentir pour les réaliser. Il est ainsi nécessaire de maximiser la dimension des rayons tout en s'assurant qu'il y reste suffisamment de matière pour l'usinage tel que présenté sur la Figure 5.3. Avec un surplus d'usinage de 5mm et une paroi de 20mm, un congé concave de 15mm permet de conserver 15mm de matière. Un congé de 15mm sur un congé convexe permet d'obtenir tout juste l'angle droit nécessaire théoriquement et une épaisseur de 27,4mm. Dans les faits, il y a toujours un

excès de matière dans les coins comme le montre la figure 3.17. L'obtention de l'angle droit est ainsi assuré avec ce congé de 15mm.

Il faut déterminer les paramètres tels que la vitesse d'impression et la durée de couche qui permettent d'obtenir une bonne impression avec ce polymère. Des essais d'impression sont réalisés afin de voir quel est le comportement du polymère à l'impression et de déterminer les bons paramètres pour le matériau. Pour cela, deux boîtes de différentes tailles sont imprimées avec une buse de 6mm, les paramètres et objectifs sont résumés dans le tableau 5.1 et présentés à la Figure 5.4. Une première boîte de petites dimensions est imprimée pour définir les paramètres d'impression. Une plus grande boîte est ensuite imprimée pour affiner les paramètres obtenus précédemment dans des conditions plus proches de la dimension des outillages imprimés. Cela permet notamment d'augmenter la vitesse d'impression tout en ayant une durée de couche et des congés similaires à la première boîte. Des échantillons de ces boîtes sont ensuite usinés pour s'assurer du fini de surface obtenu, notamment au niveau des porosités internes aux cordons.

La Figure 5.5 montre que la surface possède des porosités lorsque le polymère est imprimé à faible vitesse. Afin d'obtenir un fini de surface sans porosité, il est nécessaire d'imprimer ce polymère avec une vitesse minimum d'environ 1920 mm/min pour la buse de 6mm. Ces boîtes permettent ainsi de définir les paramètres d'impression qui vont être utilisés pour l'impression de l'outillage. En résumé, les paramètres retenus sont une température d'extrusion de 338°C, une vitesse d'au moins 1920mm/min, des cordons doubles de 10mm de large par 2,5mm de haut et des congés de 15mm sur la surface de moulage.

Tableau 5.1 Récapitulatif des essais réalisés avec leurs objectifs et paramètres

	boîte 1	boîte 2
Dimensions	boîte 200mm x 200 mm	boîte 1200mm x 150mm
Cordons	Cordons doubles (2 x 10mm)	
Objectifs	Définir les paramètres d'impression (vitesses, température, durée de couche etc.)	Affiner les paramètres sur une pièce ayant des dimensions plus représentative de l'outillage, avoir une idée du comportement en distorsion d'une longue pièce et de l'état des coins à grande vitesse d'impression.
Paramètres	Vitesse croissante de 960mm/min à 2400mm/min, températures de zones de la fiche technique (277°C-338°C)	vitesse constante à 3200mm/min, durée de couche de 45sec, températures de zones de la fiche technique (277°C-338°C)

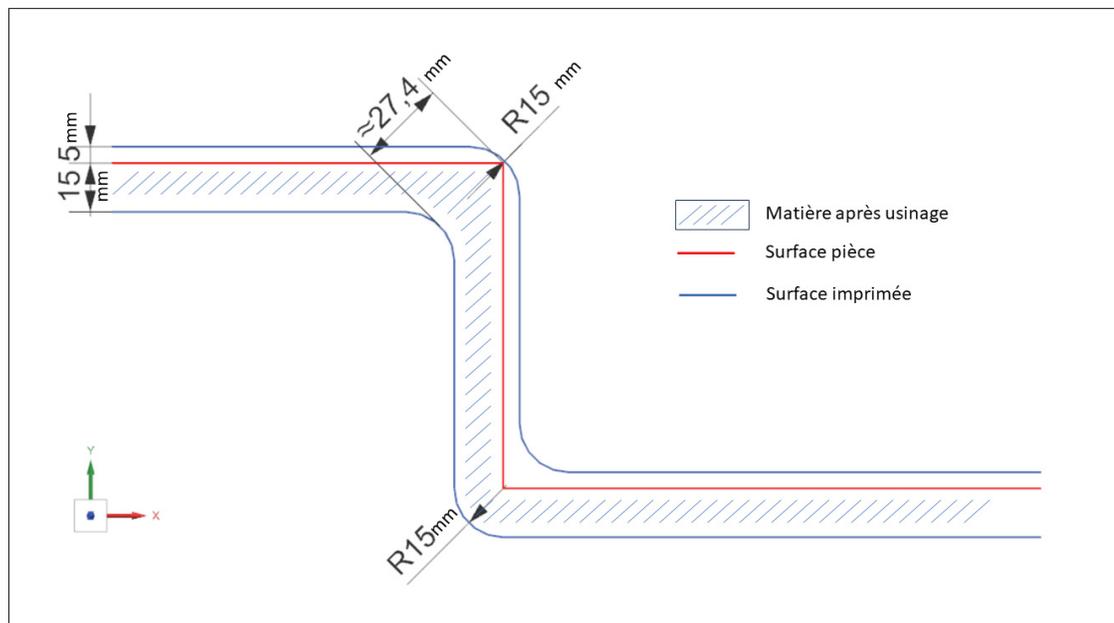


Figure 5.3 Dimensionnement des congés convexes et concaves pour l'outillage

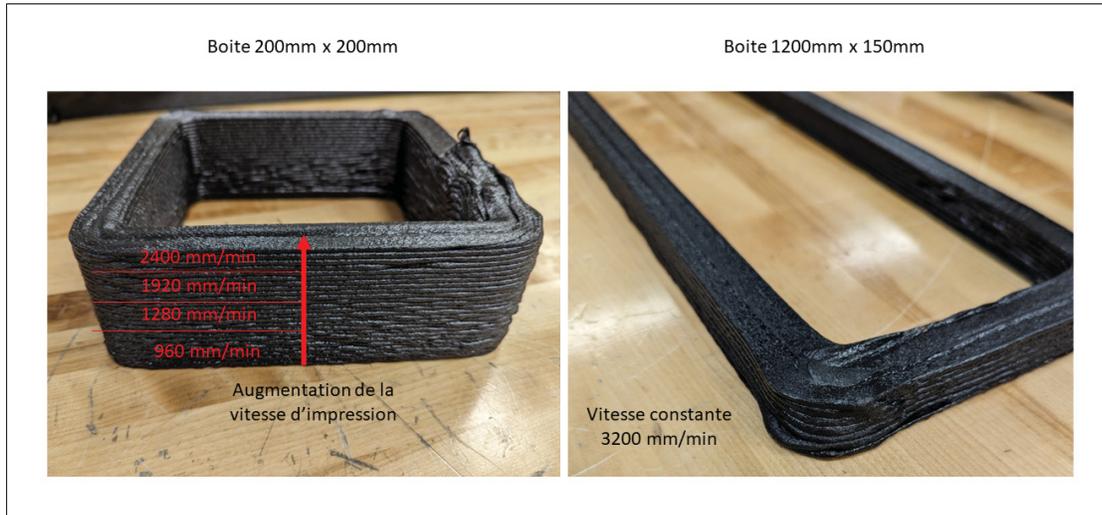


Figure 5.4 boîtes de test du Dahltram® C-250CF fourni par Airtech

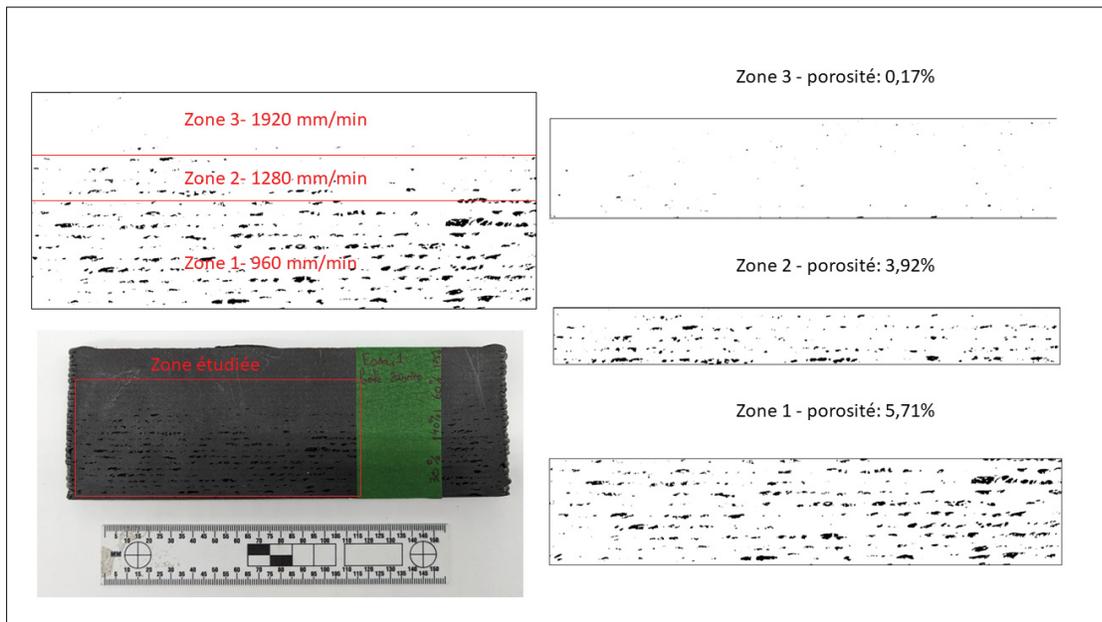


Figure 5.5 Fini de surface et porosités dans la boîte de test du Dahltram® C-250CF

Concernant l'impression dynamique, les défis sont reliés à l'élaboration de la courbe guidant le plan d'impression (l'orientation de la buse). La Figure 5.6 illustre deux types de courbes guides : la « courbe idéale » et la « courbe choisie ». La courbe idéale suit globalement la

forme de la surface de moulage en minimisant au maximum l'angle de dévers sur l'ensemble de la surface utile, ce qui évite tout effondrement potentiel des couches (tel qu'expliqué à la section 3.1.2). Toutefois, cette trajectoire change brusquement d'orientation (courbure trop faible) générant ainsi des cordons trop minces d'un côté et trop épais de l'autre (voir Figure 5.7). Avec l'utilisation de la buse de 6mm, CEAD préconise des hauteurs de cordons entre 1,5mm et 3mm pour obtenir une bonne adhésion des cordons (voir la section 1.2.4). Dans le but de respecter ces limites d'épaisseur de cordons, la courbe choisie préconise une trajectoire qui excède légèrement les limites d'angle de dévers dans certaines zones (environ +/-10°) risquant, toutefois, un effondrement potentiel des cordons (voir Figure 5.14).

La Figure 5.8 montre les modifications ainsi apportées à l'outillage initial tel que les renforts, la coque pour les doubles cordons ainsi que les congés. La Figure 5.9 présente une vue en coupe des modifications avec les dimensions choisies lors de la conception afin d'obtenir le bon chevauchement entre les cordons des deux parcours ainsi qu'un bon contact entre les renforts et la surface de moulage (voir Annexe I pour l'explication détaillée).

