



HAL
open science

Méthodologie de préparation à la fabrication de composants de grandes dimensions à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus

Olivier Authelin

► **To cite this version:**

Olivier Authelin. Méthodologie de préparation à la fabrication de composants de grandes dimensions à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus. Polymères. École centrale de Nantes, 2022. Français. NNT : 2022ECDN0006 . tel-03722279

HAL Id: tel-03722279

<https://theses.hal.science/tel-03722279v1>

Submitted on 13 Jul 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE DE DOCTORAT DE

L'ÉCOLE CENTRALE DE NANTES

ÉCOLE DOCTORALE N° 602
Sciences pour l'Ingénieur
Spécialité : Génie mécanique

Par

Olivier AUTHELIN

Méthodologie de préparation à la fabrication de composants de grandes dimensions à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus

Thèse présentée et soutenue à Nantes le 31/01/2022

Unité de recherche : UMR 6183, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (Gem)

Rapporteurs avant soutenance :

Anaïs BARASINSKI
Nicolas PERRY

Maître de conférences HDR, Université de Pau et des Pays de l'Adour
Professeur des Universités, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Gradignan

Composition du Jury :

Président :
Examineur :
Dir. de thèse :
Co-dir. de thèse :

Christophe TOURNIER Professeur des universités, Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay
Guillaume RUCKERT Ingénieur de recherche, Naval Group, Bouguenais
Jean-Yves HASCOËT, Professeur des Universités, Ecole Centrale de Nantes
Matthieu RAUCH, Maître de Conférences HDR, Ecole Centrale de Nantes



REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont d'abord à Jean-Yves Hascoët et Matthieu Rauch pour m'avoir offert l'opportunité de faire une thèse dans un domaine de pointe, le tout dans un environnement expérimental favorable à la recherche. Nos échanges ont été nombreux, riches et constructifs. Je souhaite également adresser mes remerciements aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'évaluer ce travail de thèse et pour les retours constructifs qu'ils ont pu formuler.

Je tiens également à remercier l'ensemble des collaborateurs industriels et académiques avec lesquels j'ai pu travailler lors de ces trois années : les membres du Laboratoire Commun de Naval Group ainsi que les membres du laboratoire GeM, et plus particulièrement l'équipe de la plateforme RMP.

Ma reconnaissance va à mes amis proches qui ont su être présents dans les moments les plus difficiles. Enfin, un très grand merci à ma famille pour m'avoir transmis le goût pour la recherche et leur soutien sans failles durant cette aventure.

À mes grands-parents ...

TABLE DES MATIERES

TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	viii
LISTE DES TABLEAUX	xvii
LISTE DES EQUATIONS.....	xviii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 - ETAT DE L'ART ET PRESENTATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE	4
1. INTRODUCTION	4
2. ETAT DE L'ART GENERAL SUR LA FABRICATION ADDITIVE	4
2.1. HISTORIQUE DE LA FABRICATION ADDITIVE	4
2.2. PROCEDES DE FABRICATION ET APPLICATIONS.....	5
2.3 ATOUTS ET FAIBLESSES DE LA FABRICATION ADDITIVE	7
2.4. CONCLUSION SUR L'ETAT DE L'ART GENERAL A LA FABRICATION ADDITIVE.....	8
3. FABRICATION ADDITIVE DE COMPOSANTS DE GRANDES DIMENSIONS A PARTIR DE MATERIAUX POLYMERES THERMOPLASTIQUES.....	9
3.1. HISTORIQUE DE LA FABRICATION ADDITIVE A PARTIR DE POLYMERES THERMOPLASTIQUES FONDUS.....	9
3.2. COMPOSANT DE GRANDES DIMENSIONS.....	11
3.3 CONCLUSION ET ANALYSE DE L'ETAT DE L'ART SPECIFIQUE A LA FABRICATION ADDITIVE REALISEE A PARTIR DE MATERIAUX POLYMERES THERMOPLASTIQUES FONDUS.....	18
4. PRESENTATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE : METHODOLOGIE DE PREPARATION A LA FABRICATION.....	20
4.1. PREREQUIS DE LA METHODOLOGIE	20
4.2. METHODOLOGIE DE PREPARATION A LA FABRICATION	22
4.3. ETAPES EN AVAL DE LA METHODOLOGIE	23
4.4 SYNTHESE SUR LES OBJECTIFS DE CES TRAVAUX DE RECHERCHE	23
5. MISE EN AVANT ET RESOLUTION DE PROBLEMATIQUES DE LA METHODOLOGIE PAR LA REALISATION DE CAS D'APPLICATIONS	24
5.1 CAS D'APPLICATION ET PROBLEMATIQUES A RESOUDRE.....	25
5.2. CONCLUSION PARTIELLE SUR LA MISE EN APPLICATION DE LA METHODOLOGIE	28
6. CONCLUSION DU CHAPITRE	29
CHAPITRE 2 - MISE EN POSITION ET SECTIONNEMENT DU COMPOSANT	31
1. NOTIONS RELATIVES A LA MISE EN POSITION ET AU SECTIONNEMENT D'UN COMPOSANT DE GRANDES DIMENSIONS.....	31
1.1 DECOMPOSITION EN ENTITES ET RATIO D'ELANCEMENT	32
1.2 SUBSTRAT.....	33
1.3 SECTIONNEMENT	34
1.4 SUPPORTS	35
1.5 CONCLUSION SUR LES NOTIONS RELATIVES A LA MISE EN POSITION ET AU SECTIONNEMENT 	37

2. PROBLEMATIQUE RELATIVE AU PORTE-A-FAUX ET A LA MISE EN POSITION D'UN COMPOSANT DE GRANDES DIMENSIONS	37
3. METHODOLOGIE DE MISE EN POSITION ET DE SECTIONNEMENT DU COMPOSANT A REALISER	39
3.1 MISE EN POSITION DU COMPOSANT	39
3.2 PRISE EN CONSIDERATION DES CRITERES DU CAHIER DES CHARGES	42
3.3 IMPLEMENTATION D'UNE STRUCTURE DE MAINTIEN OU DE SOUTIEN	44
3.4 CHOIX DE COURBE DE CROISSANCE ET DE LA DISTANCE ENTRE LES SECTIONS	47
3.5 TRANCHAGE DU COMPOSANT	48
3.6 CONCLUSION SUR LA METHODOLOGIE DE MISE EN POSITION ET DE SECTIONNEMENT DU COMPOSANT A REALISER	54
4. CAS D'APPLICATION.....	54
4.1 MISE EN POSITION ET IMPLEMENTATION DE STRUCTURES DE SOUTIEN	54
4.2 CHOIX DE LA COURBE DE CROISSANCE, DE LA DISTANCE ENTRE LES SECTIONS ET TRANCHAGE DES COMPOSANTS	61
5. CONCLUSION DU CHAPITRE	63
CHAPITRE 3 - MISE EN PLACE DES STRATEGIES DE FABRICATION	66
1. NOTIONS RELATIVES AUX STRATEGIES DE FABRICATION	66
1.1. TRAJECTOIRES DE FABRICATION	66
1.2. TYPES DE STRATEGIES DE FABRICATION	67
1.3. ORDONNANCEMENT DES STRATEGIES DE FABRICATION	68
1.4. CONCLUSION SUR LES NOTIONS RELATIVES AUX STRATEGIES DE FABRICATION	69
2. PROBLEMATIQUES SCIENTIFIQUES RELATIVES AUX COMPOSANTS DE GRANDES DIMENSIONS ET STRATEGIES DE FABRICATION	69
2.1. PROBLEMATIQUES MECANIQUES	69
2.3. PROBLEMATIQUES GEOMETRIQUES, DIMENSIONNELLES ET D'ETAT DE SURFACE	72
2.4. PROBLEMATIQUES THERMIQUES ET STRATEGIES DE FABRICATION	72
2.5 PROBLEMATIQUES CHIMIQUES	74
2.6. CONCLUSION SUR LES PROBLEMATIQUES RELATIVES AUX STRATEGIES DE FABRICATION	75
3. MISE EN PLACE DES STRATEGIES DE FABRICATION.....	76
3.1. MISE EN PLACE DES STRATEGIES VOLUMIQUES	76
3.2 MISE EN PLACE DES STRATEGIES DE RENFORCEMENT	83
4. DEVELOPPEMENT DES CAS D'APPLICATION.....	106
4.1. MISE EN PLACE DES STRATEGIES VOLUMIQUES	106
4.2. RENFORCEMENT DE L'HYPERBOLOIDE	114
4.3. CONCLUSION SUR LA MISE EN PLACE DES STRATEGIES DE FABRICATION DANS LE CADRE DES CAS D'APPLICATION	118
5. CONCLUSION DU CHAPITRE	118

CHAPITRE 4 - CHOIX ET PARAMETRAGE DU MOYEN DE FABRICATION	120
1. NOTIONS RELATIVES AU CHOIX ET AU PARAMETRAGE DU MOYEN DE FABRICATION	120
1.1. MOYEN DE FABRICATION	120
1.2. EFFECTEURS ADDITIFS	120
1.3. PORTEURS	125
1.4. CONCLUSION SUR LES NOTIONS RELATIVES AU CHOIX ET AU PARAMETRAGE DU MOYEN DE FABRICATION	133
2. PROBLEMATIQUES SCIENTIFIQUES RELATIVES AU CHOIX ET AU PARAMETRAGE DU MOYEN DE FABRICATION.....	133
2.1. CHOIX ET PARAMETRAGE DES EFFECTEURS ADDITIFS	133
2.2. CHOIX ET PARAMETRAGE DU PORTEUR	134
3. METHOLOGIE DE CHOIX ET DE PARAMETRAGE DU MOYEN DE FABRICATION	134
3.1. CHOIX ET PARAMETRAGE DES EFFECTEURS	134
3.2 CHOIX ET PARAMETRAGE DU PORTEUR	143
3.3. DE RISQUAGE DU COMPOSANT A FABRIQUER	150
4. CHOIX ET PARAMETRAGE DU MOYEN DE FABRICATION UTILISE DANS LE CADRE DE CES TRAVAUX DE RECHERCHE	151
4.1. CHOIX ET PARAMETRAGE DES EFFECTEURS	151
4.2. CHOIX ET PARAMETRAGE DU PORTEUR	156
4.3. REALISATION DE L'ETAPE DE DERISQUAGE	165
4.4. FABRICATION DES CAS D'APPLICATION	166
4.5. CONCLUSION SUR LE PARAMETRAGE DU MOYEN DE FABRICATION ET SUR LA REALISATION DES CAS D'APPLICATIONS	175
5. CONCLUSION DU CHAPITRE	177
CHAPITRE 5 - CONCLUSION ET PERSPECTIVES	179
LISTE DES REFERENCES	183

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondus, principales étapes de la méthodologie de préparation à la fabrication..... 3

Figure 2 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, procédé SLA (A) – Machine RepRap (B) – procédé FDM (C) – procédé CLAD (D) 5

Figure 3 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, classes de procédés de fabrication additive suivant la norme ISO 17296-2:2015 [19] 6

Figure 4 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, démonstrateurs réalisés de manière additive dans le cadre d’applications navales (A) – aéronautiques (B) – automobiles (C) – dentaires (D) – liées à la construction (E) 7

Figure 5 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, développement du procédé à des fins industrielles..... 10

Figure 6 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, outillages de grandes dimensions..... 12

Figure 7 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, moules de grandes dimensions..... 13

Figure 8 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, coffrages en béton et outils de formage et à froid et d’hydroformage 14

Figure 9 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, composants en lien avec le domaine naval 15

Figure 10 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, composants en lien avec l’industrie automobile 16

Figure 11 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, composants en lien avec le domaine des deux-roues et des équipements sportifs..... 17

Figure 12 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, composants en lien avec le génie civil..... 18

Figure 13 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, étapes en amont et en aval de la méthodologie 20

Figure 14 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, diagramme IDEF0 22

Figure 15 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, géométries de l’hélice..... 25

Figure 16 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, géométries du fémur 26

Figure 17 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, géométries de la lame de sabre 26

Figure 18 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, géométries de l’hyperboloïde 27

Figure 19 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, géométries de la pale d’éolienne 27

Figure 20 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, géométries de la chaise..... 28

Figure 21 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, diagramme IDEF0 30

Figure 22 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, diagramme IDEF0 31

Figure 23 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, composant simple et composant complexe 32

Figure 24 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondus, calcul du ratio d’élancement d’un composant 33

Figure 25 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondus, ratios d’élancement d’un composant..... 33

Figure 26 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, différents types de substrats présents dans le cadre de la méthodologie de préparation à la fabrication.....	34
Figure 27 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondus, notions relatives au sectionnement d'un composant.....	35
Figure 28 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondu, structure de soutien soutenant les surface excédant la limite de porte-à-faux admissible	36
Figure 29 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondus, défaut géométriques engendrés par des mouvements parasites du composant en cours de fabrication et structure de soutien.....	36
Figure 30 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, normales sortantes aux surfaces d'un composant.....	37
Figure 31 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, structures de support et de maintien	38
Figure 32 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondus, étapes à réaliser dans le cadre de la mise en position et du sectionnement d'un composant de grandes dimensions.....	39
Figure 33 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondus, une seule orientation du composant respecte la limite de porte-à-faux admissible.....	40
Figure 34 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondus, plusieurs orientations du composant respectent la limite de porte-à-faux admissible	40
Figure 35 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondus, mise en position d'un composant simple.....	41
Figure 36 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondus, mise en position d'un composant complexe.....	42
Figure 37 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondus, décomposition d'un composant complexe.....	42
Figure 38 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, mise en place d'une stratégie de parachèvement	43
Figure 39 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, mise en place d'une stratégie de parachèvement	43
Figure 40 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, modification des dimensions de la maquette numérique suite à la mise en place d'un parachèvement ou d'un renforcement	44
Figure 41 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondus, structures de maintien développées dans le cadre de ces travaux de thèse.....	45
Figure 42 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, réalisation de la solution de maintien par plateau.....	46
Figure 43 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, mise en place d'une structure de soutien.....	46
Figure 44 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondus, courbes de croissance	47
Figure 45 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, distance entre les sections	48
Figure 46 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, calcul du nombre de sections d'un composant (ou d'une entité)	48
Figure 47 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, définition de la première surface de tranchage	48
Figure 48 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, tranchage et sectionnement d'un composant	49
Figure 49 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, exemple d'application de tranchage par rapport à un plateau de fabrication plan.....	49
Figure 50 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, exemples d'applications de tranchage par rapport à un plateau de fabrication non plan	50
Figure 51 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, plateau de fabrication secondaire.....	50