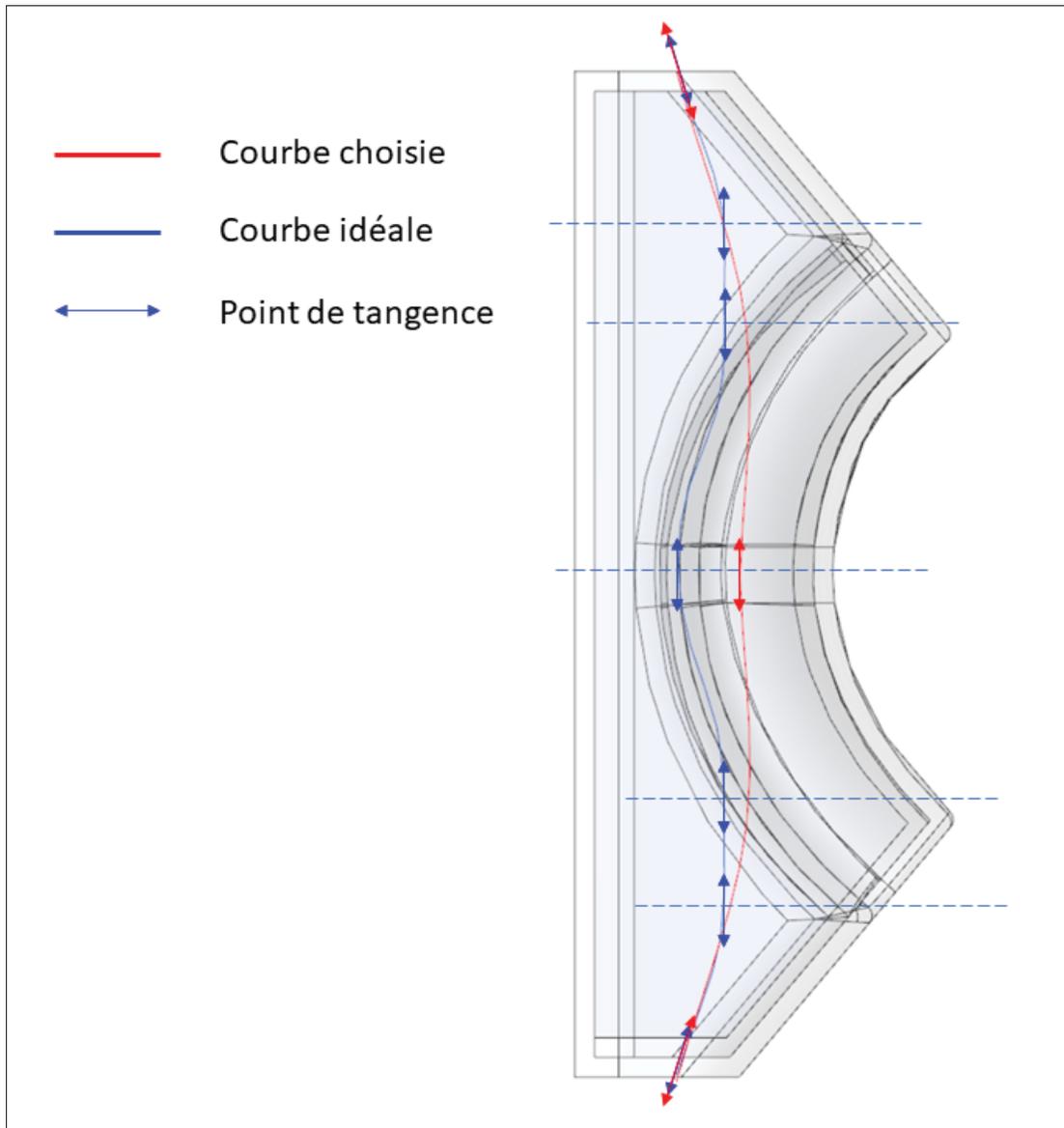


Figure 5.6 Choix de la courbe guide pour le tranchage de l'outillage

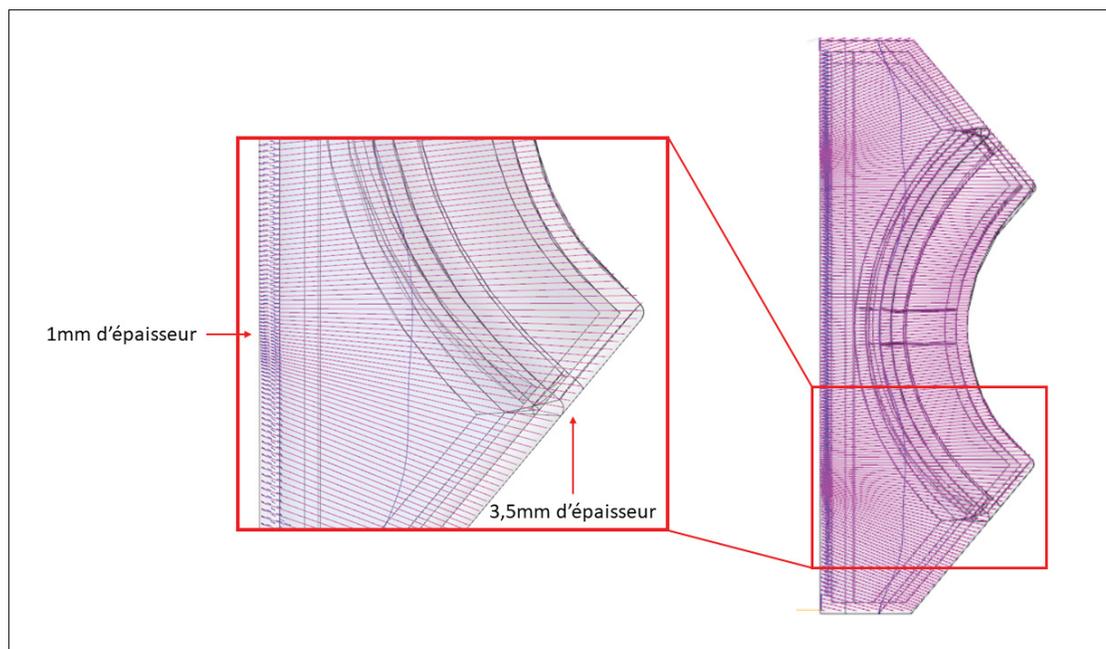


Figure 5.7 Variations de la hauteur des cordons dû au faible rayon de courbure

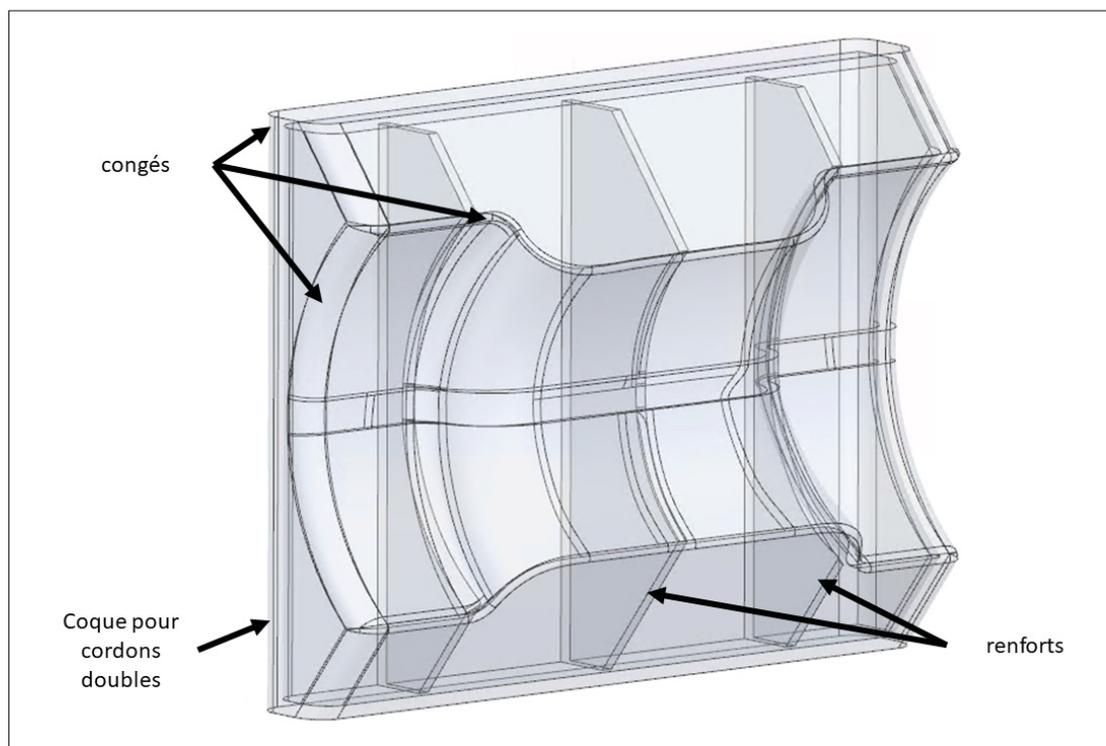


Figure 5.8 Modification de la conception de l'outillage initial pour l'impression

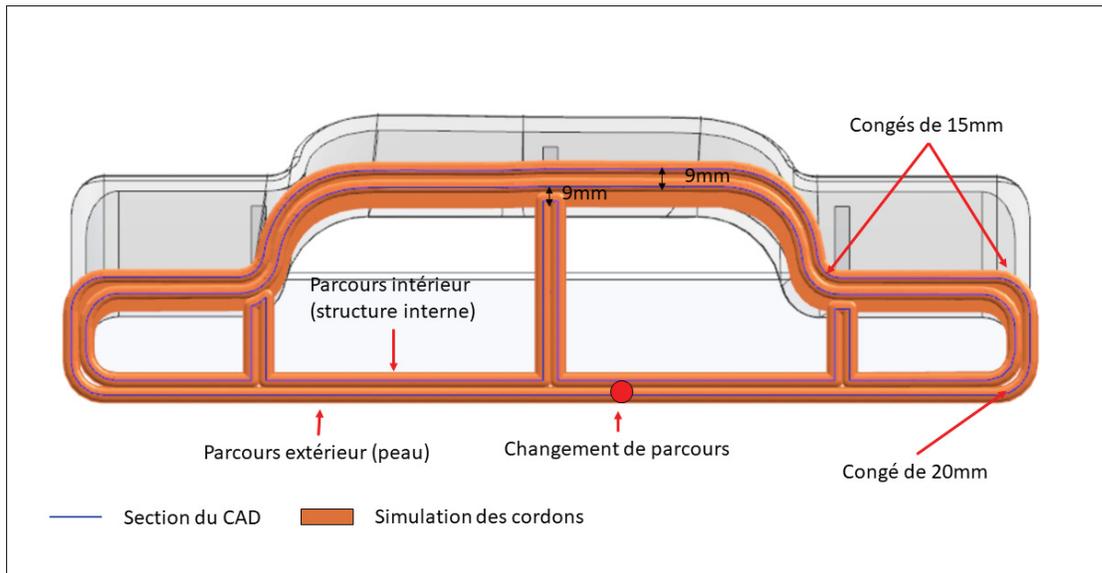


Figure 5.9 Vue en coupe des modifications de la conception de l'outillage initial pour l'impression

5.3 Impression et post-cuisson des outillages

Après avoir complété le tranchage des deux méthodes, les deux pièces ont été imprimées et post-cuites. Selon la documentation technique du fournisseur (section confidentielle de la fiche technique), une post-cuisson est conseillée pour le relâchement des contraintes internes. Les deux outillages sont ainsi placés ensemble dans un four pour la post-cuisson pendant 7,5 heures à 141°C avec une rampe de chauffe et de refroidissement de 1°C/min. Des analyses dimensionnelles ont été réalisées pour comparer les méthodes d'impression et les effets de la post-cuisson afin d'approuver la conformité ou non des outillages.

5.3.1 Impression verticale de l'outillage

La Figure 5.10 montre l'outillage une fois imprimé. L'impression à la verticale n'a pas posé de problèmes particuliers hormis des défauts esthétiques causés par un léger surplus de matière au niveau des coins. Les changements brusques à 90° n'ont pas posé de problèmes avec le congé de 5mm définis lors de la conception. La Figure 5.11 présente ces deux points.

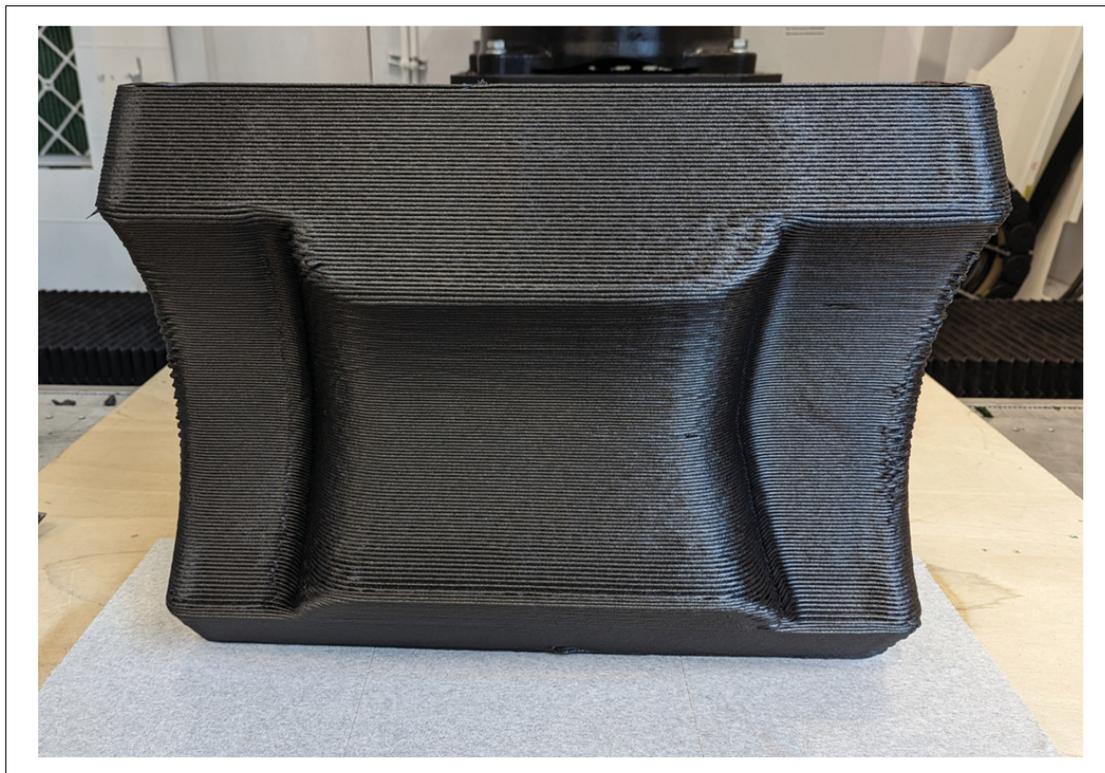


Figure 5.10 Impression verticale de l'outillage

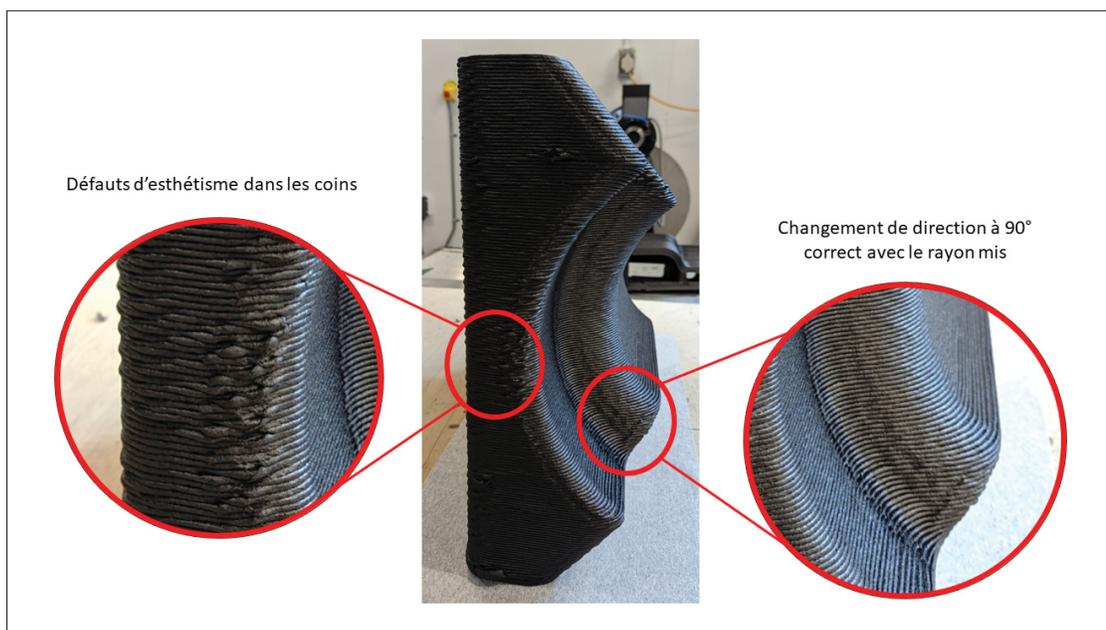


Figure 5.11 Agrandissement de zones sur le moule imprimé à la verticale

5.3.2 Impression dynamique de l'outillage

La Figure 5.12 présente le résultat obtenu de l'outillage avec l'impression dynamique. Les défauts majeurs sont les effondrements qui se situent au niveau des changements de direction et des zones ayant un angle de dévers à l'impression de plus de 45° . La Figure 5.14 montre les effondrements vers l'intérieur et vers l'extérieur qui sont apparus lors de l'impression due au choix de la courbe guide ayant parfois plus de 45° d'écart avec la surface de moulage. Dû à l'orientation de l'extrudeuse dès la première couche, la surface du dessous est remplie au lieu de ne faire que le contour comme sur l'impression verticale (Figure 5.13). Ces premières couches sont délicates à réaliser puisqu'elles se chevauchent les unes sur les autres et doivent assurer l'adhésion de la pièce avec le lit tout en ayant l'extrudeuse non verticale, ce qui diminue la pression appliquée sur le cordon lors de l'extrusion.

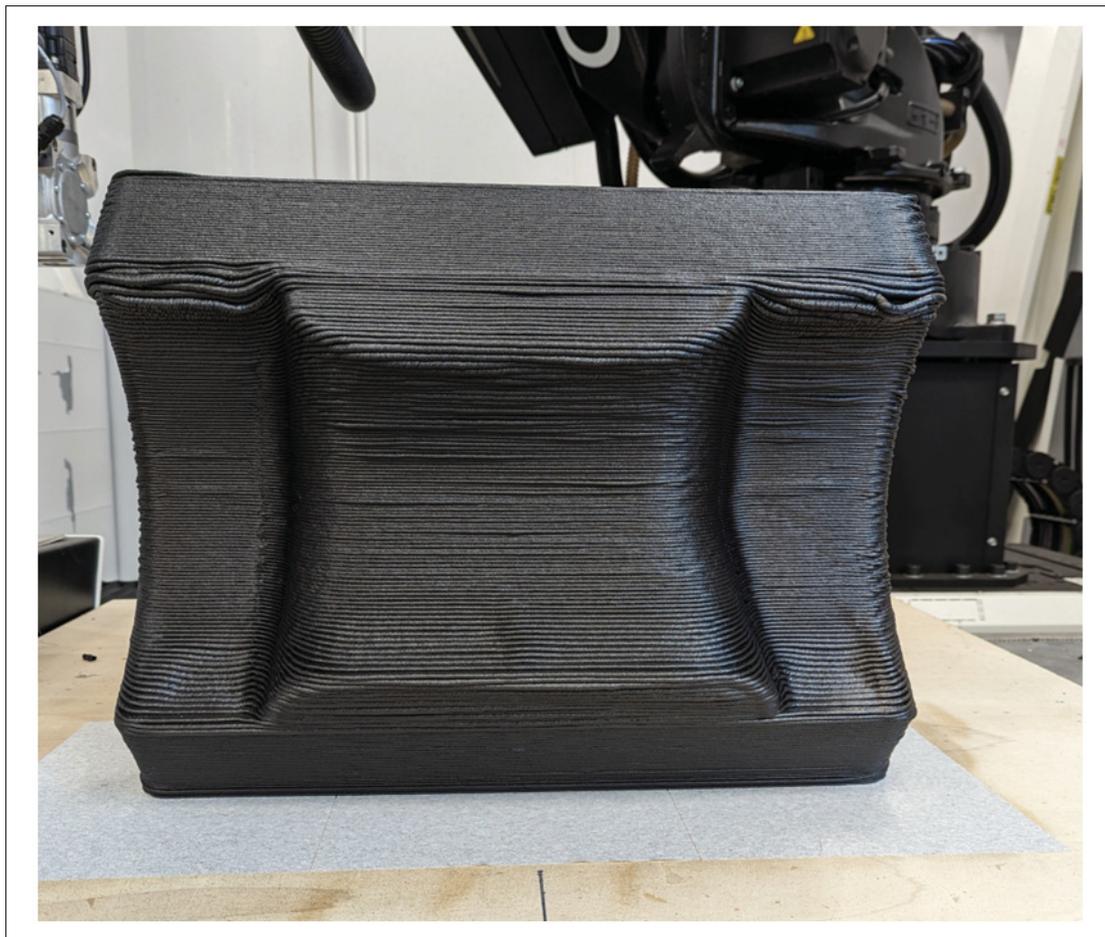


Figure 5.12 Impression dynamique de l'outillage

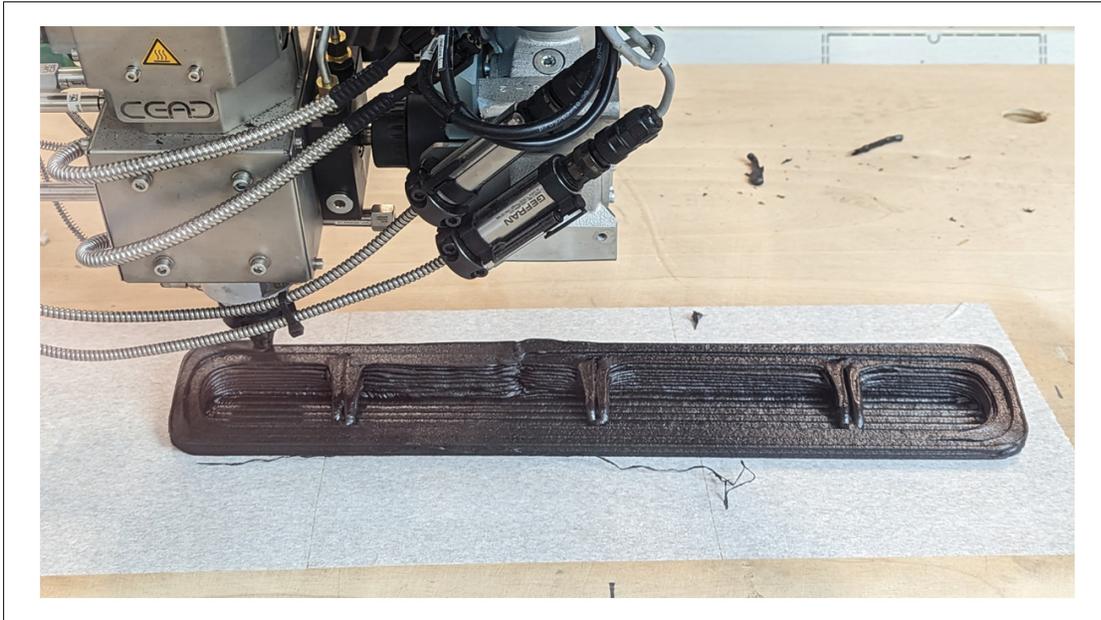


Figure 5.13 Premières couches de l'impression dynamique de l'outillage

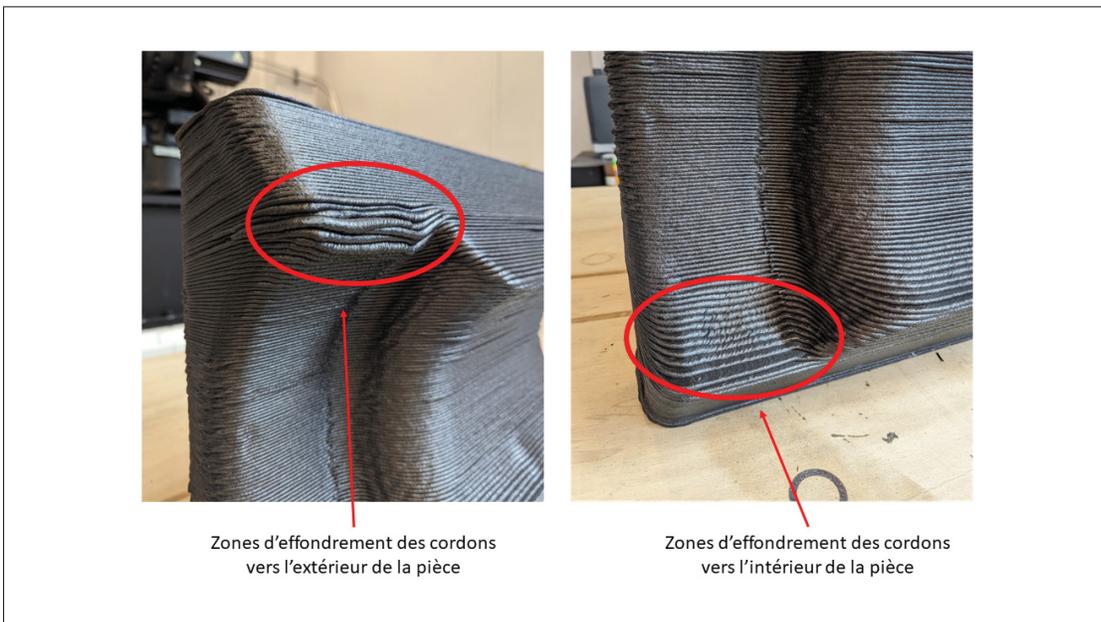


Figure 5.14 Effondrement des cordons dans les zones avec un angle de dévers supérieur à 45°

L'impression dynamique de cet outillage a pour but d'améliorer les zones de changements brusques tel que mentionné à la section 5.1. La Figure 5.15 montre une coupe destructive d'une pièce imprimée en dynamique et d'une pièce imprimée à la verticale, qui permet de constater l'effondrement de l'intérieur ainsi que les éventuels trous (porosités) entre les cordons liés à la conception. Dans le cas de l'impression verticale, il y a de nombreux trous entre les cordons sur les surfaces à 45° tandis que l'impression dynamique a tendance à réduire ces trous en diminuant l'angle de dévers au niveau des cordons. La manière de concevoir la coque pour les doubles cordons induit une épaisseur de paroi qui n'est pas constante selon la direction d'impression, ce qui cause ces trous lorsque l'angle de dévers augmente. La Figure 5.16 explique la provenance de cette différence d'épaisseur due au décalage de surface. Cet espace est dû à des difficultés de conception pour concevoir une coque ayant une épaisseur constante selon la direction d'impression.