Figure 52 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, tranchage du composant.....	50
Figure 53 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, réalisation du composant.....	51
Figure 54 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, orientation des surfaces de tranchage dans le cas d'un composant ayant une courbe de croissance de direction non constante.....	51
Figure 55 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, redéfinition des zones ou les sections s'entrecroisent suite au tranchage du composant.....	52
Figure 56 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, géométries de la tuyère réalisée.....	52
Figure 57 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, orientation des surfaces par rapport au plateau de fabrication.....	52
Figure 58 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, entrecroisement des sections.....	53
Figure 59 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, tranchage après redéfinition des sections.....	53
Figure 60 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, réalisation de la tuyère.....	54
Figure 61 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, mise en position de la chaise.....	55
Figure 62 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, fémur à l'horizontale.....	55
Figure 63 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, fémur positionné avec son axe anatomique compris entre 0 et 90° par rapport au plateau de fabrication.....	56
Figure 64 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, mise en position du fémur sur le plateau de fabrication.....	56
Figure 65: fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, structure de maintien mise en place dans le cadre de la fabrication du fémur.....	57
Figure 66 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, positionnement de la pale « sur le côté » et « à plat ».....	57
Figure 67 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, positionnement de la pale à la verticale.....	58
Figure 68 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, mise en position de l'hyperboloïde.....	58
Figure 69 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, analyse des surfaces en porte-à-faux pour chacune des orientations de la lame de sabre par rapport au plateau de fabrication.....	59
Figure 70 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, structures de maintien de la lame de sabre en position verticale et sur le côté.....	59
Figure 71 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, mise en position de l'hélice.....	60
Figure 72 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, décomposition du composant en entités.....	60
Figure 73 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, courbes de croissance choisies pour réaliser l'hyperboloïde, la pale d'éolienne et la chaise.....	61
Figure 74 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, sectionnement des composants.....	61
Figure 75 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, courbe de croissance de la lame du sabre et du fémur.....	62
Figure 76 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, sectionnement du fémur et de la lame de sabre.....	62
Figure 77 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, sectionnement de l'hélice.....	63

Figure 78 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondus, étapes à réaliser dans le cadre de la mise en position et du sectionnement d'un composant de grandes dimensions.....	64
Figure 79 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, diagramme IDEF0	66
Figure 80 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, différents types de stratégies de fabrication utilisées dans le cadre de la méthodologie	67
Figure 81 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, ordonnancement des stratégies de fabrication pour un composant simple ou une entité.....	68
Figure 82 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, ordonnancement de la fabrication des entités d'un composant complexe	68
Figure 83 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, enchevêtrement macromoléculaire entre deux cordons de matériau polymère thermoplastique	69
Figure 84 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, éprouvette sollicitée en traction suivant une direction perpendiculaire à ses sections	70
Figure 85 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, directions de sollicitation mécaniquement faible vis-à-vis de la stratégie de sectionnement	71
Figure 86 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, directions de sollicitation mécaniquement forte vis-à-vis de la stratégie de sectionnement.....	71
Figure 87 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, effet escalier... ..	72
Figure 88 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, problématique de décollement entre le composant et le plateau de fabrication	73
Figure 89 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, mise en place d'un refroidissement via une convection forcée afin d'évacuer une partie de la chaleur contenue dans le matériau précédemment déposé	74
Figure 90 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, problématiques chimiques	74
Figure 91 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, méthodologie de mise en place des stratégies volumiques	77
Figure 92 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, différents types de substrats.....	77
Figure 93 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, trajectoires générées sur la première section.....	77
Figure 94 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, force de contraction au sein d'un cordon de polymère sous l'effet du moment créé par un gradient thermique.....	78
Figure 95 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, mise en évidence et résolution de la problématique de déformations lors du refroidissement	79
Figure 96 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, réalisation d'un composant non sujet aux déformations dues aux gradients thermiques	80
Figure 97 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, couche de matière déposée dans le cadre d'une stratégie de remplissage.....	81
Figure 98 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, mise en place et paramétrage d'une stratégie de remplissage.....	82
Figure 99 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, génération des trajectoires liées aux surépaisseurs partielles	82
Figure 100 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, génération des trajectoires de la dernière section d'un composant.....	83
Figure 101 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, orientation des trajectoires d'une couche de renforcement.....	84
Figure 102 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, combinaison de l'anisotropie d'une stratégie volumique avec l'anisotropie d'une stratégie de renforcement	84
Figure 103 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, solutions mise en place au sein de la littérature afin de lever le verrou scientifique concernant l'anisotropie des propriétés mécaniques	85

Figure 104: fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, validation de la tenue mécanique d'une structure bâtie par un stratégie volumique aux sollicitations suivant la direction mécaniquement faible.....	86
Figure 105 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, méthodologie de mise en place de stratégie de renforcement.....	87
Figure 106 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, composants ayant été l'objet de stratégies de renforcement.....	88
Figure 107 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, orientations des éprouvettes sur le plateau de fabrication.....	89
Figure 108 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, réalisation du renforcement des éprouvettes réalisées suivant la direction mécaniquement faible.....	89
Figure 109 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, trajectoires de renforcement réalisées sur les éprouvettes de traction.....	90
Figure 110 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, résultats obtenus après renforcement des éprouvettes.....	90
Figure 111 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, résultats des essais de tractions relatifs aux éprouvettes réalisées suivant la direction mécaniquement faible.....	91
Figure 112 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, résultats des essais de tractions relatifs à chacune des éprouvettes réalisées.....	91
Figure 113 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, poutres réalisées via des stratégies volumiques.....	92
Figure 114 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, direction de sollicitation mécaniquement faible en flexion.....	93
Figure 115 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, trajectoires de renforcement de la poutre soumise à un effort de flexion.....	93
Figure 116 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, couches de renforcement sur la poutre.....	94
Figure 117 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, poutre avec renforcement.....	94
Figure 118 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, fabrication des pales via des stratégies volumiques.....	95
Figure 119 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, pales bâties par la stratégie volumique.....	95
Figure 120 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, trajectoires de recouvrement de la pale.....	96
Figure 121 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, recouvrement de la pale.....	96
Figure 122 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, sections du filament prototype utilisé dans le cadre de ces travaux de recherche.....	98
Figure 123 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, comparaison de la section du filament prototype avec la section du filament développé par l'entreprise Arevo.....	98
Figure 124 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, analyse des porosités au sein du filament prototype utilisé dans le cadre de ces travaux de recherche et comparaison avec le filament développé par l'entreprise Arevo.....	99
Figure 125 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, résultats de l'analyse calorimétrique concernant le filament prototype utilisé dans le cadre de ces travaux de recherche.....	100
Figure 126 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, éprouvettes de norme EN ISO 527-5, dimensions et trajectoires de fabrication.....	102
Figure 127 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, caractérisation du matériau non abouti.....	102
Figure 128 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, buse d'injection permettant l'extrusion de plusieurs filaments simultanément.....	103
Figure 129 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions,.....	104

Figure 130 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, opération de parachèvement.....	105
Figure 131 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, opérations de parachèvement mentionnées au sein de la littérature scientifique.....	106
Figure 132 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, stratégies volumiques réalisées pour l’hyperboloïde et la pale d’éolienne.....	107
Figure 133 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, stratégies volumiques réalisées pour l’hélice	108
Figure 134 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondu, mise en place de la stratégie de remplissage de la chaise	109
Figure 135 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondu, déformations du sabre sous une charge de flexion avec et sans stratégie de renforcement	110
Figure 136 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondu, élément représentatif du composant utilisée afin de réaliser l’étude par éléments finis	110
Figure 137 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondu, conditions aux limites et conditions de l’étude.....	111
Figure 138 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondu, paramétrage initial de la stratégie de remplissage de la lame de sabre	111
Figure 139 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondu, chargement appliqué lors de l’étude	112
Figure 140 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondu, contraintes au sein de l’élément représentatif du sabre soumis à une sollicitation de flexion suivant le critère de Von Mises et α égal à 60 degrés.....	112
Figure 141 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondu, contraintes au sein de l’élément représentatif du sabre soumis à une sollicitation de flexion suivant le critère de Von Mises pour α égal à 15, 30 et 45 degrés	113
Figure 142 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondus, étapes réalisées afin de paramétrer la stratégie de remplissage de la lame de sabre	114
Figure 143 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, symétrisation de l’étude.....	115
Figure 144 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, génération des trajectoires de renforcement	116
Figure 145 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, conditions de chargement de l’étude	116
Figure 146 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, cas de figures modélisés concernant le renforcement de l’hyperboloïde	117
Figure 147 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, résultat en contraintes suivant l’axe Z avec trajectoires de renforcement	117
Figure 148 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondus, mise en place de la stratégie de renforcement de l’hyperboloïde.....	118
Figure 149 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, diagramme IDEF0	120
Figure 150 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, effecteurs additifs et soustractifs.....	121
Figure 151 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, fonctionnement du procédé « Dépôt de fil fondu » [161] et du procédé d’extrusion de granulés thermoplastiques [162]	122
Figure 152 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, buses d’injection axisymétrique et non axisymétrique.....	123
Figure 153 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, paramètres relatifs à une buse d’injection.....	124
Figure 154 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, espace de travail et orientation de l’effecteur relatifs aux machines cartésiennes	126
Figure 155 : machines cartésiennes de grandes dimensions utilisées dans le cadre de la fabrication additive de composants de grandes dimensions à partir de polymères thermoplastiques fondus	127

Figure 156 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, machine 3-axes à structures parallèles	127
Figure 157 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, machines 5-axes en configurations berceau et poignet	128
Figure 158 : machines 5-axes de grandes dimensions utilisées dans le cadre de la fabrication additive de composants de grandes dimensions à partir de polymères thermoplastiques fondus	129
Figure 159 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, structure cinématique des bras robotisés 6-axes	130
Figure 160 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, singularités – positionnement – axes supplémentaires d’un bras robotisé 6-axes	131
Figure 161 : bras robotisés 6-axes utilisés dans le cadre de la fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus	132
Figure 162 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, étapes de la méthodologie de choix et de paramétrage du moyen de fabrication	134
Figure 163 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, étapes de la méthodologie de choix et de paramétrage des effecteurs	135
Figure 164 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, paramètres d’un effecteur additif à définir	136
Figure 165 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, paramétrage de la buse d’injection afin de respecter les dimensions des cordons à déposer [183]	137
Figure 166 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, forces appliquées par l’effecteur en fonction de son orientation	137
Figure 167 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, orientation de l’axe de l’effecteur en fonction des différentes stratégies de sectionnement	138
Figure 168 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, impact de la direction d’avance sur les géométries des cordons déposés dans le cas de l’utilisation d’une buse non axisymétrique	138
Figure 169 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, la direction d’avance d’un effecteur additif ayant une buse d’injection axisymétrique n’impacte pas les géométries des cordons déposés	139
Figure 170 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, incidence de la direction d’avance sur l’orientation des fibres déposés lors du suivi d’une trajectoire de fabrication	139
Figure 171 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, paramétrage de la direction d’avance suivant la direction de déplacement de l’effecteur additif	140
Figure 172 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, collisions possibles entre un effecteur additif et des éléments extérieurs	141
Figure 173 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, modification de l’orientation de l’effecteur et la longueur de la buse d’injection afin d’éviter une collision avec le plateau de fabrication	141
Figure 174 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, simulation du parcours d’un effecteur additif le long d’une trajectoire de fabrication	142
Figure 175 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, étapes de la méthodologie de choix et de paramétrage du porteur	144
Figure 176 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, choix d’une architecture cinématique en fonction des degrés de liberté cinématique nécessaires	146
Figure 177 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, paramètres à prendre en compte lors de la détermination de l’espace de travail nécessaire à la réalisation d’un composant	147
Figure 178 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, paramétrage de l’espace de travail d’un porteur	148
Figure 179 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, simulation du parcours d’un porteur le long de trajectoires de fabrication	149
Figure 180 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, illustration d’une opération de dérisquage dans le cadre de la fabrication du fémur	150