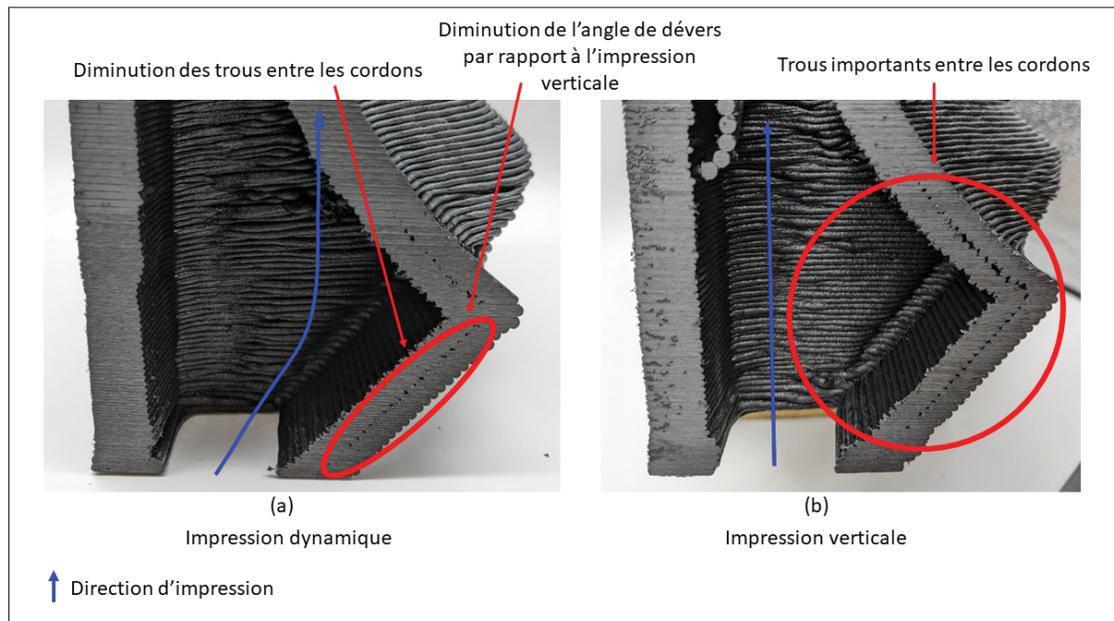


Figure 5.15 Vue en coupe de l'espace des cordons : (a) impression dynamique, (b) impression verticale

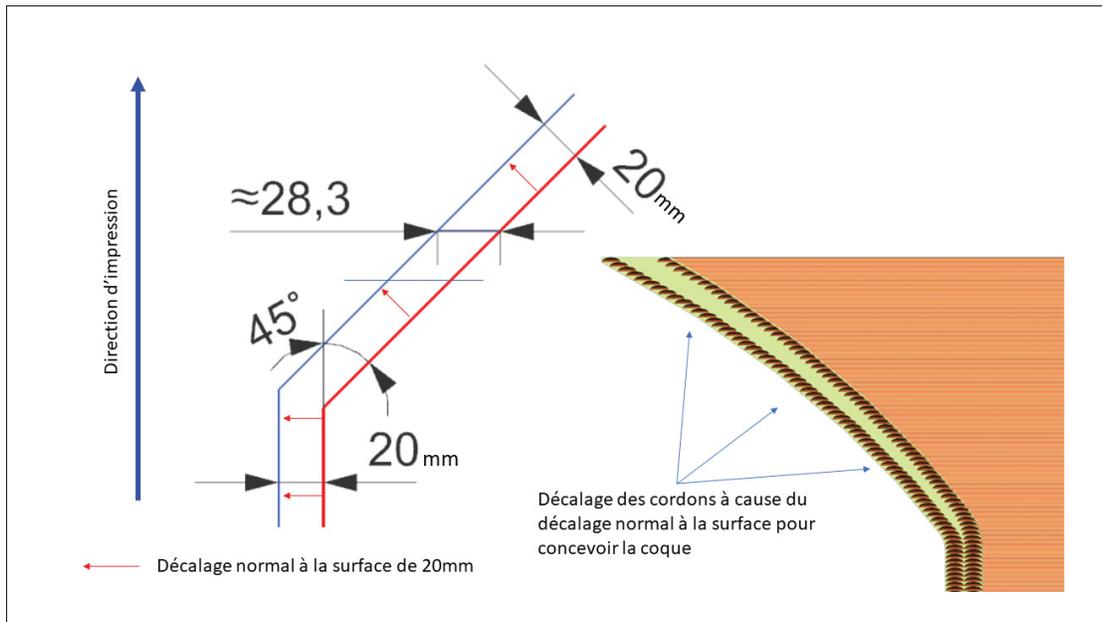


Figure 5.16 Schéma de la variation d'épaisseur du modèle numérique (CAD)

5.4 Validation et inspection des outillages

Des inspections dimensionnelles des pièces imprimées sont réalisées avant et après la post-cuisson. La comparaison de ces deux prises de mesures permettra d'évaluer l'effet de la post-cuisson. De plus, ces inspections permettront aussi de valider la précision de l'impression par rapport au modèle numérique (CAD).

5.4.1 Inspection avant/après post-cuisson

Afin de quantifier l'impact de la post-cuisson sur le relâchement des contraintes amenant à un changement géométrique de la pièce, les deux moules sont scannés avant et après la post-cuisson. Un alignement des scans est réalisé pour quantifier les changements géométriques apportés par le post-traitement. La Figure 5.17 montre que dans les deux cas, la pièce a tendance à se courber sur la surface de moulage. Les deux extrémités hautes se décalent en positif jusqu'à environ +0,3mm tandis que la zone du milieu recule d'environ -0,2mm. Les zones en bas au milieu ont des écarts plus grands, mais ne sont pas à prendre en compte, il s'agit de difficultés liées au scan

des pièces. Cette zone s'est retrouvée en limite physique du bras du scan, ce qui cause quelques imprécisions des mesures effectuées par celui-ci. Bien qu'il y ait une légère déformation de la pièce suite à la post-cuisson, l'écart entre les scans est globalement inférieur à $\pm 0,4\text{mm}$. Dans le cas d'une pièce de petites dimensions comme celle-ci, cela reste négligeable (inférieur à $\pm 0,5\text{mm}$) et ne pose pas de problème pour l'usinage puisqu'elle reste largement dans les 5mm de surplus.

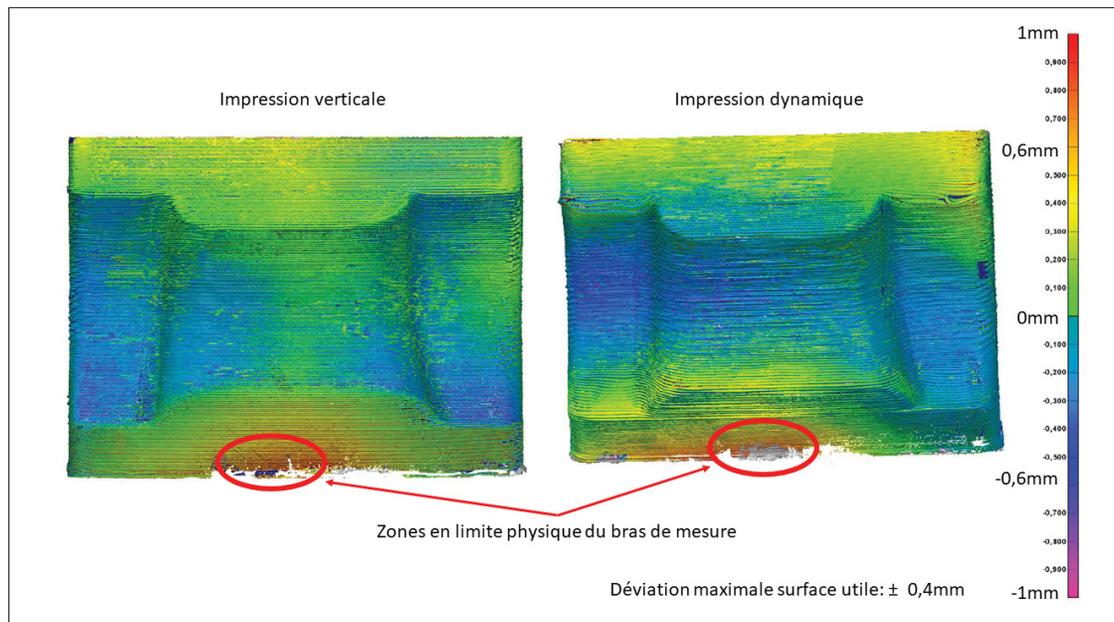


Figure 5.17 Inspection géométrique des outillages avant et après la post-cuisson

5.4.2 Inspection dimensionnelle des outillages par rapport au modèle numérique (CAD)

Une inspection dimensionnelle des deux outillages est réalisée afin de s'assurer qu'ils respectent les tolérances pour l'usinage, soit environ 5mm d'excès de matière. Ces deux inspections permettent d'identifier les zones où il y a une déviation plus importante et ainsi juger de la validation des méthodes choisies.

Concernant l'impression verticale, la Figure 5.18 montre que la surface utile a une déviation comprise entre +0.5mm et +8mm, considérant que le surplus attendu est de +5mm par rapport

au modèle numérique (CAD) utilisé pour l'impression. La vue en coupe d'une section au milieu de la pièce (Figure 5.18) montre que la déviation de la surface de moulage est globalement comprise entre +3mm et +4mm au lieu de +5mm, ce qui est acceptable pour l'usinage. La zone la plus affectée se situe dans les deux congés intérieurs de la surface utile qui ont une déviation de +8mm (voir Figure 5.18). Cela est dû à un excès de matière provenant du congé lui-même (voir section 3.2.3) ainsi que de la présence de plusieurs cordons en contact dans ce congé, avec les deux épaisseurs de cordons et les renforts qui se touchent dans cette zone (Figure 5.19). Cette déviation, due à l'excès de matière, est relativement élevée. Cependant elle est avantageuse pour l'usinage étant donné qu'elle laisse beaucoup de matière pour usiner l'angle vif concave de cette arête. Cette prise de mesures montre que les congés sont responsables des plus grands écarts à cause du surplus de matière qu'ils engendrent à l'impression. Étant donné que les surfaces sont usinées dans le cas des outillages, cela n'a pas spécialement d'effet négatif. En revanche, pour le cas de pièces qui ne seraient pas usinées, les coins représentent une grande source d'erreurs.

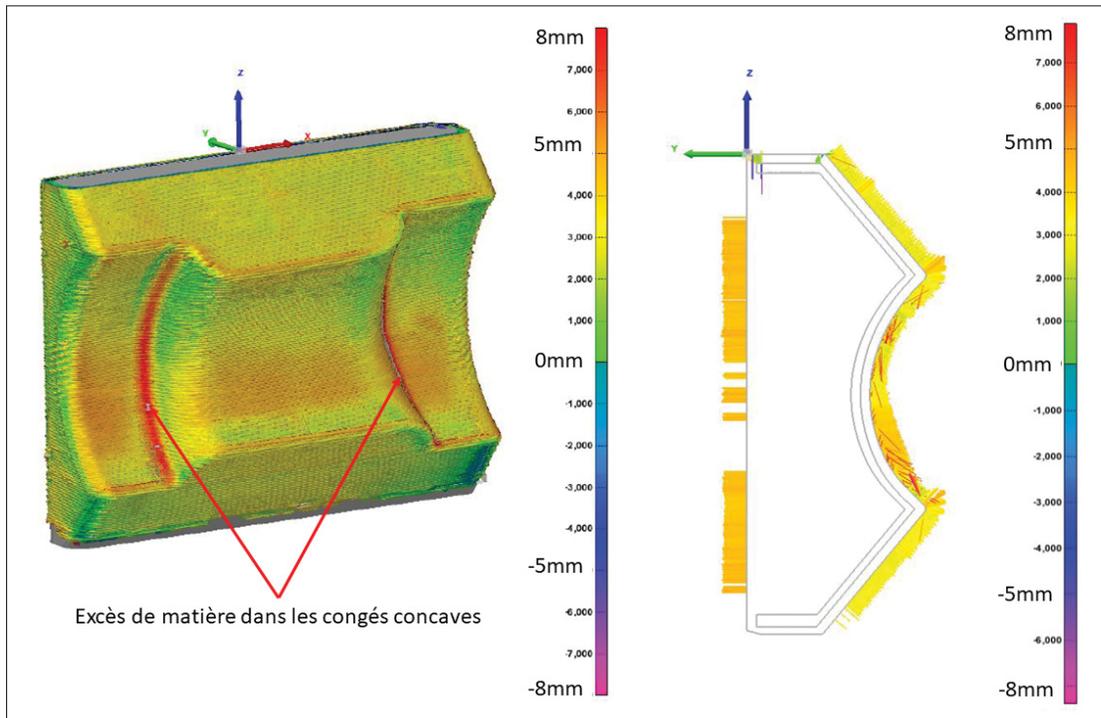


Figure 5.18 Inspection géométrique de l'outillage imprimé à la verticale

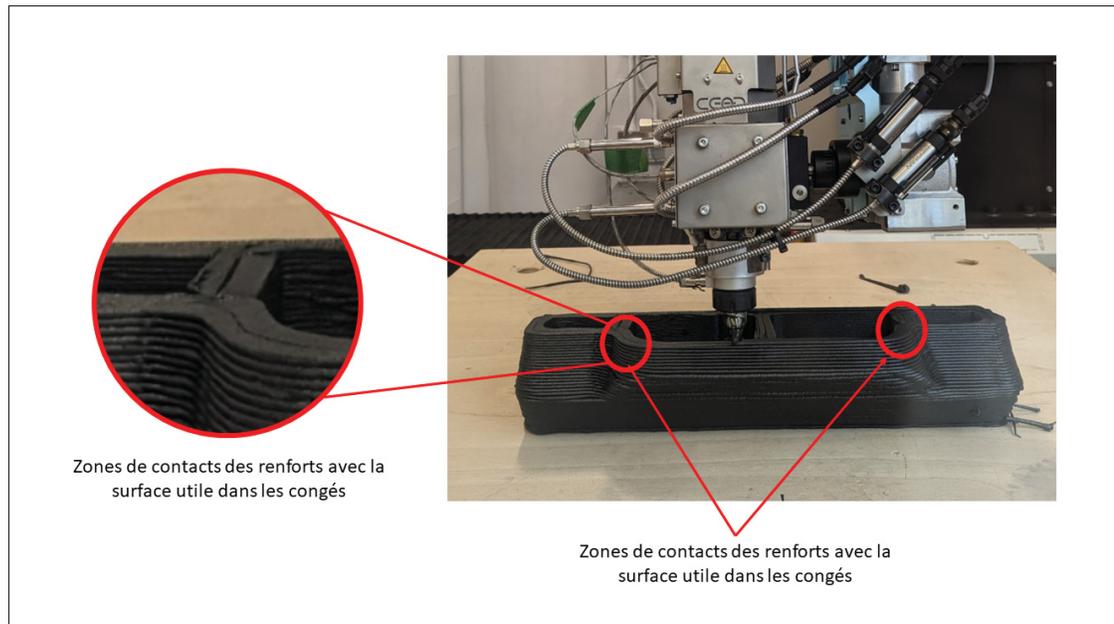


Figure 5.19 Zone d'excès de matière au contact des renforts et de la surface utile (impression verticale)

Tel que mentionné dans la section 5.1, un compromis sur la géométrie de l'outillage et sur la courbe guide ont été fait pour pouvoir l'imprimer avec les deux méthodes. Ainsi, dans le cas de l'impression dynamique, certaines zones sont imprimées avec un angle de dévers au niveau des cordons qui est supérieur à $\pm 45^\circ$, engendrant un effondrement des cordons. Ces zones ne sont donc pas prises en compte pour attester des performances de l'impression dynamique (Figure 5.21).

La Figure 5.20 montre les déviations mesurées sur la surface utile de l'outillage imprimé en dynamique. La vue en coupe de la section centrale montre que la déviation moyenne se situe entre +3mm et +4.5mm, ce qui est acceptable pour l'usinage puisque la déviation attendue était de +5mm. Les zones les plus affectées ont une déviation comprise entre +9mm et +0mm sur la surface de moulage. Les maximums sont situés dans les rayons concaves de la pièce (Figure 5.20) comme pour la pièce imprimée à la verticale et au niveau des deux changements brusques de la surface de moulage. Le minimum de matière d'environ +0mm se situe juste après le changement brusque de direction sur la partie inférieure. Ces extremums sont le résultat d'un

début d'affaissement des cordons au niveau des passages critiques de la surface de moulage de $+45^\circ$ à -45° .

Bien que cet outillage ne soit pas totalement propice à l'impression dynamique, cette inspection permet de montrer que la méthode d'impression dynamique atteint les exigences requises pour l'impression et pour l'usinage. Cette pièce montre que l'impression dynamique permet de gérer des variations brusques de surfaces et diminue la porosité entre les cordons en diminuant l'angle de dévers au niveau de ceux-ci, sans diminuer la précision de l'impression. L'utilisation de l'impression dynamique est cependant limitée pour l'impression de petites pièces ayant de grandes variations de surfaces comme le montrent les effondrements sur l'outillage imprimé lors de ce projet (Figure 5.21). Dans le cas d'outillages de grandes dimensions, les changements de direction de la courbe guide sont moins brusques et permettent d'imprimer des pièces non-imprimables autrement tout en respectant l'angle de dévers maximal sur l'ensemble de la pièce comme mentionné à la section 4.2.4.

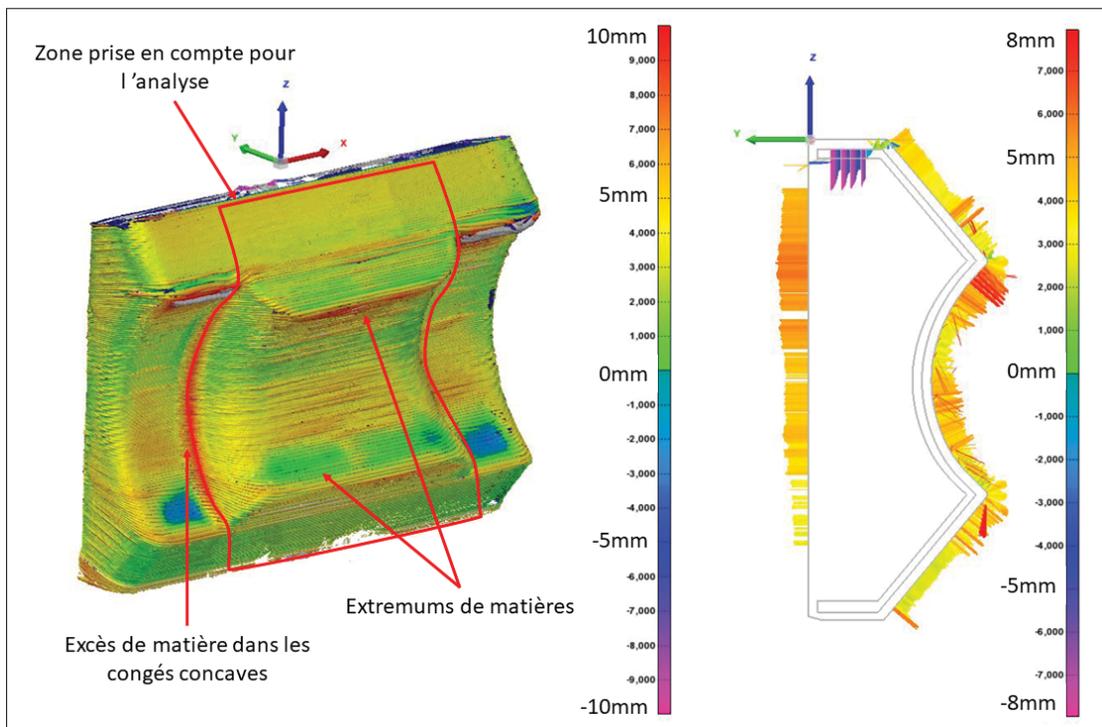


Figure 5.20 Inspection géométrique de l'outillage imprimé en dynamique

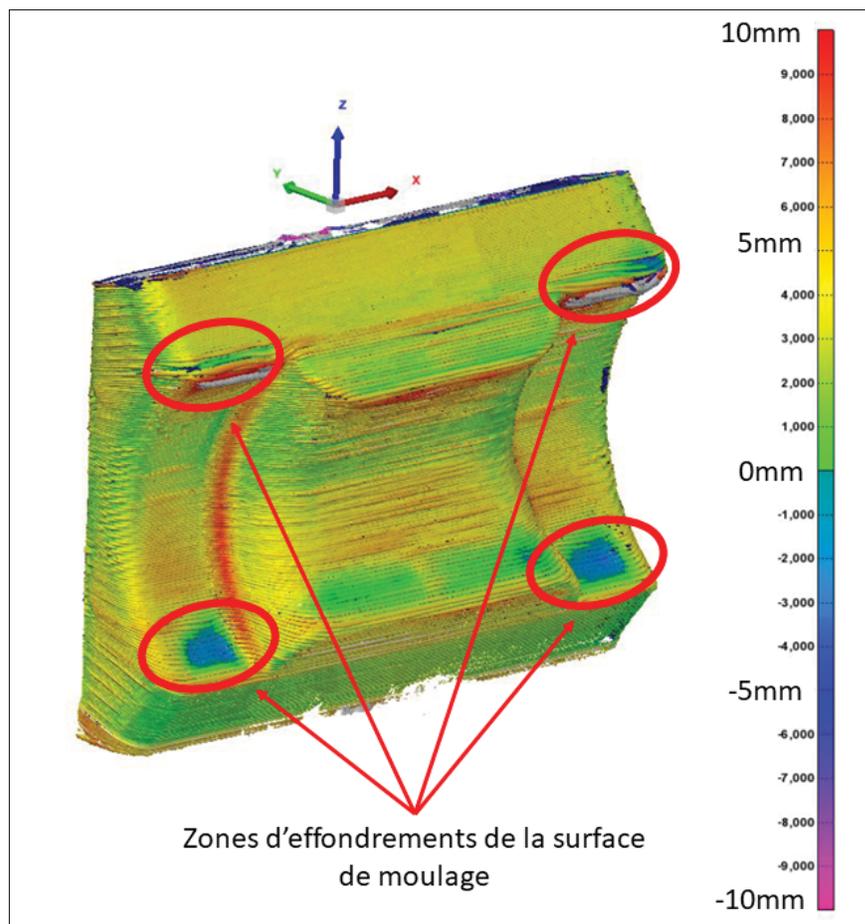


Figure 5.21 Zones d'effondrements de la surface de moulage

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'objectif principal de ce projet de recherche était de maîtriser le procédé de fabrication additive de grandes dimensions afin d'optimiser et rendre viable l'impression d'outillages destinés au moulage de pièces en matériaux composites. Afin de réaliser cet objectif, une identification des limites du procédé de fabrication a été réalisée en imprimant un outillage de diffuseur circulaire pour un véhicule éolien. Cet outillage a notamment permis d'identifier les difficultés liées à l'angle de dévers, au retrait du matériau et à l'adhésion des couches les unes avec les autres.

Cette identification des limites du procédé a permis de développer deux méthodes pour assouplir les méthodes de fabrication : L'impression dynamique et l'utilisation d'une buse à 45°. L'impression dynamique a été développée en créant un script qui ajuste le débit de l'extrudeuse au cours de l'impression et a été testé sur un tube coudé. La buse à 45° a été conçue selon un cahier des charges précis permettant ainsi de simplifier l'impression de pièce à 45° avec le système AM Flexbot. Des essais ont permis de démontrer ses performances malgré le fait qu'ils n'aient pas pu être poussés plus loin à cause du manque de post-processeur prenant en compte cette buse.

L'objectif final a été de démontrer la validité des méthodes développées pour rendre le procédé industriellement viable. Pour cela, les connaissances acquises précédemment ont permis d'imprimer un outillage complexe avec les méthodes d'impression verticale et dynamique pour comparer les résultats obtenus et être en mesure de généraliser à la fabrication d'outillages complexes.

Malgré l'atteinte des objectifs fixés lors de ce projet de recherche, il reste de nombreux défis à relever pour de futures études afin de développer le procédé de fabrication additive de grandes dimensions. Ce projet s'est majoritairement penché sur le développement de la conception et des méthodes de tranchage pour augmenter les possibilités d'impressions. Cependant, d'autres points majeurs restent à améliorer :

- Dans la continuité du travail effectué lors de ce projet de recherche, il serait intéressant de pousser les recherches sur la combinaison de l'impression dynamique et de la buse à 45° afin d'en définir les limites telles que d'éventuelles dimensions maximales en terme de longueur par exemple.
- Les fournisseurs de solutions d'impression et de logiciels de tranchages développent de plus en plus l'impression dynamique afin de l'intégrer dans les méthodes de conception. Il serait alors bénéfique de se pencher sur l'optimisation de l'impression dynamique afin d'ajuster automatiquement la courbe guide en fonction de l'angle de dévers de la pièce tout en respectant les dimensions admissibles des cordons pour assurer une bonne adhésion.
- L'expansion thermique des polymères utilisés en fabrication additive est un souci majeur du procédé. En effet, ce projet a montré que le retrait et la distorsion pouvait avoir un impact non négligeable sur la conformité dimensionnelle des pièces suite à l'impression. De plus, dans le cas de moulage à chaud, l'expansion thermique de l'outillage pose aussi problème pour la conformité des pièces moulées. Il serait alors possible de se pencher sur ce problème de trois manières différentes. Premièrement, en prenant en compte l'expansion thermique à l'impression en effectuant un facteur d'échelle sur la pièce dépendamment de l'orientation des fibres dans les cordons. Secondement, il serait possible de travailler sur la formule chimique du matériau imprimé pour réduire son coefficient d'expansion thermique. Dernièrement, il serait possible de développer des méthodes d'impression permettant de minimiser la déformation du moule en jouant sur la non-homogénéité du coefficient d'expansion thermique dans les cordons. Par exemple, imprimer plusieurs couches dans des directions différentes, de la même manière que les plis de composites lors de moulages, pourrait potentiellement minimiser l'expansion thermique.
- L'adhésion des couches est elle aussi un paramètre important. Cependant, peu d'études se sont penchées dessus dans le cas de l'impression grand format. Il serait intéressant de quantifier l'impact des différents paramètres tels que la hauteur des couches, la température

de dépose du matériau et de la couche suivante, la pression appliquée sur le cordon et sur la qualité de la liaison entre les couches.

ANNEXE I

CALCUL DE L'ESPACEMENT DU CAD POUR CHEVAUchement DES CORDONS À L'IMPRESSIOn

Cette Annexe présente les règles de conception utilisées pour prévoir le bon espacement sur le modèle numérique pour obtenir le chevauchement souhaité des cordons à l'impression.