Figure 181 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, équipements liés au procédé « Dépôt de fil fondu » utilisés dans le cadre de ces travaux de recherche	152
Figure 182 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, paramétrage de la largeur des cordons dans le cadre de la fabrication de la chaise.....	153
Figure 183 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, orientation de l'axe de l'effecteur O dans le cadre de la réalisation de la chaise, du fémur, de la pale d'éolienne et de la lame de sabre	153
Figure 184 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, orientation de l'axe de l'effecteur O dans le cadre de la réalisation des composants renforcés	154
Figure 185 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, orientation de l'axe de l'effecteur O dans le cadre de la réalisation de l'hélice	155
Figure 186 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, dimensions des composants les plus volumineux	157
Figure 187 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, jumeau numérique de la cellule robotisée	157
Figure 188 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, orientation d'un composant en fonction de ses géométries et de la capacité du bras robotisé	158
Figure 189 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, vérification de l'accessibilité aux trajectoires de fabrication de la pale d'éolienne	158
Figure 190 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, comparaison de la distance de travail suivant l'axe Z du bras robotisé.....	159
Figure 191 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, paramétrage des plages angulaires du bras robotisé utilisé dans le cadre de ces travaux de recherche	160
Figure 192 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, course de l'effecteur du bras robotisés suivant les axes X et Y.....	161
Figure 193 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, placement d'un composant long et élancé placé à la verticale par rapport au plateau de fabrication.....	161
Figure 194 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, positionnement de la chaise et de la lame de sabre	162
Figure 195 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, positionnement du fémur et de l'hélice au sein de la cellule robotisée.....	162
Figure 196 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, positions possibles de l'hélice face au bras robotisé	163
Figure 197 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions,	164
Figure 198 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, impacte de la priorisation des axes sur les mouvements articulaires du bras robotisé lors du suivi d'une trajectoires de fabrication.....	165
Figure 199 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, parties de la lame de sabre réalisées et validées par une étape de dérisquage.....	166
Figure 200 fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, parties du fémur et de l'hélice réalisées et validées par une étape de dérisquage	166
Figure 201 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, réalisation des entités N°1 et N°2 de l'hélice	167
Figure 202 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, résultat obtenu suite à la fabrication de l'hélice.....	168
Figure 203 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, fémur positionné sur le plateau de fabrication.....	169
Figure 204 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, fémur sans structure de maintien et après polissage	169
Figure 205 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, numérisation du composant réalisé et comparaison avec les géométries de la maquette numérique	170
Figure 206 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, réalisation de la lame de sabre	171
Figure 207 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, numérisation du composant réalisé et comparaison avec les géométries de la maquette numérique	171

Figure 208 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, réalisation de l'hyperboloïde avec stratégie de renforcement..... 172

Figure 209 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, pale d'éolienne 173

Figure 210 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, numérisation du composant réalisé et comparaison avec les géométries de la maquette numérique 173

Figure 211 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, réalisation de la chaise..... 174

Figure 212 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, défaut engendré lors du cycle de fabrication 175

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, problématique relatives à la préparation à la fabrication de chacun des composants	28
Tableau 2 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, résultats des essais de traction relatifs aux éprouvettes avec et sans stratégie de renforcement	91
Tableau 3 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, calcul de la masse volumique pour chaque échantillon de filament prototype utilisé dans le cadre de ces travaux de recherche	101
Tableau 4 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, synthèse des propriétés du filament renforcé utilisé dans le cadre de ces travaux et du filament développé par Arevo	101
Tableau 5 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, caractéristiques du matériau utilisé dans le cadre de la stratégie de renforcement	115
Tableau 6 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, comparatif des deux procédés relatifs à la fabrication additive de composants de grandes dimensions à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus	122
Tableau 7 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, paramètres intrinsèques des porteurs	132
Tableau 8 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, choix d'un procédé de fabrication en fonction des caractéristiques du composant à fabriquer.....	136
Tableau 9 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, nécessité de contrôler la direction d'avance en fonction de la buse d'injection et du matériau utilisé	140
Tableau 10 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, problématiques rencontrées et solutions mises en place lors du paramétrage d'un effecteur additif.....	143
Tableau 11 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, choix d'une architecture cinématique en fonction de la stratégie de sectionnement, du matériau et de la buse d'injection.....	146
Tableau 12 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, caractéristiques des démonstrateurs et des essais réalisés dans le cadre de ces travaux de recherche	151
Tableau 13 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, paramètres des buses d'injection utilisées dans le cadre de ces travaux de recherche	152
Tableau 14 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, matériaux et sections de sortie des buses utilisées lors de la réalisation des cas d'application.....	155
Tableau 15 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, cinématique porteur nécessaire à la réalisation des cas d'applications de la méthodologie	156

LISTE DES EQUATIONS

Équation 1 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, calcul de la masse volumique du filament via la méthode de la double pesée	100
Équation 2 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondu, charge appliquée sur l'assise de la chaise	108
Équation 3: critère de Von Mises	108

INTRODUCTION

CONTEXTE

Si les références présentes dans la littérature convergent pour dater l'invention du premier procédé additif à la seconde moitié du 19^{ème} siècle, c'est réellement depuis le début des années 2000 que la fabrication additive est entrée dans l'âge adulte : malgré la pandémie qui a durement touché tous les secteurs de l'économie, le marché mondial et la recherche scientifique sont en constante progression. Entre 2015 et 2018, les demandes de brevets européens liés à la fabrication additive ont connu une croissance annuelle moyenne de 36%, soit une augmentation dix fois supérieure à la croissance annuelle moyenne de l'ensemble des demandes de brevets. Ainsi, de nos jours, la majorité des secteurs d'activités industriels ont intégré les procédés additifs à leurs activités de recherche et de développement : secteur naval, secteur aéronautique, industrie automobile, industrie médicale, bâtiment et architecture, ...

Au sein de la famille des procédés additifs, ceux utilisant des matériaux polymères thermoplastiques fondus ont longtemps été cantonnés à la réalisation de composants à des fins de loisirs et de prototypage rapide (procédés communément regroupés sous le nom d'impression 3D). Si cet usage a permis la démocratisation de la fabrication additive et sa connaissance par le plus grand nombre, il a aussi retardé son entrée dans le domaine des pièces fonctionnelles par manque de considération : le niveau de maturité technologique des procédés additifs à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus a connu un retard par rapport aux procédés additifs à partir de fils et de poudres métalliques. Ces dernières années, l'arrivée de matériaux innovants a permis de réaliser un bond en avant en termes de propriétés mécaniques intrinsèques. Les laboratoires de recherche et les industriels ont vu s'ouvrir le champ des possibles en termes de composants de grandes dimensions :

- composants fonctionnels structuraux réalisés à partir de matériaux renforcés de fibres continues, destinés par exemple à la réalisation d'équipements sportifs sur mesure ;
- composants fonctionnels non structuraux permettant la réalisation de moules de grandes dimensions destinés à l'industrie des pièces en matériaux composites.

La réalisation de ces composants de grandes dimensions demande, entre autres, l'intégration de méthodes génériques et le développement de règles métier spécifiques au procédé utilisé qui sont pour le moment inexistantes au sein de la littérature scientifique. Leur développement permettra ainsi d'augmenter le niveau de maturité technologique du procédé et d'étendre son champ d'application.

CONTRIBUTIONS

Les travaux présentés dans ce manuscrit s'inscrivent dans le cadre du développement des méthodes et des règles spécifiques aux procédés additifs réalisés à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus : une méthodologie générique ayant pour objectif la préparation à la fabrication de composants de grandes dimensions sera proposée. Cette dernière s'appuie sur une approche générique qui permette de réaliser n'importe quel type de composants sans restriction sur la nature des matériaux polymères, les procédés additifs et les porteurs utilisés. La préparation à la fabrication d'un composant de grandes dimensions sera décomposée en trois principales étapes : mise en position et sectionnement du composant, mise en place des stratégies de fabrication, choix et paramétrage du moyen de fabrication.

La méthodologie proposera également l'intégration d'un axe de recherche concernant l'utilisation de matériaux renforcés de fibres continues dans le cadre de stratégies de renforcement, ayant pour objectif de pallier la problématique d'anisotropie des propriétés mécaniques inhérente au procédé, et la paramétrisation des trajectoires de fabrication via l'emploi de la simulation par éléments finis. Pour finir, la réalisation de démonstrateurs de grandes dimensions permettra de mettre en lumière la pertinence des éléments présentés au sein de la méthodologie mais aussi les améliorations pouvant lui être apportées.

PLAN DE LECTURE

Au sein du chapitre 1, seront d'abord traités un état de l'art sur la fabrication additive puis un état de l'art spécifique à la fabrication additive de composants de grandes dimensions réalisés à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus. A cette occasion, les démonstrateurs de grandes dimensions et les problématiques scientifiques relatives à ce domaine seront mises en lumière. Ensuite, sera présentée la méthodologie de préparation à la fabrication. Ses données d'entrée et de sortie, ses objectifs et les différentes étapes la constituant seront développés. En fin de chapitre seront exposés les démonstrateurs de grandes dimensions réalisés dans le cadre de ces travaux de recherche.

Le chapitre 2 sera consacré à la première étape de méthodologie (Figure 1A). Au sein de cette dernière, le composant à fabriquer sera mis en position sur un plateau de fabrication générique, le choix du porteur intervenant plus tard dans la méthodologie. Cela se fera en fonction de règles liées au procédé, visant la diminution du temps de cycle de fabrication et la diminution de la quantité de matière déposée ; il sera décomposé en entités lorsque cela s'avère nécessaire suivant une règle de décomposition intégrant des contraintes de fabricabilité et finalement sectionné en fonction de règles liées au procédé et aux géométries du composant. En fin de chapitre, les éléments présentés seront appliqués aux démonstrateurs de grandes dimensions.

Le chapitre 3 sera relatif à la deuxième étape de la méthodologie qui a pour objectif la mise en place des stratégies de fabrication (Figure 1B). Ces dernières seront divisées en deux catégories : stratégies additives, constituées des stratégies volumiques et de renforcement et stratégies de parachèvement. Seront d'abord présentées les notions et problématiques scientifiques relatives aux stratégies de fabrication :

- les stratégies volumiques ayant pour objectif la réalisation du volume global du composant et la tenue aux sollicitations mécaniques orientées dans la direction des couches de matière déposées ;
- les stratégies de renforcement ayant pour objectif de résoudre la problématique d'anisotropie des propriétés mécaniques en déposant des couches de matière sur les pourtours extérieurs d'un composant. Ces stratégies intègrent également un axe de recherche concernant l'utilisation de matériaux renforcés de fibres continues ;
- les stratégies de parachèvement ayant pour objectif l'obtention de surfaces conformes à des contraintes dimensionnelles, géométriques ou d'état de surface via le retrait d'un surplus de matière volontairement ajouté à la maquette numérique lors de l'étape précédente. Leur développement n'a pas été réalisé lors de ces travaux mais ces dernières seront tout de même présentées comme étant partie prenante de la méthodologie.

Ensuite seront traitées des méthodes permettant la mise en place des stratégies volumiques et de renforcement développées dans le cadre de ces travaux. Finalement seront illustrées les stratégies de fabrication mises en place dans le cadre de la réalisation des cas d'applications.

Le chapitre 4 portera sur la dernière étape de la méthodologie qui aura pour but de choisir et de paramétrer le moyen de fabrication, défini comme étant le couple effecteurs – porteur (Figure 1C). Dans ce chapitre, les notions relatives aux effecteurs et aux porteurs seront d'abord présentées puis les problématiques scientifiques seront développées : choix et paramétrage effecteurs additifs en fonction de paramètres propres au composant à fabriquer (optimisation de l'adhésion entre les couches déposées, prise en compte des matériaux utilisés et de la section des cordons déposés, accessibilité aux trajectoires de fabrication), choix et paramétrage d'un porteur en fonction de paramètres propres au composant à fabriquer (dimensions du composant à réaliser, orientation des effecteur le long des trajectoires de fabrication). Deux méthodologies prenant en compte les problématiques précédemment mentionnées afin de choisir et paramétrer les effecteurs additifs et le porteur ont été réalisées et seront ensuite mises en avant. La résolution de la problématique de choix et de paramétrage des effecteurs soustractifs n'a quant à elle pas été abordée dans le cadre de ces travaux. Pour finir, le moyen de fabrication adapté à la

réalisation des cas d'application de la méthodologie a été choisi et paramétré et les cas d'applications fabriqués.

Pour conclure, une partie traitant des travaux et des apports scientifiques de ce manuscrit ainsi que sur les futurs axes de développement relatifs à la méthodologie sera présentée.



Figure 1 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondus, principales étapes de la méthodologie de préparation à la fabrication

CHAPITRE 1 - ETAT DE L'ART ET PRESENTATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE

1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, un état de l'art général à la fabrication additive sera d'abord réalisé. A cette occasion, la chronologie, les différents procédés, la chaîne de valeurs et les différents marchés liés à la fabrication additive seront présentés. Ensuite, un état de l'art spécifique à la fabrication additive à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus sera développé. Les différents matériaux utilisés, les différents démonstrateurs de grandes dimensions et les problématiques scientifiques à résoudre seront mis en lumière. Puis, les objectifs de la méthodologie de préparation à la fabrication développée dans le cadre de ces travaux de recherche, se proposant de résoudre les problématiques scientifiques évoquées dans la partie précédente, seront mis en avant. Les différentes étapes de cette dernière seront expliquées : mise en position, décomposition et sectionnement d'un composant ; choix et mise en place de stratégies de fabrication ; choix et paramétrage du moyen de fabrication. Pour finir, les cas d'applications de grandes dimensions permettant de mettre en avant la généricité de la méthodologie ainsi que les problématiques scientifiques et techniques engendrées par ces derniers seront présentés.

2. ETAT DE L'ART GENERAL SUR LA FABRICATION ADDITIVE

2.1. HISTORIQUE DE LA FABRICATION ADDITIVE

La fabrication additive est définie comme « L'ensemble des procédés permettant de fabriquer, couche par couche, par ajout de matière, un objet physique à partir d'un objet numérique » [1]. Cette dernière est source d'innovation à la fois dans la façon de concevoir les objets et de les produire [2]. Historiquement, les références présentes dans la littérature convergent pour dater l'invention des premiers procédés additifs à la seconde moitié du 19^{ème} siècle lorsque François Willème invente la photosculture (dépôt du brevet le 14 août 1860) [3]. Ce procédé, considéré comme l'ancêtre de la fabrication additive actuelle, permet la reproduction photographique des objets en relief d'après nature [4]. Quelques années plus tard, en 1892, l'inventeur Joseph E. Blather dépose un brevet pour une méthode de création de cartes topographiques 3D utilisant une méthode de superposition - concept dont s'inspirent certaines imprimantes 3D actuelles [5].