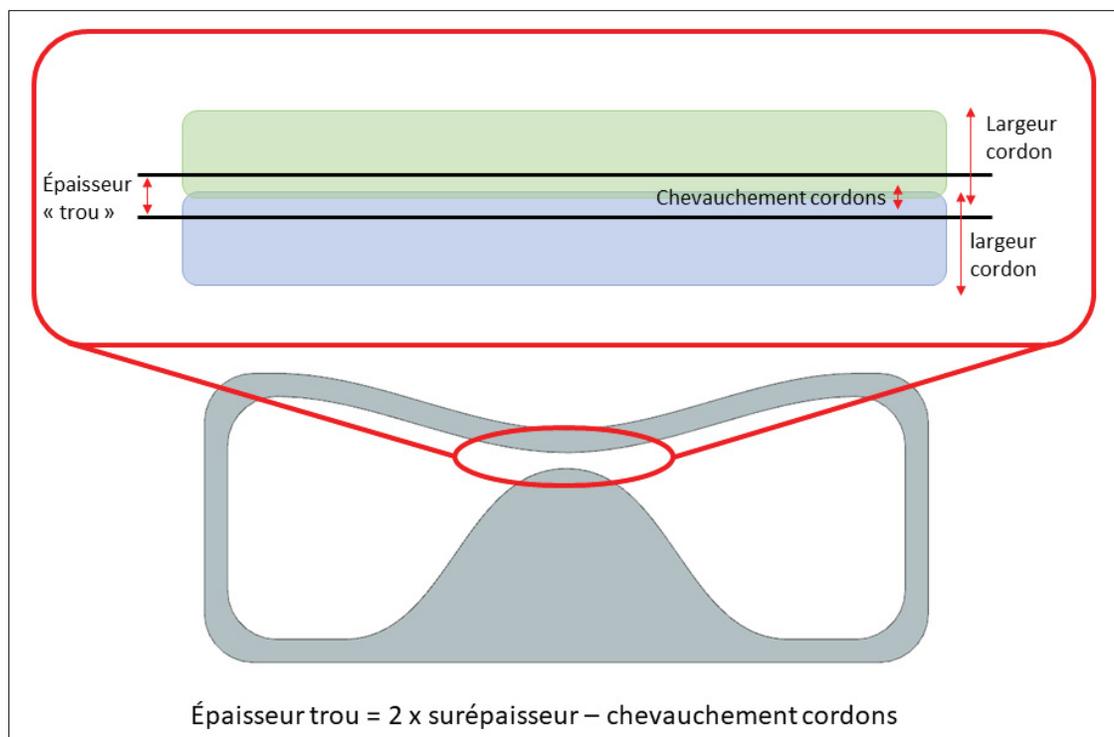


Figure-A I-1 Calcul des espacements du CAD pour le contact de cordons adjacents

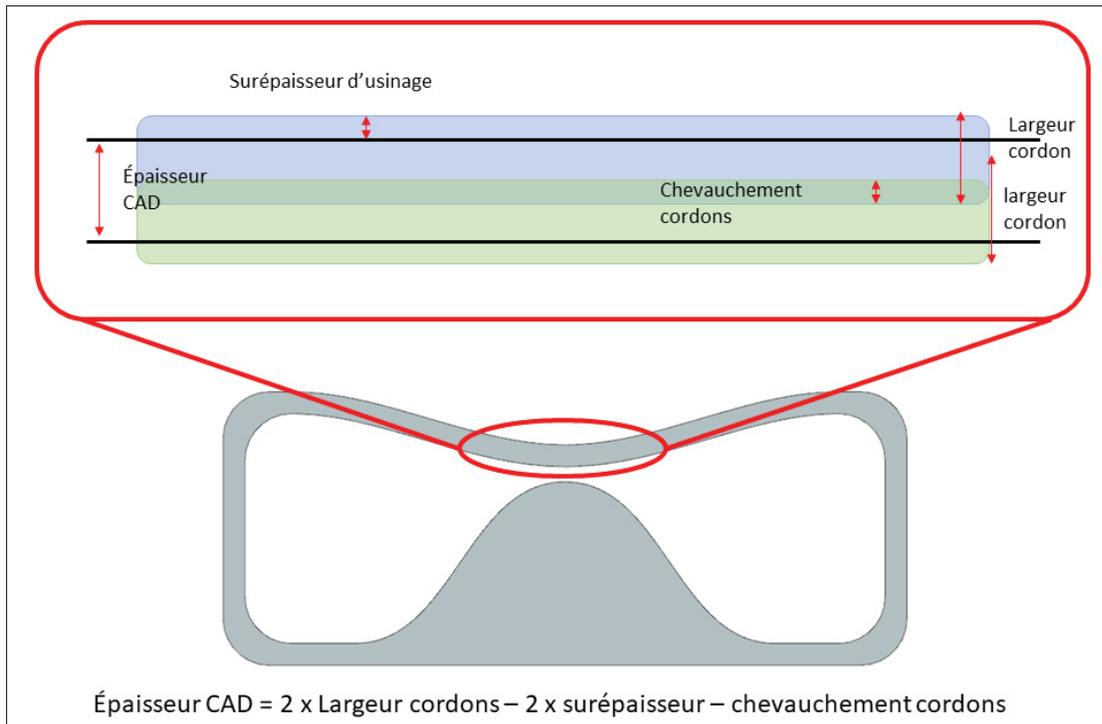


Figure-A I-2 Calcul des espacements du CAD pour le chevauchement de cordons côte à côte

ANNEXE II

FICHES TECHNIQUES DES MATÉRIAUX UTILISÉS

Les fiches techniques des trois matériaux utilisés sont présentés dans cette section.

1. Fiche technique du PIPG fourni par MCPP

mcpp
Power to Perform

10-11-2020

FGF PIPG Glassfiber (30%)

PIPG filled with glassfiber to improve strength in combination with an economical solution. Exists for 70% out of post-industrial PET-G.

Material features:

- Matt surface finish
- High strength
- Stiff
- 30% glassfiber

Colours:
Colours on request. Ask your accountmanager.

Packaging:
FGF PIPG Glassfiber is available in 20kg bag



Processing recommendations		
Drying		4hr.65°C. <400ppm
Zone 1 Temperature		250±20 °C
Zone 2 Temperature		250±20 °C
Zone 3 Temperature		250±20 °C
Mass temperature		250-260 °C
Die temperature		260±20 °C

Material properties		
Description	Testmethod	Typical value
Specific gravity	ISO 1183	N/A
MFR 200°C/5 kg	ISO 1133	1,98 g/10min
Tensile Strength at Yield	ISO 527	91 Mpa
Tensile Strength at Break	ISO 527	91 Mpa
Elongation-Strain at Yield	ISO 527	2%
Elongation-Strain at Break	ISO 527	2%
Tensile modulus	ISO 527	8245 Mpa
Impact strength - Charpy notched 23°C	ISO 179	5,3 kJ/m2
Vicat softening temperature	ISO 306	N/A
Mold shrinkage	internal method (ISO 294-4 based)	0,16%

Additional info:
The glassfiber is mildly abrasive, please consider the use of a hardened steel nozzle and, if used, a gear pump, when printing with FGF PIPG Glassfiber. Do not use a breaker plate with screen.

Storage: Cool and dry (15-25°C) and away from UV light. This enhances the shelf life significantly.

Grasbeemd 19, 5705 DE, Helmond, The Netherlands - +31 492 210 210 - info-3dp@mcpp-europe.com - www.mcpp-3dp.com
MCPP Netherlande R.V. a Group Company of Mitsubishi Chemical

Figure-A II-1 Fiche technique du PIPG fourni par MCPP

2. Fiche technique du Polycarbonate fourni par Lavergne



LAVERGNE

October 2019

VYTEEN™

PCGF20BK

20% GLASS REINFORCED POLYCARBONATE

PRODUCT DESCRIPTION

VYTEEN PCGF20BK is a black, 20% glass-reinforced general purpose polycarbonate (PC) grade. It contains no less than 70% post-consumer recycled plastic.

FEATURES

- Sustainable resin
- Good processability
- Good balance of toughness & stiffness
- UL certified (E216152)

TYPICAL APPLICATIONS

- Laptop computer docking
- Internal frame for LCD TV
- POS system (Point-of Sale)
- Laser-printer gears
- Toner cartridge parts

TECHNICAL DATASHEET

PROPERTIES	TEST METHOD	UNITS	TYPICAL VALUES
PHYSICAL			
Specific Gravity, 23°C (73°F)	ASTM* D792	-	1.32
Ash Content	ASTM D2854	%	20
MECHANICAL/THERMAL			
Izod Notched Impact, 23°C (73°F)	ASTM D256	J/m	140
Tensile Strength @ Break, 3 mm/min	ASTM D638	MPa	100
Flexural Strength, 1.3 mm/min	ASTM D790	MPa	170
Flexural Modulus, 1.3 mm/min	ASTM D790	MPa	3,900
HDT, 1.82 MPa	ASTM D648	°C	140
OTHER PROPERTIES			
Mold Shrinkage, 3.2mm	ASTM D855	%	0.3 - 0.5

* The property values are typical values and should not be construed as product specifications.
 **Trademark of Lavergne Groupe Inc. * Registered trademark of ASTM International.

WE MAKE PLASTIC CIRCULAR

8800, 1er Croissant, Montréal, QC, Canada H1J1C8 T: +1.514.354.5757 F: +1.514.354.3087 lavergne.ca

Figure-A II-2 Fiche technique du Polycarbonate fourni par Lavergne (page 1)

VYTEEN™

PCGF20BK

20% GLASS REINFORCED POLYCARBONATE

WE MAKE PLASTIC CIRCULAR

PROCESSING GUIDELINE

DRYING

The VYTEEN PCGF20BK grade process easily but must be thoroughly dried before molding, preferably in a dehumidifying desiccant hopper dryer, operating with an air flow rate of min 0.06 m³ min/kg (1.0 CFM/lb), dew point of -18°C or lower. The material should be dried at 120°C (250°F) for 2-4 hours and the humidity content of the material should be maintained below 0.02% during molding.

MOLDING

VYTEEN PCGF20BK product has a relatively wide processing window with barrel temperature settings as following:

- Rear zone: 270-295°C (520-560°F)
- Middle zone: 280-305°C (540-580°F)
- Front zone: 290-310°C (550-590°F)
- Nozzle: 290-310°C (550-590°F)
- Melt temperature: 295-315°C (560-600°F)
- Mold temperature: 70-100°C (160-210°F)

PROCESS PARAMETERS

- Injection Pressure: 55-85 MPa (8-12 kpsi)
- Injection Speed: Fast to improve aesthetics and reduce stress
- Back Pressure: Low
- Screw Speed: 50-75 rpm

NOTE

The information in this technical data sheet is, to our knowledge, true and accurate. Inasmuch as we have no control over the many different conditions under which this information and our products may be used, we do not guarantee the applicability or accuracy of this information or the suitability of our products in any given situation and assume no liability in connection with any use of this information. Users of our products should make their own tests to determine the suitability of each product to their particular application. Lavergne makes no warranties, express or implied, including but not limited to implied warranties of merchantability or fitness for a particular purpose, either with respect to the information or products reflected by the information contained in this data sheet. Statements concerning the possible use of our products are not intended as recommendations to use our products in conflict with any existing patents covering any material or its use. Should you need additional technical information / support, please contact your Lavergne technical support representatives.



LAVERGNE

8800, 1er Croissant, Montréal, QC, Canada H1J 1C8 T: +1.514.354.5757 F: +1.514.354.3087 lavergne.ca

Figure-A II-3 Fiche technique du Polycarbonate fourni par Lavergne (page 2)

3. Fiche technique du Polycarbonate fourni par Airtech



18, ZI Haneboesch
L-4562 Differdange
LUXEMBOURG

Phone : +352 58 22 82 1
Fax : +352 58 49 35

E-mail : sales@airtech.lu
Website : www.airtech.lu

Data Sheet DAHLTRAM® C-250CF

Medium temperature additive manufacturing

■ DESCRIPTION
 Dahltram® C-250CF is a cost effective, low to medium temperature use, additive manufacturing polymer for 121°C service. It is reinforced with carbon fibre for maximum strength and long term performance. Dahltram® C-250CF is ideal for room temperature tooling solutions and low to medium temperature master moulds. Additionally, it is vacuum tight and autoclave capable in all forms and can be machined to the tolerances and surface finish required.

■ BENEFITS

- Additive manufactured tools can go from conception to the production floor in days not weeks.
- Dahltram® C-250CF is a cost effective solution ideal for 121°C cure systems and much more.
- Provides higher strength, higher temperature performance and higher throughput.
- Carbon reinforcement offers greater stiffness versus glass and low warpage for predictable results.

■ TECHNICAL DATA

Physicals	Typical Values	Test Method
Base Polymer	Modified PC	
Reinforcements	Carbon Fibre	
% Fibre Loading	20%	
Tensile Strength		
X Direction	112,4 MPa	Modified ASTM D638
Z Direction	50,3 MPa	Modified ASTM D638
Tensile Modulus		
X Direction	11 GPa	Modified ASTM D638
Z Direction	3,0 GPa	Modified ASTM D638
Flexural Strength		
X Direction	180 MPa	Modified ASTM D790
Z Direction	93,8 MPa	Modified ASTM D790
Flexural Modulus		
X Direction	10,8 GPa	Modified ASTM D790
Z Direction	3,8 GPa	Modified ASTM D790
HDT, 1,82 MPa, 3,22 mm	144°C	ASTM D648 (Annealed)
Density	1,27 g/cc	ASTM D792

*Where X is the bead print direction and Z is through the bead thickness.

Last updated : 2020-11-24
 Catalogue position : [Print-Tech®](#)

As the conditions or methods of use, including storage, are beyond our control, Airtech Europe does not assume any responsibility for the performance of this material for any particular use. The material is sold "as is". Airtech Europe declines, and hereby releases, any and all implied warranties, including without limitation the implied warranties of merchantability and fitness for particular use. The information contained herein represents typical properties and should not be used for specification purposes. This translation is provided for your convenience only. The official language is English and the official law is Luxembourg.

Figure-A II-4 Fiche technique du Polycarbonate fourni par Airtech

ANNEXE III

ALGORITHME DE GESTION DU DÉBIT

Cette Annexe présente le script créé pour gérer le débit de l'extrudeuse.

Extrait de code III.1 Script python pour la gestion du debit de l'extrudeuse

```
1 """
2 | Program version           : V2
3 | Machine kit version      : V4 - 2022-05
4 | last update              : 2022-06-08
5 | Programmer                : HPG
6 """
7 input_file = 'Matrice B complet-a niveau'
8 copy_file= True
9 Layer_thickness_codeg = 2
10 Layer_width_codeg = 9
11 plot_figure = True
12 plot_data = True
13 plot_dist_point = True
14 plot_E_add = True
15 plot_E_final = True
16 ecriture_fichier = True
17
18 ## Importations ##
19
20 import numpy as np # numpy
21 import re # expression reguliere
22 import matplotlib.pyplot as plt #matplotlib
23 from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D #matplotlib 3D
24 from shutil import copyfileobj # copie de fichier
25 from math import dist #calcul de la distance entre 2 points
26 from math import *
27
28 ## SCRIPT ##
```

```

29
30 """
31 Run_script (input_file , copy_file) --> rien
32
33 roule les differentes fonctions
34
35 """
36
37 def run_script(input_file, copy_file):
38
39     Output_file = input_file + '-modif.txt'
40     Input_file = input_file + '.txt'
41     Layer_thikeness = Layer_thikness_codeg
42     Layer_width = Layer_width_codeg
43     F_layer = "F1000." # a changer en fonction du code-G
44     data=Read_text(Input_file)
45     if plot_data :
46         tracer_valeurs (data)
47     if copy_file :
48         Copie_fichier( Input_file , Output_file)
49     distance_point = distance(data)
50     dist_point_norm = distance_norm (distance_point[0],distance_point[1])
51     calc_dist = calcul_distance_points_2 (dist_point_norm)
52     if plot_dist_point :
53         Tracer_distance_point (calc_dist)
54     list_delta_E = delta_E(Input_file)
55     list_Ef = Calcul_E(calc_dist,list_delta_E,Layer_thikeness,Layer_width)
56     if plot_E_final :
57         Tracer_E_final (list_Ef[0])
58     if plot_E_add :
59         Tracer_E_add(list_Ef[1])
60     if ecriture_fichier :
61         ecriture(list_Ef[0],Input_file, Output_file)
62
63 def mise_a_niveau(fichier_initial, fichier_modif, F_layer):

```



```

95         if re.search("a mettre en fonction du machine kit",line
): # marqueur sous-operation
96             num_operation+=1
97             break
98             val=[float(v) for v in float_patt.findall(line)]
99             val.append(num_layer)
100            val.append(num_operation) # val=(N,X,Y,Z,A,B,C,ELX,E,
num_layer,num_operation)
101            data.append(tuple(val[0:12])) #ajoute le tuple avec les
informations de la ligne a data
102            line=f.readline()
103            if re.search("-LAYER",line): # marqueur layer N+1
104                num_layer+=1
105                num_operation=1
106                line=f.readline()
107            return data #retourne la liste de liste des donnees
108
109 ## copie fichier ##
110 """
111 L'objectif est de copier le fichier avant de faire des choses dessus pour
pas perdre de donnees
112 # On copie le fichier que l'on veut traiter et on reecrira sur cette copie
113 """
114 def Copie_fichier (input,output):
115
116     with open(output, 'w+') as output, open(input, 'r') as input:
117         # /\ !\ il faut ouvrir le fichier output en premier !
118         copyfileobj(input,output )
119 ## reecriture fichier ##
120 """
121 ecriture ( liste_val_E_final, fichier_initial , fichie modif )
122 liste_val_E_final : liste des valeurs finales de E
123 fichier_initial :
124 L'objectif va etre d'ecrire dans un fichier a partir du fichier de base
125 """

```

```

125 def ecriture (liste_val_E_final, fichier_initial, fichier_modif):
126     with open (fichier_initial, "r") as f2 , open(fichier_modif,"w") as f:
127         line=f2.readline()
128         i=0
129         while line!= "" and i < len(liste_val_E_final) :
130             pattern_1 = 'N'+ str(liste_val_E_final[i][0])
131             if re.search(pattern_1,line):
132                 pattern= r'E=\d*\.*\d*'
133                 val_E = 'E=' + str(liste_val_E_final[i][1])
134                 line=re.sub(pattern, val_E ,line)
135                 i+=1
136                 f.write(line)
137                 line=f2.readline()
138     ## Analyse des donnees ##
139     """
140     # on ajoute 2 colonne a data avec le numero de layer & sous layer (genre
141     # (... , 2, 2) pour layer 2 & 2eme operation )
142     # on calcul la distance depuis le debut du layer (sous couche) et on
143     # disvise par la longueur totale, comme ca on a une longueur sur 1 -> on
144     # eput ajouter ca a data
145     # pour avoir la distance avec le layer du dessus, on a le rapport sur 1, on
146     # cherche le meme sur le layer N+1 et on pourra calculer la distance
147     # entre les deux points equivalents
148     L'objectif de le fonction distance(data) est d'ajouter a data la distance
149     parcourue depuis le debut du sous-layer pour chaque ligne de G-code
150     """
151     def distance (data):
152         inc=0
153         num_operation=1
154         longueur_layer=0
155         data_longueur=[]
156         while inc < (len(data)-1):
157             data[inc]= data[inc] + (0,)
158             inc=inc+1
159             while data[inc][10] == num_operation:

```

```

154         data[inc] = data[inc] + (data[inc-1][11]+dist(data[inc-1][1:4],
data[inc][1:4]),)
155         longueur_layer=longueur_layer + float(dist(data[inc-1][1:4],
data[inc][1:4]))
156         inc+=1
157         if inc==len(data):
158             data_longueur.append(longueur_layer)
159             break
160         if data[inc][9] != data[inc-1][9]:
161             num_operation=1
162             data_longueur.append(longueur_layer)
163             longueur_layer=0
164             break
165         if data[inc][10] != data[inc-1][10]:
166             num_operation+=1
167             data_longueur.append(longueur_layer)
168             longueur_layer=0
169             break
170     return(data,data_longueur)
    # retourne la liste de liste data et la liste des longueurs de
chaque operations
171
172 #
173 # l'objectif de cette fonction est d'ajouter un elements dans data qui
normalise la distance obtenue avec la fonction distance,
174 # cela permet de ramener le rapport de longueur a 1
175 #
176 def distance_norm(data,list_longueur):
177     inc_data=0
178     inc_list_long=0
179     num_operation=1
180     while inc_data < (len(data)-1):
181         while data[inc_data][10] == num_operation:
182             data[inc_data] = data[inc_data] + ((data[inc_data][11]/
list_longueur[inc_list_long]),)

```

```

183         inc_data+=1
184         if inc_data==len(data):
185             break
186         if data[inc_data][9] != data[inc_data-1][9]:
187             inc_list_long+=1
188             num_operation=1
189             break
190         if data[inc_data][10] != data[inc_data-1][10]:
191             inc_list_long+=1
192             num_operation+=1
193             break
194     return(data) # retourne la liste de liste data impletemente de la
longueur normalisee
195 #
196 # l'objectif de cette fonction est de calculer la distance entre chaque
point du layer N avec le N+1
197 #
198
199 def calcul_distance_points_2 (data):
200
201     inc_data=0
202     liste_distance = [[],[ ]]
203     X=[]
204     Y=[]
205     Z=[]
206     X2=[]
207     Y2=[]
208     Z2=[]
209     plot=True
210     ax = Axes3D(plt.figure("figure 1"))
211     plt.xlabel('X')
212     plt.ylabel('Y')
213     plt.title("Trace du path")
214     distance = [ ]
215     liste_inc = [ ]

```

```

216 while inc_data < len(data)-1:
217     for inc in range (len(data)-1):
218         if (data[inc][9]) == (data[inc_data][9] +1) and data[inc][10]
== data[inc_data][10]:
219             if abs(data[inc_data][12]-data[inc][12]) < 0.01:
220                 liste_distance[0].append(inc)
221                 liste_distance[1].append(dist(data[inc_data][1:4],data[
inc][1:4]))
222                 # /\ NE PAS SUPPRIMER ( realisation d'un graphe)
223                 if data[inc_data][0] == 350:
224                     X3=[data[inc_data][1],data[inc][1]]
225                     Y3=[data[inc_data][2],data[inc][2]]
226                     Z3=[data[inc_data][3],data[inc][3]]
227                     ax.plot(X3, Y3, Z3, linestyle='--',marker='o',color
='b')
228                     print("distance = ",dist(data[inc_data][1:4],data[
inc][1:4]) )
229                 if len(liste_distance[1])!= 0:
230                     data[inc_data] = data[inc_data] + (min(liste_distance[1]),)
231                     liste_inc.append(liste_distance[0][liste_distance[1].index(min(
liste_distance[1]))])
232                     inc=liste_distance[0][liste_distance[1].index(min(
liste_distance[1]))]
233                     X=[data[inc_data][1],data[inc][1]]
234                     Y=[data[inc_data][2],data[inc][2]]
235                     Z=[data[inc_data][3],data[inc][3]]
236                     if inc_data > 108 :
237                         ax.plot(X, Y, Z, linestyle='-',marker='',color='g')
238                     if inc_data < 92 :
239                         ax.plot(X, Y, Z, linestyle='-',marker='',color='g')
240                     if inc_data==350 and plot:
241                         ax.plot(X, Y, Z, linestyle='-',marker='',color='g',label='
correspondance des points')
242                         # plt.legend(loc=4)

```

```

243         # ax.plot(X3, Y3, Z3, linestyle='--',marker='o',color='b',
label = ' correspondance possible' )
244         plot=False
245         # listeX.append(data[inc_data][0])
246         if inc_data == 350:
247             ax.plot(X, Y, Z, linestyle='-',marker='',color='r', label=
' correspondance retenue')
248             inc_data+=1
249             liste_distance = [[],[ ]]
250         for i in range(len(data)):
251             # ajout des valeurs Xi,Yi,Zi aux listes X,Y,Z
252             X2.append(data[i][1])
253             Y2.append(data[i][2])
254             Z2.append(data[i][3])
255             #ax.plot(X2, Y2, Z2, linestyle='--',marker='x',color='r', label='Trace
path')
256             #plt.legend()
257
258             # plt.figure("figure 2bis")
259             # plt.xlabel('numero de ligne')
260             # plt.ylabel('distance (mm)')
261             # plt.title("distance de chaque point avec son correspondant du layer n
+1")
262             # plt.plot(listeX,distance,linestyle='--',marker='o',label='rouge')
263             # plt.legend()
264             return(data)
265
266 def delta_E(input_file):
267     with open (input_file, 'r' ) as f:
268         line=f.readline()
269         pattern_N = r'N\d*\.*\d*'
270         pattern_E = r'E=\d*\.*\d*'
271         list_val=[]
272         float_patt = re.compile(r'\s*([+-]?\d+\.*\d*)')
273         while line != "":

```

```

273     match_E = re.search(pattern_E,line)
274     match_N = re.search(pattern_N,line)
275     if match_E:
276         values=[float_patt.findall(match_N.group())[0],float_patt.
findall(match_E.group())[0]]
277         list_val.append(values)
278         line=f.readline()
279     for inc in range (len(list_val)):
280         if inc != 0:
281             list_val[inc].append(float(list_val[inc][1])-float(list_val
[inc-1][1]))
282             inc+=1
283         elif inc == 0:
284             list_val[inc].append(int(float(list_val[inc][1])))
285     return (list_val)
286
287 def Calcul_E (Data,list_delta_E,Layer_thickness,Layer_width):
288     layer_thickness = Layer_thickness
289     layer_width = Layer_width
290     list_val_E_final=[]
291     list_val_E_add = []
292     data = Data
293     E_final = 0
294     E_add = 0
295     for inc_delta in range (len(list_delta_E)):
296         for inc_data in range(len(data)):
297             if int(data[inc_data][0]) > int(list_delta_E[inc_delta][0]):
298                 break
299             if int(data[inc_data][0]) == int(list_delta_E[inc_delta][0])
and len(data[inc_data]) == 14 :
300                 E_add = (((data[inc_data][13]- layer_thickness) *
layer_width * dist(data[inc_data-1][1:4],data[inc_data][1:4])) /1000)
301                 val_E_add = [int(list_delta_E[inc_delta][0]),E_add]
302                 list_val_E_add.append(val_E_add)
303                 break