C'est néanmoins au début des années 80 que le développement de la fabrication additive s'accélère. Le 16 juillet 1984, Jean-Claude André, Alain Le Méhauté et Olivier de Witte déposent un brevet pour le compte de la Compagnie industrielle des lasers (Cilas Alcatel) concernant la fabrication additive par photopolymérisation [6]. Malgré l'aspect novateur de cette technologie, les fonds nécessaires à son développement sont gelés et le projet est avorté. Quelques semaines plus tard aux Etats Unis, l'américain Chuck Hull brevète la technique de stéréolithographie (SLA pour Stéréolithographie Apparatus) [7] (Figure 2A). Ce procédé, à l'origine de l'extension de fichier .stl communément utilisée lors de l'import de maquettes numériques au sein des logiciels de fabrication additive, est le point de départ de l'entreprise 3D Systems considérée aujourd'hui comme un poids lourd du marché des imprimantes 3D [8]. En 1988, Carl Deckard invente le procédé SLS (Selective Laser Sintering) dans un laboratoire de l'Université du Texas à Austin [9]. Un an plus tard, S. Scott Crump brevète le procédé « Fused Deposition Modeling » (FDM) et crée avec sa femme l'entreprise Stratasys, pionnière du secteur des imprimantes 3D et de la fabrication de pièces à base de matériaux polymères thermoplastiques [10], [11] (Figure 2B). Suivent au cours des années 1990 l'invention des procédés « Binder Jetting » (1993, impression 3D par liage de poudres [12]), « Material Jetting » (1993, impression 3D par jet de matière [13]) et « Selective Laser Melting » (1996, SLM, impression 3D par fusion sélective [14]). Par analogie, la période allant des années 1980 à 2000 peut être considérée comme l'enfance de la fabrication additive : des procédés audacieux ont été découverts, des champs d'application nouveaux ont été établis. Les dix années suivantes, de 2000 à 2010, peuvent être considérées comme l'adolescence de la fabrication additive. La culture « Maker » prend naissance au sein de l'Université de Bath en 2004 avec le démarrage du projet RepRap (pour Replicating Rapid-prototyper), visant à créer une imprimante 3D en grande partie autorépliquative, open source et utilisant le procédé FDM [15] (Figure 2C). De nouveaux procédés voient le jour, comme le procédé CLAD (pour « Construction Laser Additive Direct », 2006)

offrant la possibilité de réaliser des pièces avec gradient de matériau à partir de poudres métalliques [1] (Figure 2D). Petit à petit, les technologies se démocratisent pour les entreprises et les particuliers tandis que les parts de marché progressent [2]. Les laboratoires de recherche s'emparent du sujet et le nombre de brevets déposés auprès de l'OEB (Office Européen des Brevets) est en augmentation constante, passant de 325 en l'an 2000 à 647 en l'an 2009 [16].

Depuis 2010, force est de constater que la fabrication additive est entrée à l'âge adulte. Alors que le nombre de brevets déposés auprès de l'OEB était de 828 en l'an 2010, 4072 brevets étaient déposés en l'an 2018. Entre 2015 et 2018, les demandes de brevets européens liés à la fabrication additive ont connu une croissance annuelle moyenne de 36% soit une augmentation "dix fois supérieure à la croissance annuelle moyenne de l'ensemble des demandes de brevets" [16]. L'accroissement moyen du secteur additif a été de 27,4% de 2009 à 2019 et d'après le rapport Wohlers 2021, le marché de la fabrication additive a augmenté de 7,5% pour s'établir à 12,8 milliards en 2020 (contre 11,8 milliards en 2019). Et ce malgré la pandémie mondiale qui a durement touché tous les secteurs de l'économie [17]. Le rapport 2019 du cabinet américain SmarTech Analysis, qui regroupe les quatre principaux segments de l'industrie additive (matériel, matériaux, logiciels et services), prévoit une activité annuelle du domaine additif de plus de 53 milliards de dollars en 2029. Ce rapport classe également la France comme le 4^{ème} pays au monde ayant généré le plus de revenus dans le domaine derrière l'Allemagne, les Etats-Unis et la Chine (489 millions d'euros de chiffre d'affaires pour la France contre 1282 millions d'euros de chiffre d'affaire pour l'Allemagne, 1232 pour les Etats-Unis et 1046 pour la Chine) [18].

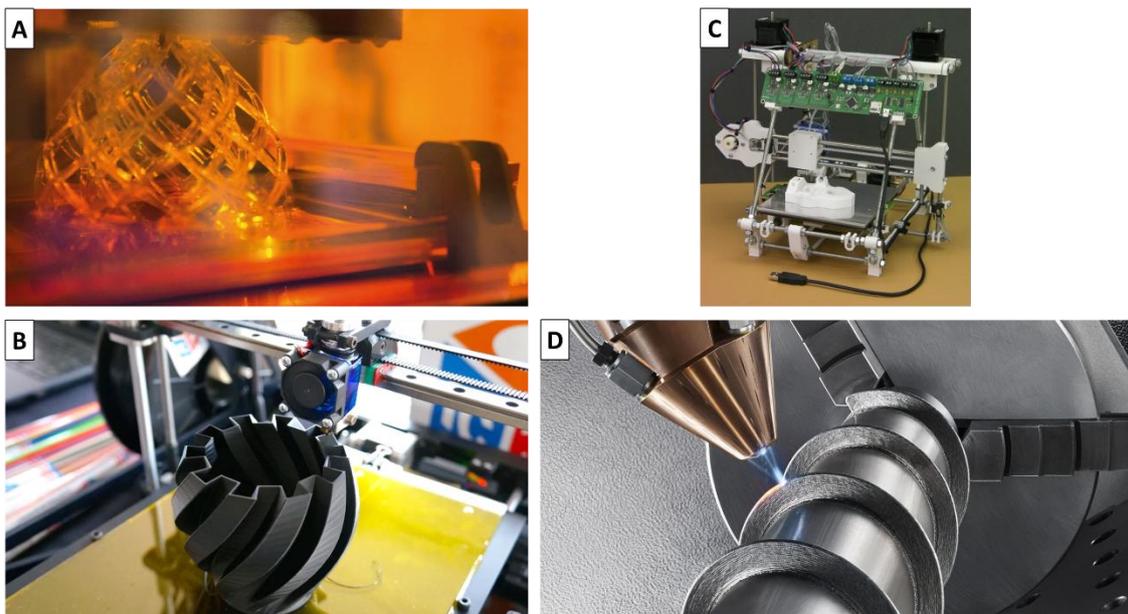


Figure 2 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, procédé SLA (A) – Machine RepRap (B) – procédé FDM (C) – procédé CLAD (D)

2.2. PROCÉDES DE FABRICATION ET APPLICATIONS

Les procédés de fabrication additive sont divisés en sept catégories, chacun d'entre eux étant lié à un ou plusieurs types de matériaux (suivant la norme ISO 17296-2:2015, Figure 3) : photo polymérisation en cuve, projection de matière, projection de liant, fusion sur lit de poudre, extrusion de matière, dépôt de matière sous flux d'énergie dirigée et stratification de couches [19].

	PHOTO POLYMERISATION EN CUVE					
	PROJECTION DE MATIERE					
		PROJECTION DE LIANT				
			FUSION SUR LIT DE POUDRE			
				EXTRUSION DE MATIERE		
					DEPOT DE MATIERE SOUS FLUX D'ENERGIE DIRIGE	
						STRATIFICATION DE COUCHES
MATERIAUX						
POLYMERES THERMODURCISSABLES	X	X				
POLYMERES THERMOPLASTIQUES		X	X	X	X	X
BOIS						X
METAUX	X		X	X		X
MATERIAUX CERAMIQUES INDUSTRIELS	X		X	X		X
MATERIAUX CERAMIQUES STRUCTURELS			X	X	X	

Figure 3 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, classes de procédés de fabrication additive suivant la norme ISO 17296-2:2015 [19]

De nos jours, la majorité des secteurs d'activités industrielle ont intégré les procédés additifs à leurs activités de recherche et développement. On peut citer quelques exemples :

- dans le secteur naval, la première pale creuse a été réalisée via le procédé Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM, dépôt de matière métallique sous flux d'énergie dirigé) dans le cadre d'un partenariat entre l'entreprise Naval Group et l'Ecole Centrale de Nantes (projet RAMSSES, projet européen H2020). L'utilisation de la fabrication additive a permis de réaliser ce composant de grandes dimensions ce qui aurait été impossible avec le procédé de fonderie traditionnellement utilisé [20] (Figure 4A) ;
- dans le secteur aéronautique, la fabrication additive permet de répondre à la problématique d'allègement des structures afin de minimiser la consommation en kérozène des avions [21]. Des alliages métalliques de type Inconel, titane ou aluminium sont utilisés pour réaliser des pièces structurelles ou de motorisation. Le procédé SLM (fusion sur lit de poudre de matériaux métalliques) permet par exemple de produire des pièces métalliques aux géométries complexes à destination des motoristes [22]. L'entreprise STELIA, en collaboration avec l'Ecole Centrale de Nantes, a eu recours au procédé WAAM afin de réaliser un panneau de fuselage au design disruptif dans le cadre du projet DGA/DGAC DEFACTO [23] (Figure 4B) ;
- dans l'industrie automobile, les équipementiers ont historiquement utilisé le procédé FDM (extrusion de matériaux polymères thermoplastiques) à des fins de prototypage rapide [2] (Figure 4C). Maintenant un cap a été franchi et le segment des pièces fonctionnelles est en forte croissance : l'emploi d'outils d'optimisation topologique permet de diminuer la masse globale tout en augmentant les propriétés mécaniques des pièces moteurs via la réalisation, par exemple, de structure treillis. Signe de l'engouement naissant, le groupe BMW a ouvert en 2020 le « Additive Manufacturing Campus » non loin de Munich afin d'accélérer les projets de recherche et développement dans ce secteur [24] ;
- la fabrication additive à destination du médical est un domaine en plein développement [2]. Le champ d'application est vaste, allant du dentaire aux prothèses de membres en passant par les implants [25] (Figure 4D). De plus, grâce à la bio impression, des cellules et des biomatériaux

peuvent être combinés afin de créer des structures cellulaires ayant les mêmes propriétés que les tissus naturels [26] ;

- dans le secteur du bâtiment et de l'architecture, on réalise la construction d'habitations directement sur site est réalisée : la première fabrication additive d'une maison a eu lieu à Nantes en 2017 dans le cadre du projet Yhnova [27] (Figure 4E).

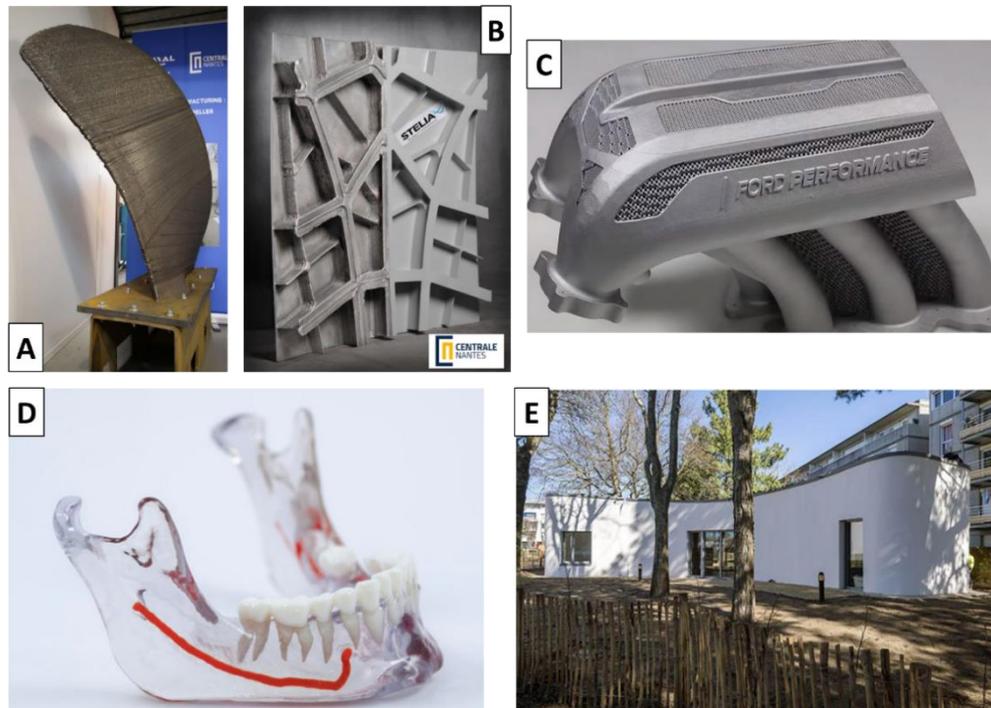


Figure 4 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, démonstrateurs réalisés de manière additive dans le cadre d'applications navales (A) – aéronautiques (B) – automobiles (C) – dentaires (D) – liées à la construction (E)

Par ailleurs, la fabrication additive est particulièrement adaptée à la réalisation d'outillages et de moules de grandes dimensions, destinés par exemple à la fabrication de pièces en matériaux composites ou à la réalisation d'équipements sportifs sur-mesure (cadres de vélos, planches de surf). Des démonstrateurs en cours de qualification industrielle ont été illustrés au sein de la littérature scientifique et seront présentés au sein de la partie 3 du présent chapitre [2].

2.3 ATOUTS ET FAIBLESSES DE LA FABRICATION ADDITIVE

La chaîne de valeur de la fabrication additive est en fort développement : les fabricants de machines ciblent aujourd'hui les imprimantes 3D grand public ainsi que les machines industrielles, des solutions logicielles adaptées à la fabrication additive sont en cours de développement (fabrication assistée par ordinateur, simulation par éléments finis, simulation thermomécanique, optimisation topologique). Les fournisseurs de matériaux créent de nouveaux produits et les laboratoires de recherche réalisent de nombreux démonstrateurs innovants [2]. En effet, les avantages liés à la fabrication additive sont nombreux [2] :

- fabrication de produits aux géométries complexes et personnalisées à moindre coût ;
- réduction des délais d'approvisionnement ou de réalisation de prototypes ;
- réduction du nombre de composants au sein d'un système et donc du nombre d'étapes d'assemblage ;
- économies d'énergie induites par un allègement des pièces, notamment dans les secteurs associés au transport (automobile, ferroviaire et aéronautique) ;

- possibilité de « concevoir par rapport à une performance attendue et non plus par rapport aux contraintes de fabrication et/ou d'assemblage » ;
- possibilité de développer des matériaux innovants et impossibles à fabriquer auparavant ;
- gestion des obsolescences afin de produire des composants pour lesquels la production a été stoppée ;
- réduction du temps d'immobilisation et des cycles de développement facilitant ainsi l'innovation des produits manufacturés ;
- élimination partielle d'outils et de dispositifs coûteux, réduisant ainsi le post-traitement, le gaspillage de matériaux et l'intervention humaine [28].

Dans une moindre mesure, nous pouvons également citer les aspects liés à la réduction des coûts de transport et à la possibilité de relocalisation de la production au sein des pays touchés par la désindustrialisation. Toutefois, ces paramètres sont associés à une vision à moyen terme impliquant un changement de modèle économique dans laquelle la plupart des acteurs ne se projettent pas encore [2]. La fabrication additive est également considérée comme l'une des cinq technologies majeures de l'industrie 4.0 [29] : son utilisation, en combinaison avec d'autres technologies, entraîne l'industrie vers une production intelligente où les machines, les systèmes et les réseaux sont capables d'échanger des informations en temps réel afin d'optimiser la gestion de la production.

A l'opposé, la fabrication additive se doit de résoudre les problématiques qui freinent son développement [2] :

- intégration des principes associés au domaine additif à l'ensemble de la chaîne de valeurs : approvisionnement et gestion de la matière, optimisation des phases de conception et de préparation à la fabrication, traitement thermique, opérations de contrôle, de qualifications ou encore homologation ;
- faiblesse de la fiabilité et de répétabilité lors de la fabrication des composants, les limites actuelles étant dues à la faible répétabilité des lots de matière produits et au manque de connaissances physico-chimiques des procédés ;
- faiblesse du couple vitesse de fabrication – coût de production, qui devra être optimisé pour que les composants produits deviennent compétitifs lors de la production en grandes série ;
- tolérances géométriques, dimensionnelles et états de surface des produits finis à optimiser via le développement de traitements post-fabrication et l'hybridation des procédés.

2.4. CONCLUSION SUR L'ETAT DE L'ART GENERAL A LA FABRICATION ADDITIVE

Si on peut dater l'invention de la fabrication additive à l'an 1860, c'est depuis les années 80 que cette dernière connaît un réel essor. Les dix années passées confirment cette tendance : le nombre de brevets déposés est en pleine croissance et le chiffre d'affaires annuel en augmentation constante, malgré la pandémie mondiale qui a durement touché l'économie.

Les procédés additifs sont divisés en sept catégories différentes, chacune des catégories étant liée à une ou plusieurs natures de matériaux. Ces travaux de recherche portent sur la fabrication additive de composants de grandes dimensions réalisés à partir de matériaux polymères thermoplastiques et de procédés classés dans la catégorie « Extrusion de matière ».

A l'heure actuelle, la majorité des secteurs industriels, naval, aéronautique, automobile, médical ou encore construction, ont intégré la fabrication additive à leurs activités de recherche et développement. Des démonstrateurs de grandes dimensions ont été réalisés, certains étant même en cours de qualification industrielle afin d'être intégrés aux processus de production.

La fabrication additive apporte de nombreux éléments novateurs et pertinents :

- elle permet de repenser la façon de concevoir et de fabriquer les produits, en s'affranchissant d'un certain nombre de limites induites par les procédés de fabrication traditionnels. Elle le

permet de concevoir par rapport à une performance attendue et non plus par rapport aux contraintes de fabrication ou d'assemblage ;

- les temps d'immobilisation et de développement des produits sont minimisés ;
- la gestion des obsolescences des biens manufacturés est facilitée.

Néanmoins, un certain nombre de problématiques se doivent d'être surmontées : les principes associés à la fabrication additive doivent être intégrés à l'ensemble de la chaîne de valeurs actuelles (conception, préparation à la fabrication, contrôle, qualification, homologation), les connaissances liées aux aspects physico-chimiques doivent être approfondies, le couple vitesse de fabrication – cout de production doit être optimisé et les tolérances géométriques, dimensionnelles et les états de surface des produits finis doivent être améliorés.

3. FABRICATION ADDITIVE DE COMPOSANTS DE GRANDES DIMENSIONS A PARTIR DE MATERIAUX POLYMERES THERMOPLASTIQUES

3.1. HISTORIQUE DE LA FABRICATION ADDITIVE A PARTIR DE POLYMERES THERMOPLASTIQUES FONDUS

Comme cela a été mentionné au sein de la partie précédente, l'utilisation des polymères thermoplastique fondus pour la fabrication additive débute en 1989 à la suite de la création du procédé FDM [10], [11]. Dans les années qui suivent se développe la fabrication de modèles de petites dimensions, réalisés à partir de polymères bon marché aux faibles propriétés mécaniques afin de fabriquer des prototypes de pièces aux dimensions réelles dans le cadre d'application industrielles. C'est d'ailleurs à ce moment-là que le procédé acquiert le nom officieux de prototypage rapide [30]–[32]. Parallèlement à ces applications se développe le marché des imprimantes 3D de bureau, basées sur le procédé développé par l'entreprise Stratasys et destinées à être vendues aux particuliers. L'usage des composants produits s'oriente alors vers les loisirs comme par exemple la fabrication de figurines [33]. Le projet RepRap, créé au sein de l'Université de Bath en 2004, participe en grande partie à l'engouement créé autour de ces machines [15]. Un réseau mondial de Fab Lab (contraction de l'anglais « fabrication laboratory », laboratoire de fabrication) ouvert au public et permettant de donner l'accès à des outils de fabrication numérique tels que des imprimantes 3D et des machines-outils se met en place [34]. Même si la production de pièces via le réseau des Fab Lab reste anecdotique, ces derniers démocratisent l'usage des technologies additives et permettent aux bricoleurs et aux étudiants de réaliser des projets créatifs. De plus, l'arrivée des brevets liés au procédé FDM dans le domaine public en 2009 ouvre la voie à une vague d'innovations et permet une baisse significative des coûts de fabrication, engendrant une visibilité accrue.

C'est avec l'arrivée de matériaux polymères thermoplastiques renforcés de fibres courtes, longues et continues permettant d'améliorer les propriétés mécaniques des composants produits que les applications additives de grandes dimensions à visée industrielle voient le jour [35], [36]. A partir de 2013, Love et al. [37] développent un partenariat avec l'entreprise Cincinatti Incorporated à travers deux CRADA (pour « Cooperative Research and Development Agreement », CRADA N°1 de 2014 à 2015 [38] et CRADA N°2 de 2016 à 2019 [39]) afin de mettre au point un équipement destiné à réaliser des composants de grandes dimensions à partir de matériaux polymères thermoplastiques renforcés de fibres courtes (Figure 5A). Plusieurs démonstrateurs, présentés dans la suite de cette partie, ont permis de mettre en avant la pertinence du procédé dans le cadre de diverses applications. Peu de temps après, l'entreprise Thermwood [40] développe un procédé similaire permettant également la réalisation de composants de grandes dimensions (Figure 5B). L'utilisation de matériaux polymères thermoplastiques renforcés de fibres courtes (30% de la fraction volumique) optimise les propriétés mécaniques des composants produits, les sources présentes au sein de la littérature scientifiques convergeant autour d'une augmentation de 30% de ces dernières, sans pour autant changer outre mesure la mise en place du procédé et des trajectoires de fabrication [41]. La gamme de matériaux utilisables est variée : matrices en PLA, PETG, en Nylon, en PEEK ou en PEKK, renforts en carbone, verre ou encore en kevlar. Cependant, l'usage de ces matériaux n'est pas adapté à la réalisation de composants structuraux soumis à de fortes sollicitations mécaniques. De plus, l'utilisation de matériaux renforcés de fibres courtes n'a

pas d'effet sur la problématique d'anisotropie entre les couches de matière déposées, anisotropie due à la faible adhésion entre ces dernières.

En 2014, l'entreprise Markforged présente au salon "SolidWorks World 2014" le premier prototype de machine capable de réaliser des pièces fonctionnelles en matériaux polymères thermoplastiques renforcés de fibres continues [42] (Figure 5C). En 2016, Matsuzaki et al. [43] publient la première publication scientifique portant sur la fabrication additive à partir des mêmes matériaux. Il s'ensuit un accroissement des publications dans ce domaine, au sein desquelles des essais mécaniques quasi statiques sont majoritairement menés : traction, flexion, compression et cisaillement. S'il apparaît que l'utilisation de matériaux renforcés de fibres continues augmente fortement la résistance mécanique des composants produits le long de la direction de dépôt des fibres, des problématiques scientifiques restent à résoudre :

- développement d'une large gamme de matériaux utilisables, pour le moment limitée à quelques applications commerciales (Markforged, Arevo, Destop Metal) ;
- développement de règles propres à l'utilisation de fibres continues, notamment dans le cadre de la génération des trajectoires de fabrication ;
- augmentation de la fraction volumique de fibres, limitée à 50%, ce qui minimise l'apport en termes de propriétés mécaniques du matériau utilisé ;
- minimisation du taux de porosité au sein des composants produits en comparaison des standards mis en place dans le domaine des matériaux composites (porosité inférieure à 2%) ;
- anisotropie des propriétés mécaniques toujours présente au sein des composants produits, due à l'absence de développement de trajectoires de fabrication suivant la direction considérée comme mécaniquement faible.

En 2018, l'entreprise AREVO développe un procédé utilisant des matériaux renforcés de fibres continues afin de réaliser des composants de grandes dimensions, tels que les cadres de vélos fabriqués en un seul tenant [44] (Figure 5D).

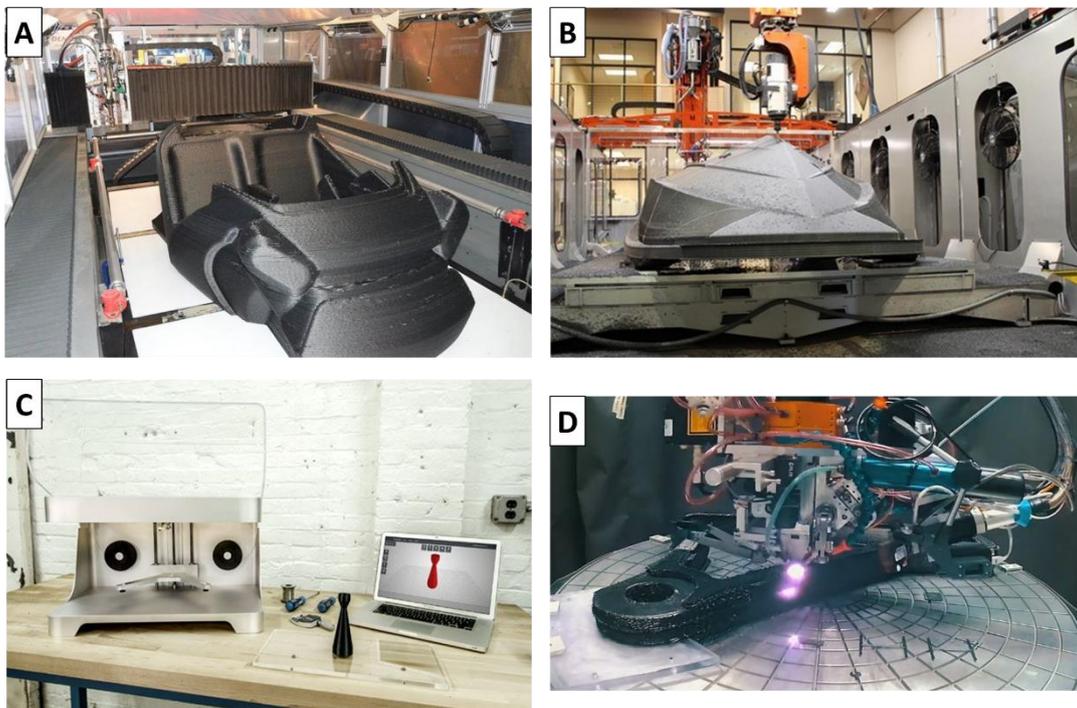


Figure 5 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, développement du procédé à des fins industrielles

3.2. COMPOSANT DE GRANDES DIMENSIONS

Il est fait mention à de multiples reprises de démonstrateurs de grandes dimensions réalisés de manière additive à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus au sein de la littérature scientifique [45]–[48]. Dans la suite de cette partie, ces derniers seront présentés au sein de deux catégories en fonction de leurs objectifs finaux [49] :

- démonstrateurs non structuraux, permettant d'assurer un rôle fonctionnel et n'ayant pas pour objectif de garantir la tenue à de fortes sollicitations mécaniques ;
- démonstrateurs structuraux, ayant pour objectif d'assurer un rôle fonctionnel et de garantir la tenue à de fortes sollicitations mécaniques.

Suite à cela, une conclusion générale sur l'état de l'art de la fabrication additive de composants de grandes dimensions à partir de polymères thermoplastiques fondus sera dressée.

3.2.1. DEMONSTRATEURS NON STRUCTURAUX

Chronologiquement, les démonstrateurs de grandes dimensions réalisés de manière additive à partir de polymères thermoplastiques fondus ont d'abord été utilisés afin de réaliser des composants non structuraux, principalement des moules destinés à réaliser des pièces en matériaux composites et des outillages de grandes dimensions, du fait des faibles propriétés mécaniques atteignables par les matériaux renforcés de fibres courtes [50], [51]. Dans la suite de cette partie, les différentes références aux composants non structuraux présentes au sein de la littérature scientifique seront développées puis une synthèse sur ces dernières sera dressée.