```

```

304     E_final += float(list_delta_E[inc_delta][2]) + E_add
305     val_E_final = [int(list_delta_E[inc_delta][0]),round(E_final,3)]
306     list_val_E_final.append(val_E_final)
307     E_add = 0
308     return( list_val_E_final,list_val_E_add)
309
310 def Tracer_distance_point(data):
311     X=[]
312     Y=[]
313     for i in range(len(data)):
314         if len(data[i])==14:
315             Y.append(data[i][13])
316             X.append(data[i][0])
317     plt.figure("figure 2")
318     plt.xlabel('numero de ligne')
319     plt.ylabel('distance (mm)')
320     plt.title("distance de chaque point avec son correspondant du layer n
+1")
321     plt.plot(X,Y,linestyle='--',marker='o',label='distance')
322     plt.legend()
323
324 def Tracer_E_final (liste_val_E_final):
325     X=[]
326     Y=[]
327     for i in range(len(liste_val_E_final)):
328         Y.append(liste_val_E_final[i][1])
329         X.append(liste_val_E_final[i][0])
330     plt.figure("figure 3")
331     plt.xlabel('numero de ligne')
332     plt.ylabel(' E final ')
333     plt.title("E final en fonction de la ligne")
334     plt.plot(X,Y,linestyle='--',marker='o',color='r')
335
336 def Tracer_E_add (liste_val_E_add):
337     X=[]

```

```
338 Y=[]
339 for i in range(len(liste_val_E_add)):
340     Y.append(liste_val_E_add[i][1])
341     X.append(liste_val_E_add[i][0])
342 plt.figure("figure 4")
343 plt.xlabel('numero de ligne')
344 plt.ylabel('delta E add ')
345 plt.title("delta E en fonction de la ligne")
346 plt.plot(X,Y,linestyle='--',marker='o')
347
348 def tracer_valeurs (data):
349
350     X = []
351     Y1 = []
352     Y2 = []
353     Y3 = []
354     Y4 = []
355     Y5 = []
356     Y6 = []
357     Y7 = []
358     Y8 = []
359     Y9 = []
360     Y10 = []
361     for i in range(len(data)):
362         print(data[i])
363         X.append(data[i][0])
364         Y1.append(data[i][1])
365         Y2.append(data[i][2])
366         Y3.append(data[i][3])
367         Y4.append(data[i][4])
368         Y5.append(data[i][5])
369         Y6.append(data[i][6])
370         Y7.append(data[i][7])
371         Y8.append(data[i][8])
372         Y9.append(data[i][9])
```

```
373     Y10.append(data[i][10])
374 plt.figure("figure 5")
375 plt.xlabel('numero de ligne')
376 plt.ylabel('X,Y,Z ')
377 plt.title("X,Y,Z en fonction du numero de ligne")
378 plt.plot(X,Y1,linestyle='--',marker='o',color='r' ,label=' X')
379 plt.plot(X,Y2,linestyle='--',marker='o',color='g' ,label=' Y')
380 plt.plot(X,Y3,linestyle='--',marker='o',color='b',label='Z')
381 plt.legend(loc=4)
382 plt.figure("figure 6")
383 plt.xlabel('numero de ligne')
384 plt.ylabel('E')
385 plt.title("E en fonction du numero de ligne")
386 plt.plot(X,Y8,linestyle='--',marker='o',color='r')
387 plt.figure("figure 7")
388 plt.xlabel('numero de ligne')
389 plt.ylabel('A,B,C')
390 plt.title(" A,B,C en fonction du numero de ligne")
391 plt.plot(X,Y4,linestyle='--',marker='o',color='r',label='A')
392 plt.plot(X,Y5,linestyle='--',marker='o',color='g',label='B')
393 plt.plot(X,Y6,linestyle='--',marker='o',color='b',label='C')
394 plt.legend(loc=4)
395 plt.figure("figure 8")
396 plt.xlabel('numero de ligne')
397 plt.ylabel('numero layer / sous layer')
398 plt.title("numero de layer/operation en fonction du numero de ligne")
399 plt.plot(X,Y9,linestyle='--',marker='o',color='r',label='Numero de
layer')
400 plt.plot(X,Y10,linestyle='--',marker='o',color='b',label='Numero de
sous layer')
401 plt.legend(loc=2)
402 run_script(input_file,copy_file)
403 plt.legend()
404 plt.show()
```


BIBLIOGRAPHIE

- 3dgence. (2022). Filaments d'impression 3D. Repéré le 2022-12-15 à <https://3dgence.com/fr/filaments/>.
- 5AxisSlicer. (2022). 5 Axis Slicer – The first true multi-axis slicing software. Repéré le 2022-11-14 à <https://5-axis-slicer.com/>.
- Adaxis. (2022). ADAXIS. Repéré le 2022-11-14 à <https://evo3d.co.uk/pages/adaxis>.
- AiBuild. (2023). Ai Build | Additive Manufacturing Software. Repéré le 2022-11-14 à <https://ai-build.com/>.
- Airtech. (2022). Print-Tech. Repéré le 2022-12-15 à <https://www.airtech3d.com/index-dahltram-tooling-resins>.
- Airtech. (2023, mai). Composite Vacuum Bagging Supplies | Manufacturer - Airtech. Repéré le 2023-07-18 à <https://www.airtech.lu/en>.
- Bellehumeur, C., Li, L., Sun, Q. & Gu, P. (2004). Modeling of Bond Formation Between Polymer Filaments in the Fused Deposition Modeling Process. *Journal of Manufacturing Processes*, 6(2), 170–178. doi : 10.1016/S1526-6125(04)70071-7.
- Belotti. (2023). Bead. Repéré le 2023-07-07 à <https://www.belotti.com/en/bead-large-scale-3d-printer-and-5-axis-cnc-machine/>.
- Brenken, B., Barocio, E., Favaloro, A., Kunc, V. & Pipes, R. B. (2018). Fused filament fabrication of fiber-reinforced polymers : A review. 21, 1–16. doi : 10.1016/j.addma.2018.01.002.
- Camozzi. (2022). Thermoplastic 3D printer, Masterprint 3X. Repéré le 2023-01-19 à <https://en.machinetools.camozzi.com/products/additive-manufacturing/all-products/masterprint-.kl>.
- Chesser, P., Post, B., Roschli, A., Carnal, C., Lind, R., Borish, M. & Love, L. (2019). Extrusion control for high quality printing on Big Area Additive Manufacturing (BAAM) systems. 28, 445–455. doi : 10.1016/j.addma.2019.05.020.
- Cincinatti. (2019). BAAM design guidelines.
- Colón Quintana, J. L., Slattery, L., Pinkham, J., Keaton, J., Lopez-Anido, R. A. & Sharp, K. (2022). Effects of Fiber Orientation on the Coefficient of Thermal Expansion of Fiber-Filled Polymer Systems in Large Format Polymer Extrusion-Based Additive Manufacturing. 15(8), 2764. doi : 10.3390/ma15082764.

- Compton, B. G., Post, B. K., Duty, C. E., Love, L. & Kunc, V. (2017). Thermal analysis of additive manufacturing of large-scale thermoplastic polymer composites. 17, 77–86. doi : 10.1016/j.addma.2017.07.006.
- Duty, C. E., Kunc, V., Compton, B., Post, B., Erdman, D., Smith, R., Lind, R., Lloyd, P. & Love, L. (2017). Structure and mechanical behavior of Big Area Additive Manufacturing (BAAM) materials. 23(1), 181–189. doi : 10.1108/RPJ-12-2015-0183.
- Hassen, A. A., Springfield, R., Lindahl, J., Post, B., Love, L., Duty, C., Vaidya, U., Pipes, R. B. & Kunc, V. (2016). THE DURABILITY OF LARGE-SCALE ADDITIVE MANUFACTURING COMPOSITE MOLDS. 10.
- Hill, C., Bedsole, R., Rowe, K., Duty, C., Ajinjeru, C., Kunc, V. & Riha, D. (2018). Big Area Additive Manufacturing (BAAM) Materials Development and Reinforcement with Advanced Composites. (IACMI/0015-2017/3.6). doi : 10.2172/1434289.
- Hsueh, C.-H. (2000). Young's modulus of unidirectional discontinuous-fiber composites. *Composites Science and Technology*.
- Hubs. (2022). Impression 3D métal : Le guide de l'impression métal. Repéré le 2022-10-17 à <https://www.hubs.com/fr/guides/impression-3d-metal/>.
- Ingersoll Machine Tools. (2022). Time lapse - MasterPrint™ 3Dprints the largest polymer boat ever in a single piece. Repéré le 2022-12-08 à <https://www.youtube.com/watch?v=sx8WuwvYWeA>.
- Jiang, D. & Smith, D. E. (2017). Anisotropic mechanical properties of oriented carbon fiber filled polymer composites produced with fused filament fabrication. 18, 84–94. doi : 10.1016/j.addma.2017.08.006.
- Kishore, V., Ajinjeru, C., Nycz, A., Post, B., Lindahl, J., Kunc, V. & Duty, C. (2017). Infrared preheating to improve interlayer strength of big area additive manufacturing (BAAM) components. 14, 7–12. doi : 10.1016/j.addma.2016.11.008.
- Lee, J. E., Park, S. J., Son, Y., Park, K. & Park, S.-H. (2021). Mechanical reinforcement of additive-manufactured constructs using in situ auxiliary heating process. 43, 101995. doi : 10.1016/j.addma.2021.101995.
- MCPP3DP. (2023). Large Scale Additive Manufacturing (FGF) – MCPP 3DP. Repéré le 2023-07-18 à <https://mcpp-3dp.com/large-scale-additive-manufacturing/>.
- Mecastyle. (2022). Qu'est-ce que la fabrication Additive et les différents processus? Repéré le 2022-12-08 à <https://www.fabrication-additive.fr/fabrication-additive-processus>.

- Mitsubishi. (2022). Pellet Extrusion (FGF) – Mitsubishi Chemical America. Repéré le 2022-12-15 à <https://mitsubishi3d.com/products/pellet-extrusion-fgf/>.
- Mortier, A. (2022). ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC.
- Norme-ISO. (2021). *fabrication additive-Principe généraux*. ISO/ASTM 52900-Fabrication additive — Principes généraux — Fondamentaux et vocabulaire. Lieu de publication.
- NX. (2023). NX | Siemens Software. Repéré le 2022-11-14 à <https://www.plm.automation.siemens.com/global/fr/products/nx/>.
- Owen-Hill, A. (2019, mai). What’s the Difference Between Robots and CNC Machines? Repéré le 2023-07-07 à <https://robodk.com/blog/difference-robots-cnc-machines/>.
- Post, B. K., Richardson, B., Lind, R., Love, L. J., Lloyd, P., Kune, V., Rhyne, B. J., Roschli, A., Hannan, J., Nolet, S., Veloso, K., Kurup, P., Remo, T. & Jenne, D. (2017). Big Area Additive Manufacturing Application in Wind Turbine Molds. doi : 10.26153/tsw/16964.
- RoboDK. (2023). Simulator for industrial robots and offline programming - RoboDK. Repéré le 2022-11-14 à <https://robodk.com/index>.
- Robotmaster. (2022). Offline Robot Programming and Robot Simulation Software for Additive Manufacturing | CAD/CAM Additive Manufacturing | Robotic Additive Manufacturing & 3D Printing | Robotmaster. Repéré le 2022-11-14 à <https://www.robotmaster.com/en/applications/additive-manufacturing>.
- Robotstudio. (2023). RobotStudio | ABB Robotics. Repéré le 2022-11-14 à <https://new.abb.com/products/robotics/robotstudio>.
- Sabic. (2023). SABIC - Polymers. Repéré le 2023-07-18 à <https://www.sabic.com/en/products/polymers>.
- TechmerPM. (2022). Home - Techmer PM | Polymer Material Design. Repéré le 2022-12-15 à <https://www.techmerpm.com/>.
- Thermwood. (2022a). Thermwood LSAM. Repéré le 2023-01-19 à https://www.thermwood.com/lsam_home.htm.
- Thermwood. (2022b). Thermwood LSAM Used to 3D Print Al Davis Memorial Torch in new Las Vegas Raiders Stadium. Repéré le 2023-01-19 à <https://blog.thermwood.com/en-us/new-technology-and-collaboration-built-the-3d-printed-allegiant-stadium-commemorative-torch-blog-00>.

- Thermwood, T. (2022c). Thermwood Corporation Blog | Helicopter. Repéré le 2023-01-19 à <https://blog.thermwood.com/topic/helicopter>.
- University, M. (2019). University of Maine : 3Dirigo. Repéré le 2023-01-19 à <https://maineboats.com/print/issue-162/university-maine-3dirigo>.
- Vaes, D. & Van Puyvelde, P. (2021). Semi-crystalline feedstock for filament-based 3D printing of polymers. *Progress in Polymer Science*, 118, 101411. doi : 10.1016/j.progpolymsci.2021.101411.
- wpdev. (2021, novembre). Advanced Additives. Repéré le 2023-07-18 à <https://www.techmerpm.com/advanced-additives/>.
- Yi, X. (2018). Numerical and experimental investigation on the elastic properties of discontinuous fiber reinforced composites. Repéré à <https://ir.lib.uwo.ca/etd/5431/>.
- Yin, J., Lu, C., Fu, J., Huang, Y. & Zheng, Y. (2018). Interfacial bonding during multi-material fused deposition modeling (FDM) process due to inter-molecular diffusion. *Materials & Design*, 150, 104–112. doi : 10.1016/j.matdes.2018.04.029.