3.2.1.1. OUTILLAGES DE GRANDES DIMENSIONS

La fabrication d'outillages de grandes dimensions (de découpe, de perçage ou encore d'inspection), réalisés de manière additive à partir de polymères thermoplastiques fondus, est mentionnée plusieurs fois au sein de la littérature :

- Un outillage de découpe et de perçage de plus de cinq mètres de long, destiné au programme 777X, a été développé par Love et al. [52] en partenariat avec l'entreprise Boeing en remplacement de l'ancien outillage, réalisé par usinage. L'usage d'un procédé additif en lieu et place du procédé de fabrication traditionnel a permis d'alléger le composant et de réduire le délai de fabrication (Figure 6A) ;
- L'entreprise Thermwood, dans le cadre d'un partenariat avec l'entreprise Boeing, a également réalisé un outillage d'une longueur de 4 mètres destiné au programme 777X. Le temps total d'obtention du composant a été réduit de plusieurs semaines, autorisant la livraison du composant bien avant celle d'un outillage réalisé de manière conventionnelle [53] (Figure 6B) ;
- Dans le cadre d'un partenariat avec l'entreprise DTG, Love et al. [54] ont réalisé un outillage destiné à l'industrie automobile permettant l'inspection de plaques métalliques précédemment mises en forme (Figure 6C). L'outillage, ayant respecté la totalité des prérequis de son cahier des charges, a pu être réalisé d'une manière plus rapide et moins onéreuse.

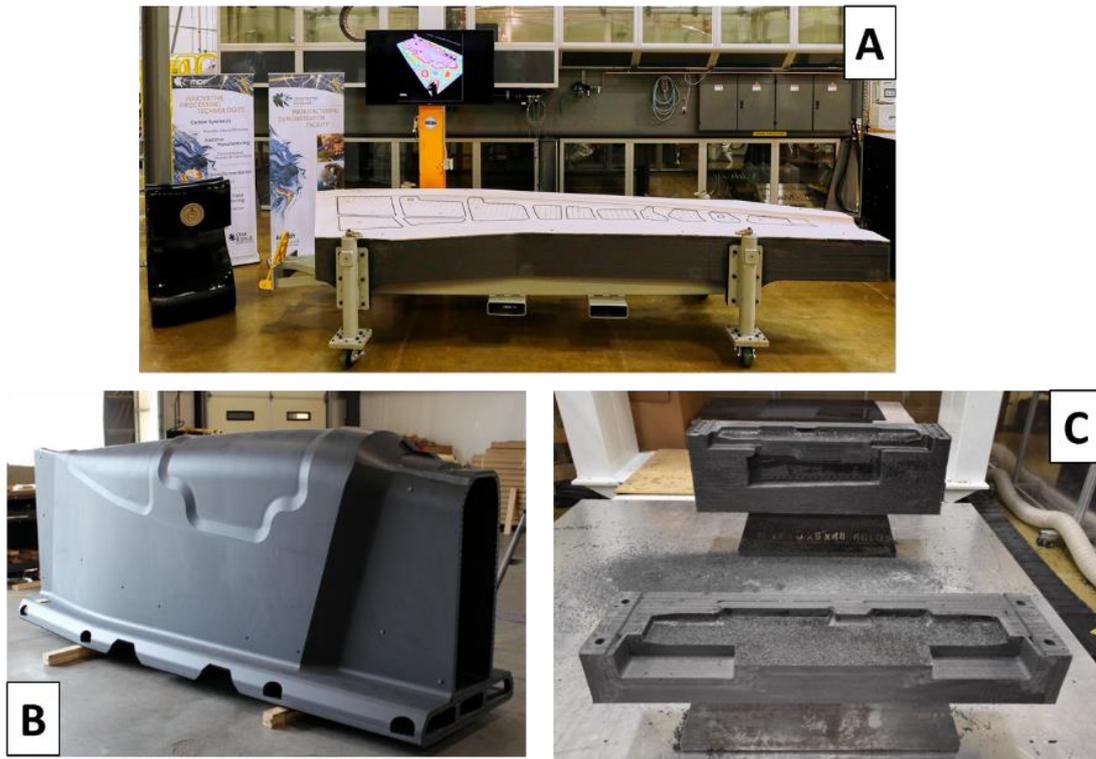


Figure 6 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, outillages de grandes dimensions

L'utilisation de la fabrication additive permet de réaliser des outillages de grandes dimensions plus légers, moins onéreux et plus rapides à concevoir et à fabriquer. Les problématiques scientifiques liées à la réalisation de ces composants sont les suivantes :

- génération et paramétrage d'opérations de parachèvement, permettant d'obtenir des surfaces conformes aux tolérances géométriques, dimensionnelles et d'état de surface au niveau des surfaces de contact intentionnelles et non intentionnelles ;
- choix et paramétrage d'un moyen de fabrication capable de réaliser l'intégralité des trajectoires de fabrication ;
- gestion des problématiques thermiques (décollement du composant de son plateau de fabrication sous l'effet de contraintes résiduelles, délamination d'une ou de plusieurs couches de matière, effondrement de la structure sous son propre poids).

3.2.1.2. MOULES DE GRANDES DIMENSIONS

La fabrication de moules destinés aux procédés de moulage au contact, par infusion sous vide et par autoclave dans le cadre de la réalisation de pièces en matériaux composites est évoquée plusieurs fois au sein de la littérature scientifique :

- Kunc et al. [50] ont réalisé un moule au contact destiné à réaliser le capot d'une réplique du véhicule Shelby Cobra. Le moule a été réalisé avec un poids réduit en comparaison avec les moules traditionnels, ce qui permet de faciliter les opérations de levage et de gréage associées au transport des outils (Figure 7A) ;
- Post et al. [55] ont réalisé un moule destiné au moulage par infusion sous vide de pales d'éoliennes d'une longueur de treize mètres en partenariat avec l'entreprise TPI Composites. Grâce à la liberté de conception offerte par la fabrication additive, le moule a été conçu et réalisé de manière à fournir un logement à des unités de chauffage, installées en une journée. En effet, durant l'opération de moulage, il doit être chauffé à une température de consigne. Des conduits permettant la circulation d'air par convection ont également été implémentés (Figure 7B). Or

dans le cadre d'un procédé traditionnel, des milliers de kilomètres de fils chauffants sont intégrés manuellement à ce dernier, ce qui prend plusieurs semaines, voire plusieurs mois (Figure 7B) ;

- Post et al. [55] ont réalisé un moule destiné au moulage par infusion sous vide de coques de catamaran, en partenariat avec l'entreprise Alliance LG LLC, d'une longueur supérieure à dix mètres. Le moule a été réalisé sans avoir eu recours à un revêtement coûteux ou à une sous structure en acier, ce qui a pour conséquence d'abaisser les délais de fabrication et de diminuer les coûts (Figure 7C) ;
- Un moule destiné à la fabrication de pales d'hélicoptères en matériau composite via le procédé de moulage par autoclave, capable de résister à des températures comprises entre 200 et 375 degrés et une pression de 7 bars, a été fabriqué par l'entreprise Thermwood en partenariat avec l'entreprise Bell [56] (Figure 7D). Au sein de l'industrie aéronautique, les délais d'obtention de ce type de composants sont très longs et la fabrication additive a permis de fortement les réduire.

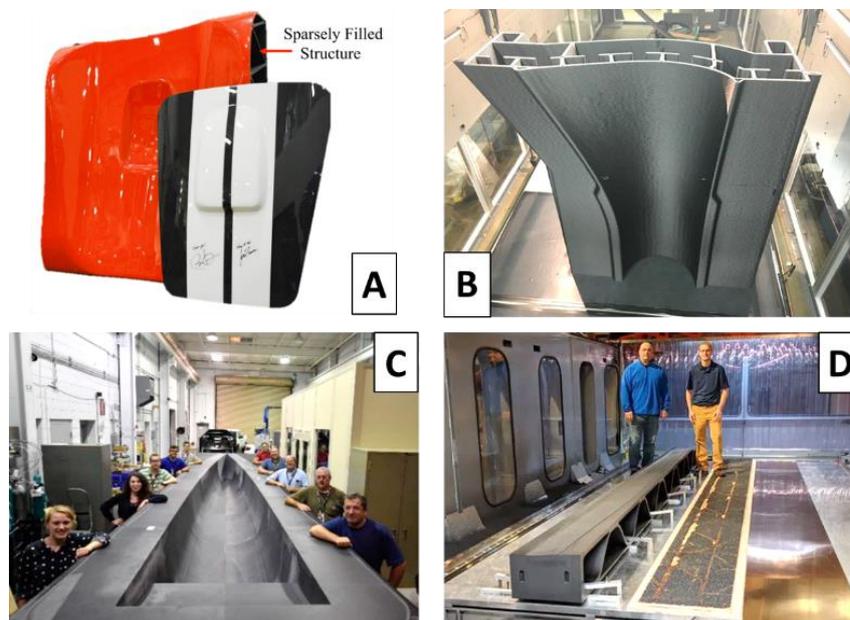


Figure 7 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, moules de grandes dimensions

La fabrication additive de démonstrateurs de grandes dimensions à partir de polymères thermoplastiques fondus permet aussi de réaliser d'autres éléments non structuraux :

- Love et al. [57] ont développé des coffrages pour béton préfabriqué, qui permettent de remplacer les composants traditionnellement réalisés à partir de bois ou d'acier par des composants en polymères ayant des géométries qui étaient jusqu'ici impossibles à réaliser (Figure 8A). La précision obtenue lors de la fabrication, le peu de main d'œuvre nécessaire à la réalisation de l'outillage et les délais d'obtention permettent au procédé additif d'apporter une plus-value quant à la fabrication de ces composants ;
- Hahnlén et al. [51] ont fabriqué des outils destinés au formage à froid et à l'hydroformage, procédés de mise en forme de plaques métalliques qui permettent de diminuer les coûts de production par rapport à la fabrication d'outils de coupe conventionnels (Figure 8B).



Figure 8 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, coffrages en béton et outils de formage et à froid et d'hydroformage

Ces démonstrateurs de grandes dimensions ont permis de montrer que la fabrication additive rend possible la réalisation de moules et de coffrages de grandes dimensions ayant des géométries impossibles à obtenir par l'intermédiaire de procédés traditionnels. Elle permet également d'optimiser la topologie du composant par rapport à des critères à maximiser ou minimiser. Par ailleurs, les coûts et délais de fabrication sont également raccourcis : les composants étant destinés à être réalisés en faibles séries, les coûts engendrés par la conception et la fabrication des composants sont déterminants. Les problématiques scientifiques engendrées par la réalisation de ces catégories de composants sont similaires aux problématiques relatives aux outillages de grandes dimensions :

- génération et paramétrage d'opérations de parachèvement, permettant d'obtenir des surfaces conformes aux tolérances géométriques, dimensionnelles et d'état de surface au niveau des surfaces de contact intentionnelles et non intentionnelles ;
- choix et paramétrage d'un moyen de fabrication capable de réaliser l'intégralité des trajectoires de fabrication ;
- gestion des problématiques thermiques (décollement du composant de son plateau de fabrication sous l'effet de contraintes résiduelles, délamination d'une ou de plusieurs couches de matière, effondrement de la structure sous son propre poids).

3.2.2. DEMONSTRATEURS STRUCTURAUX

Les démonstrateurs structuraux de grandes dimensions ont été réalisés suite à l'arrivée sur le marché des matériaux polymères thermoplastiques renforcés de fibres continues, permettant d'augmenter fortement la résistance mécanique des composants produits. Dans cette partie, les démonstrateurs structuraux mentionnés au sein de la littérature scientifique seront étudiés suivant une classification par secteurs d'activité (naval, automobile, deux-roues, génie civil).

3.2.2.1. NAVAL

Plusieurs applications structurelles, en lien avec le domaine naval, sont mentionnées au sein de la bibliographie :

- Dagher et al. [58] ont réalisé une coque de bateau ayant une longueur de près de huit mètres et un poids de 2,2 tonnes détenant le record de la plus grande pièce additive jamais construite (Figure 9A). La réalisation de cette coque d'un seul tenant a permis de réduire le temps du cycle de fabrication, de diminuer le nombre de composants assemblés et le recours aux post opérations. Le bateau a ensuite été testé par le « Alford W2 Ocean Engineering Laboratory », un laboratoire d'essais équipé d'un éoliphone haute performance et d'un bassin à houles multi-directionnelles ;
- Love et al. [59] ont réalisé, dans le cadre d'un partenariat avec le laboratoire « Navy's Disruptive Technology », la première coque de sous-marin fabriquée via un procédé

additif, d'une longueur supérieure à neuf mètres et totalisant six pièces assemblées entre elles (Figure 9B). Même si ce composant n'est qu'un prototype, cela entrouvre la voie à l'emploi de ce procédé afin de réaliser des coques de sous-marin moins coûteuses, plus rapides à produire et réalisées sur mesure.

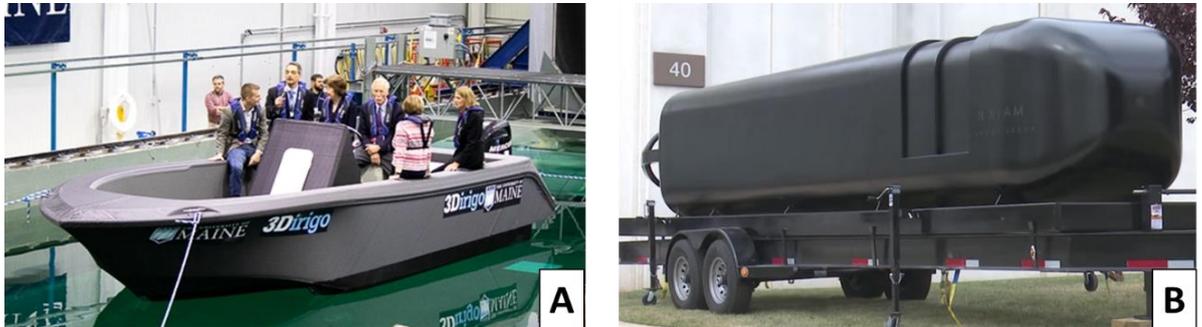


Figure 9 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, composants en lien avec le domaine naval

3.2.2.2. AUTOMOBILE

L'industrie automobile est également en demande de composants de grandes dimensions, réalisés de manière additive à partir de polymères thermoplastiques fondus :

- une collaboration entre les entreprises Polymaker et XElectrical Vehicule a permis de réaliser la 1ère voiture électrique produite en série ayant des composants majoritairement réalisés de manière additive [60]. Cela a permis de grandement réduire le nombre total de composants du véhicule tout en diminuant les temps et les coûts liés à son développement (de respectivement 90 et 70%) (Figure 10A) ;
- Love et al. [61] ont réalisé le châssis d'un véhicule électrique (Strati) en partenariat avec Local Motors Incorporation. Tandis qu'un véhicule traditionnel est composé de plus de 20 000 pièces, la Strati n'en contient que 40 (seuls les roues, les suspensions, le moteur, les tissus, l'électronique et les vitres ont été ajoutés après fabrication du châssis). De plus, la production du véhicule n'a nécessité aucun outillage coûteux (Figure 10B) ;
- Curran et al. [62] ont réalisé une réplique fonctionnelle de la mythique Shelby Cobra à l'occasion de son 50ème anniversaire en seulement six semaines, avec pour objectif de développer à l'avenir des prototypes de véhicules fonctionnels en un temps extrêmement restreint (Figure 10C).

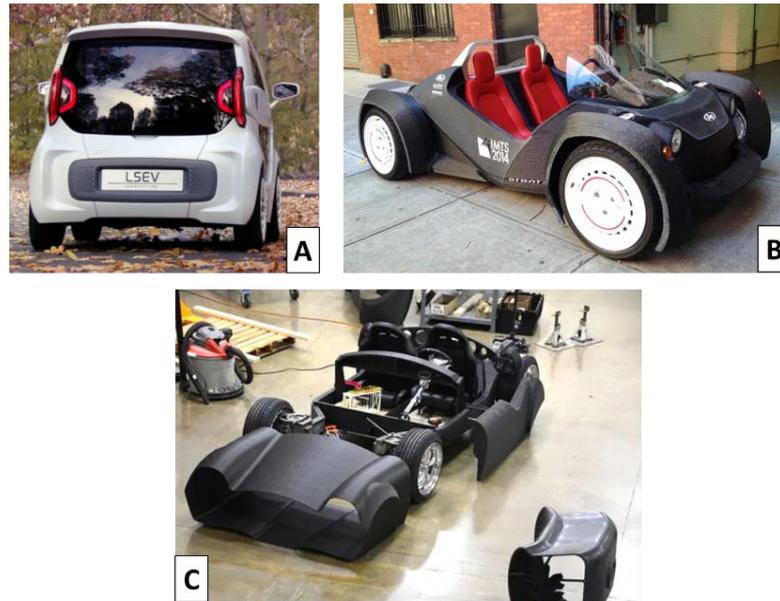


Figure 10 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, composants en lien avec l'industrie automobile

Dans le cadre de la fabrication de démonstrateurs structuraux en lien avec l'automobile, plusieurs problématiques scientifiques demandent à être résolues :

- gestion des problématiques thermiques (décollement du composant de son plateau de fabrication sous l'effet de contraintes résiduelles, délamination d'une ou de plusieurs couches de matière, effondrement de la structure sous son propre poids) ;
- mise en position des composants par rapport au plateau de fabrication afin de limiter l'usage des supports lors du cycle de fabrication ;
- choix et paramétrage d'un moyen de fabrication possédant une structure cinématique autorisant la génération de trajectoires de fabrication non planaires.

3.2.2.3. DEUX-ROUES ET EQUIPEMENTS SPORTIFS

Dans le domaine des deux roues, l'entreprise Arevo a développé plusieurs cadres de vélos monoblocs en partenariat les entreprises Franco Bicycles [63] et Superstrata [44] via l'utilisation de matériaux polymères renforcés de fibres continues (Figure 11A). Ces derniers ont plusieurs avantages comparés aux cadres en matériaux composites traditionnellement constitués de plusieurs pièces assemblées entre elles :

- la résistance aux chocs est améliorée, les jonctions entre les composants constituant les points de faiblesse de la structure lors d'une chute ;
- le temps et les moyens pourvus à l'assemblage des différents composants ne sont plus nécessaires ;
- les cadres sont entièrement réalisés sur mesure afin de s'adapter à la physiologie de l'utilisateur.

De plus, des trottinettes électriques monocoques sont également réalisées par l'entreprise Arevo [64] (Figure 11B). Ces dernières sont à l'instar des cadres de vélos adaptées aux utilisateurs (taille, poids, longueur des jambes et des bras, position de conduite), le procédé additif autorisant un niveau de personnalisation jamais atteint au sein de cette industrie. Par ailleurs, dans le domaine des équipements sportifs, l'entreprise Wyvesurf a créé un gamme de planches de surf réalisées de manière additive à partir de polymères fondus et entièrement personnalisées [65] (Figure 11C).

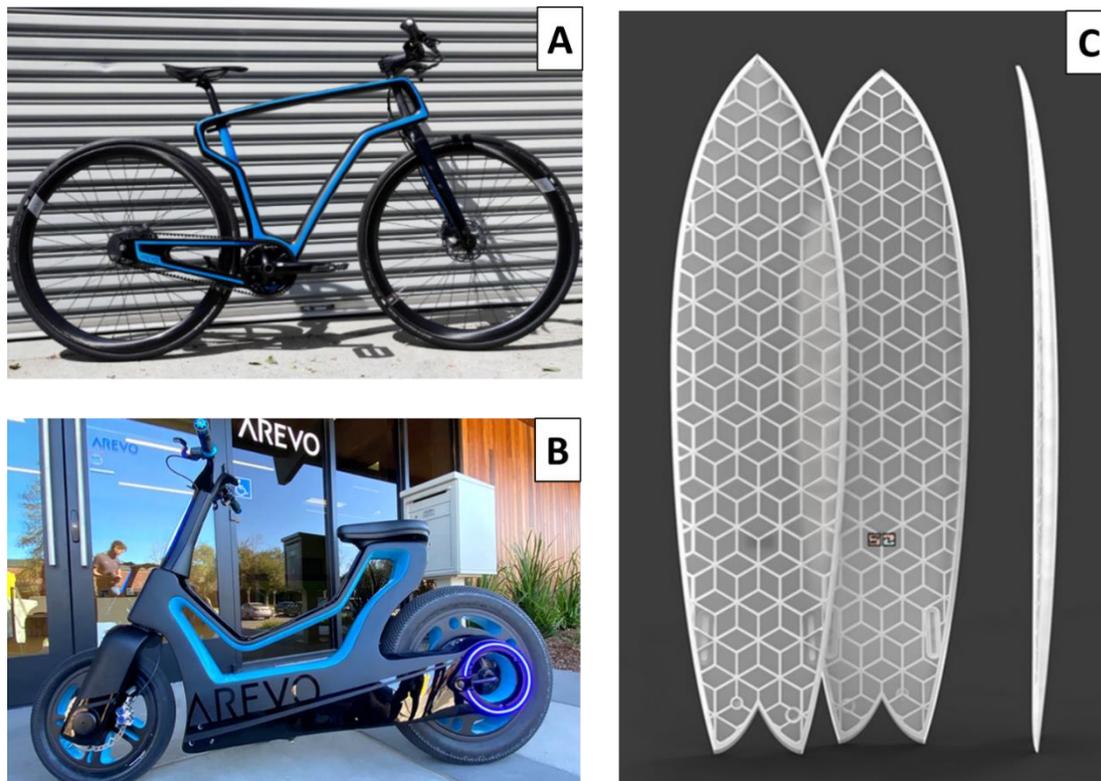


Figure 11 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, composants en lien avec le domaine des deux-roues et des équipements sportifs

Les problématiques scientifiques engendrées par la réalisation de composants structuraux liés à l'univers des deux roues avec et sans moteurs sont les suivantes :

- mise en place de trajectoires de fabrication, validées par des méthodes numériques, permettant de répondre à des sollicitations mécaniques statiques et dynamiques appliquées sur le composant lors de son service. Cette problématique s'inscrit également au sein de la problématique de résolution de l'anisotropie des propriétés mécaniques des composants produits, phénomène dû à la faible adhésion entre les couches de matière ;
- développement de règles spécifiques à l'utilisation de matériaux polymères thermoplastiques renforcés de fibres continues ;
- choix et paramétrage d'un moyen de fabrication possédant une structure cinématique autorisant la génération de trajectoires de fabrication non planaires.

Même si des démonstrateurs de grandes dimensions ont été réalisés, la résolution de ces problématiques reste empirique et n'a pas été résolue au sein de la littérature scientifique.

3.2.2.4. GENIE CIVIL

Dans le domaine du génie civil, un pont pédestre a été réalisé par l'entreprise Polymaker en partenariat avec Shanghai construction. D'une longueur supérieure à 15 mètres, ce dernier est installé dans un jardin public de la ville de Shanghai [66] (Figure 12A). Un autre pont, développé par le laboratoire de recherche de l'entreprise CEAD et dorénavant installé dans le centre-ville de Rotterdam, a également été réalisé [67] (Figure 12B). La fabrication additive de ponts a pour objectif de permettre à l'avenir la réalisation d'ouvrages plus durables ayant des coûts de maintenance inférieurs.

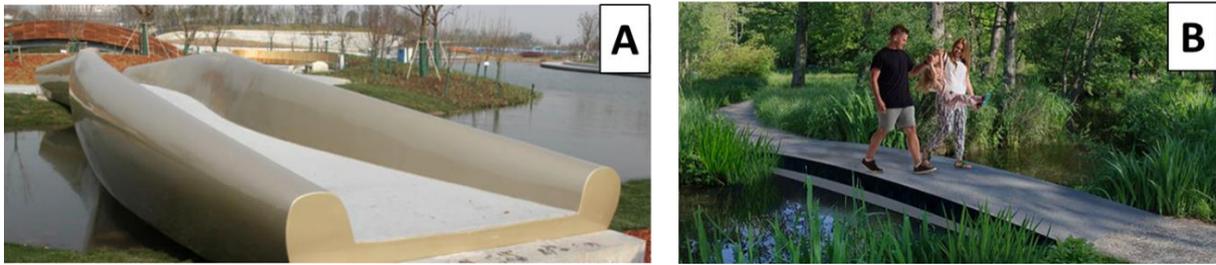


Figure 12 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, composants en lien avec le génie civil

Dans le cadre de la fabrication de structures de type génie civil, plusieurs problématiques scientifiques demandent à être résolues :

- mise en position des composants par rapport au plateau de fabrication afin de limiter l'usage des supports lors du cycle de fabrication ;
- mise en place de trajectoires de fabrication, validées par des méthodes numériques, permettant de répondre à des sollicitations mécaniques statiques et dynamiques appliquées sur le composant lors de son service.

3.3 CONCLUSION ET ANALYSE DE L'ETAT DE L'ART SPECIFIQUE A LA FABRICATION ADDITIVE REALISEE A PARTIR DE MATERIAUX POLYMERES THERMOPLASTIQUES FONDUS

La fabrication additive de composants de grandes dimensions à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus connaît depuis l'an 2010 un essor important, l'arrivée de matériaux innovants ayant permis de réaliser un bond en avant en termes de propriétés mécaniques intrinsèques :

- les matériaux renforcés de fibres courtes ont des propriétés mécaniques supérieures de 30% aux matériaux sans renforts, ce qui est suffisant à la réalisation de composants de grandes dimensions non structuraux. Leur utilisation ne modifie pas outre mesure la mise en place du procédé ;
- les matériaux renforcés de fibres longues et continues ont des propriétés mécaniques très largement supérieures aux matériaux sans renforts, ce qui les rend pertinents dans le cadre d'applications structurales de grandes dimensions. Leur utilisation modifie la mise en place du procédé et nécessite le développement de règles concernant la génération des trajectoires de fabrication. Par ailleurs, la problématique d'anisotropie des propriétés mécaniques n'a pas été résolue ce qui est en partie dû à l'absence de développement de trajectoires de fabrication suivant la direction considérée comme mécaniquement faible.

La réalisation de démonstrateurs de grandes dimensions, développés au sein de la littérature scientifique, a permis de mettre en lumière la pertinence de ce procédé dans le cadre de la réalisation d'applications fonctionnelles :

- des composants fonctionnels non structuraux, tels que des moules de grandes dimensions, destinés à de multiples procédés de production de pièces en matériaux composites (moulage au contact, par infusion sous vide ou par autoclave), des outillages de grandes dimensions (outillages de découpe, de perçage ou encore d'inspection) ou encore des coffrages pour le béton ;
- des composants fonctionnels structuraux, tels que des coques de bateaux, des châssis d'automobiles, des équipements sportifs (cadres de vélos, planches de surf, trottinettes électriques) ou encore des ponts piédestres.

Les avantages engendrés par l'utilisation de la fabrication additive à base de matériaux polymères thermoplastiques fondus, en comparaison des procédés traditionnels, sont nombreux :

- fabrication de composants en fonction de critères à respecter, de grandeurs à maximiser ou minimiser comme par exemple la minimisation de la masse ou la maximisation de la circulation d'air au sein d'un composant ;
- réduction des coûts et des délais d'obtention, ce qui est particulièrement pertinent dans le cadre de la fabrication de composants destinés à être réalisés en faibles séries ;
- fabrication de composants sur mesure sans engendrer de frais additionnels, ce qui rend les applications particulièrement intéressantes dans le domaine des équipements sportifs adaptés aux utilisateurs ;
- évolution des composants facilitée ;
- réduction du nombre de composants présents au sein d'un système, permettant d'alléger ce dernier tout en limitant les opérations d'assemblage.

Du fait de leurs nombreux domaines d'application, les démonstrateurs réalisés doivent faire face à de multiples problématiques scientifiques :

- génération de trajectoires de fabrication permettant la tenue mécanique des composants face à des sollicitations statiques et dynamiques pendant leur service, dans le cadre de la réalisation de composants structuraux. Cet axe de recherche s'inscrit également au sein de la problématique de résolution de l'anisotropie des propriétés mécaniques des composants produits, phénomène dû à la faible adhésion entre les couches de matière et nécessitant d'être résolu par l'utilisation de matériaux renforcés de fibres continues et de trajectoires de fabrication multiaxes ;
- respect des contraintes géométriques, dimensionnelles et d'état de surface au niveau des surfaces de contact intentionnelles et non intentionnelles, notamment dans le cadre de la réalisation des empreintes de moules de grandes dimensions ;
- gestion des problématiques thermiques (déformations, délamination et effondrement) pouvant mener à la ruine du composant en cours de fabrication ;
- choix et paramétrage d'un moyen de fabrication (effecteurs et porteur) capable de réaliser les différentes stratégies de fabrication mises en place afin de réaliser le composant.

La résolution de ces problématiques est, dans le meilleur des cas, empirique et n'a pas été résolue au sein de la littérature scientifique.

Par ailleurs, il ressort de l'analyse de la littérature scientifique que la façon de procéder dans le cadre de la fabrication de composants de grandes dimensions est de type « essais - erreurs – corrections », coûteuse en temps, en ressources et en argent.

Il apparaît alors nécessaire de développer une méthodologie de préparation à la fabrication de composants de grandes dimensions réalisés à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus :

- ayant un caractère générique, afin de prendre en compte les problématiques scientifiques attenantes aux différentes applications précédemment évoquées ;
- permettant l'utilisation de matériaux novateurs, notamment les matériaux polymères thermoplastiques renforcés de fibres continues ;
- permettant de s'affranchir du mode de fonctionnement « essais - erreurs – corrections » afin d'évoluer vers un cheminement étape après étape, des règles métiers spécifiquement développées et sur l'intégration de méthodes numériques.

C'est dans cette optique que s'intègrent les présents travaux de recherche : dans la suite de ce manuscrit, une méthodologie de préparation à la fabrication prenant en compte les éléments ci-dessus sera

proposée. Afin de mettre en lumière la méthodologie proposée, des cas d'applications de différentes natures seront également réalisés.

4. PRESENTATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE : METHODOLOGIE DE PREPARATION A LA FABRICATION

L'analyse de l'état de l'art général sur la fabrication additive et de l'état de l'art spécifique à la fabrication additive à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus a mis en évidence le besoin de développer un axe de recherche consacré à la préparation à la fabrication de composants de grandes dimensions, qui ont pour objectif :

- de dépasser le mode de fonctionnement « essais - erreurs – corrections » afin d'évoluer vers une préparation à la fabrication générique et rigoureuse, basée sur un ensemble de règles métier intégrant les spécificités des procédés additifs d'extrusion de matériaux polymères thermoplastiques fondus ;
- la mise en place de méthodes numériques dans le cadre de la génération des trajectoires de fabrication afin de notamment pallier la problématique d'anisotropie des propriétés mécaniques ;
- d'intégrer et de résoudre les problématiques scientifiques relatives à la préparation et à la fabrication d'un composant qui ont été présentées au sein de la partie précédente ;
- d'utiliser des matériaux novateurs, notamment les matériaux renforcés de fibres continues ;
- de permettre la réalisation de démonstrateurs de grandes dimensions, qui valideront par la même occasion la pertinence de la méthodologie proposée.

Dans le cadre de ces travaux de recherche, il a été décidé de réaliser une méthodologie de préparation à la fabrication de composants de grandes dimensions réalisés de manière additive à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus. Cette dernière propose un cheminement étape par étape permettant de développer le processus de préparation à la fabrication tout en intégrant les problématiques précédemment mentionnées. Elle pourra dans le futur être intégrée au sein d'un logiciel de type CAPP (pour « Computer Aided Process Planning » (CAPP), en français logiciel de planification de processus assistée par ordinateur) adapté au procédé [68]–[70].

Dans la suite de cette partie, les prérequis nécessaires à la mise en place de la méthodologie seront d'abord présentés (Figure 13A). Ensuite, la méthodologie sera traitée à travers ses objectifs et ses différentes étapes (Figure 13B). Puis, les actions réalisées en aval de la méthodologie (fabrication, inspection et validation du composant) seront mises en avant (Figure 13C). Pour finir, une synthèse sur les éléments présentés dans cette partie sera dressée.

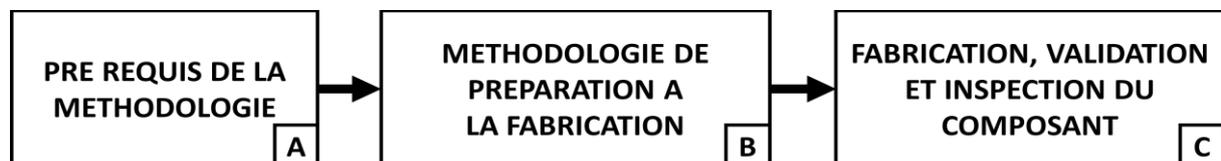


Figure 13 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, étapes en amont et en aval de la méthodologie

4.1. PREREQUIS DE LA METHODOLOGIE

Les prérequis correspondent aux données d'entrée de la méthodologie. Les informations contenues au sein de ces dernières, décrites dans la suite de cette partie, sont nécessaires à la réalisation de la préparation à la fabrication d'un composant (cahier des charges, géométries de la maquette numérique, matériau utilisé).

4.1.1. CAHIER DES CHARGES

Le cahier des charges est le document au sein duquel les besoins concernant un composant sont formulés [71] : sollicitations mécaniques (statiques ou dynamiques), sollicitations physico-chimiques (températures d'utilisation, étanchéité, vibrations, ...), tolérances géométriques, dimensionnelles et états de surface, contraintes particulières (encombrement, poids, entretien, démontage, ...). Les éléments présents au sein du cahier des charges seront pris en considération et permettront de paramétrer la méthodologie de préparation à la fabrication.

4.1.2. GEOMETRIES DE LA MAQUETTE NUMERIQUE

Les géométries et le tolérancement associé à un composant sont spécifiques à son utilisation [72] : surfaces sans contact intentionnel (esthétique, protection, déviation de fluides, dissipation de chaleur, ...), surfaces destinées à la préhension, surfaces fonctionnelles (assurer le placement d'une pièce par rapport à une autre afin d'obtenir un montage précis, guider une pièce lors d'un mouvement, transmettre un effort). Elles sont définies en amont de la méthodologie en se basant sur les fonctions à remplir par le composant. En tirant profit des avantages engendrés par la fabrication additive, les géométries de la maquette numérique peuvent être modifiées afin de minimiser ou maximiser certains paramètres (minimisation de la masse globale, maximisation des flux de chaleur, facilitation des opérations de manutention, maximisation des propriétés mécaniques) tout en prenant en compte les contraintes engendrées par les différents types de surfaces précédemment présentées. Pour cela, il existe au sein de la littérature scientifique des méthodes de DFAM (pour Design For Additive Manufacturing) [73]–[76] et des outils d'optimisation topologiques [77], [78] spécifiques aux procédés additifs à partir de matériaux polymères thermoplastiques.

Dans le cadre de la méthodologie de préparation, la maquette numérique du composant pourra être légèrement modifiée lors de la mise en place de stratégies de fabrication :

- une surépaisseur peut être ajoutée à la maquette numérique pour des raisons liées aux tolérances géométriques, dimensionnelles ou d'état de surface. La surépaisseur est par la suite retirée par l'intermédiaire d'une stratégie de parachèvement ;
- une réduction de l'épaisseur peut être appliquée à la maquette numérique pour des raisons liées aux sollicitations mécaniques appliquées sur le composant lors de son service. Cette réduction de l'épaisseur est par la suite recouverte par une stratégie de renforcement.

Par conséquent, ces modifications n'entraîneront pas de changement dans les dimensions finales du composant réalisé.

Les géométries de la maquette numérique influenceront le posage du composant, les stratégies de fabrication, le choix du procédé à utiliser ou encore le choix d'un moyen de fabrication.

4.1.3. MATERIAU UTILISE

Le choix du matériau d'un composant est réalisé en faisant un compromis entre ses propriétés intrinsèques (physiques, électriques, mécaniques, thermiques) et les contraintes qu'il doit satisfaire lors de son service [79]. Ce choix est fait en amont de la méthodologie de fabrication en se basant sur les spécificités propres à chacune des applications (contraintes mécaniques, thermiques, chimiques, ...).

Ces travaux de recherche se portent sur la fabrication additive basée sur l'extrusion de matériaux polymères thermoplastiques fondus. Par conséquent, le matériau choisi afin de réaliser un composant sera un polymère thermoplastique pouvant être renforcé de fibres courtes, longues ou continues. Le choix du matériau influera sur les différentes étapes de la méthodologie de préparation à la fabrication.

4.2. METHODOLOGIE DE PREPARATION A LA FABRICATION

L'objectif principal de la méthodologie est de réunir et d'ordonner toutes les étapes nécessaires à la préparation à la fabrication d'un composant de grandes dimensions réalisé à partir d'un matériau polymère thermoplastique fondu. L'ordonnement des étapes a été réfléchi et validé expérimentalement de manière à rendre le processus de fabrication cohérent. Les étapes à respecter, présentées au sein du diagramme IDEF0 (Figure 14), sont les suivantes :

- mise en position et sectionnement du composant à fabriquer (étape A1) ;
- développement des stratégies de fabrication (étape A2) ;
- choix et paramétrage du moyen de fabrication (étape A3).

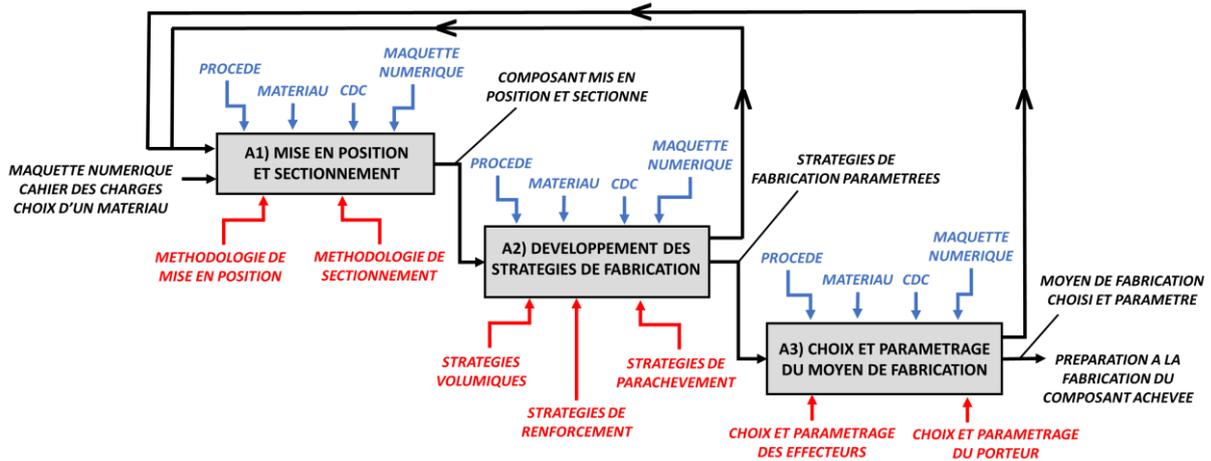


Figure 14 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, diagramme IDEF0

Par ailleurs, le contenu des différentes étapes de la méthodologie de préparation à la fabrication n'est pas figé dans le temps : il est en lien avec l'état actuel des connaissances du domaine et pourra s'adapter et évoluer quand cela sera nécessaire.

Dans la suite du manuscrit, chacune des étapes précédemment mentionnées sera l'objet d'un chapitre qui permettra de développer leurs problématiques scientifiques et techniques spécifiques et les solutions mises en place pour les résoudre. Au sein de chacun des chapitres :

- les éléments présents dans la littérature scientifique jugés pertinents seront cités et incorporés ;
- les éléments relatifs à chacune des étapes de la méthodologie ayant été traités de manière individuelle au sein de la littérature scientifique sans tenir compte de l'ensemble du processus de fabrication, seront adaptés et incorporés à la méthodologie s'ils peuvent lui apporter une plus-value ;
- les éléments nécessaires au développement des différentes étapes, absents de la littérature scientifique, ont été créés et validés de manière expérimentale. C'est notamment le cas des méthodologies de mise en position et de sectionnement d'un composant.

De plus, la méthodologie aborde la préparation à la fabrication avec un caractère générique : son utilisation doit être pertinente quels que soient les critères du cahier des charges, les géométries de la maquette numérique ou le matériau utilisé. Afin de réaliser les composants, l'ensemble des procédés de fabrication en lien avec l'extrusion de matériaux polymères thermoplastiques fondus ainsi que toutes les architectures cinématiques concernant les porteurs pourront être utilisés.

Par ailleurs, la méthodologie se veut orientée « recherche et développement » : elle a pour objectif de permettre la fabrication de composants de grandes dimensions n'ayant jamais été réalisés et faisant face

à des problématiques scientifiques et techniques lors de leur fabrication. Elle n'a pas pour objectif la réalisation de pièces en série et n'est pas, par conséquent, orientée vers une recherche de la minimisation du temps de cycle de fabrication qui permettrait une augmentation de la cadence de production. Elle reste cependant ouverte à ce type de gains.

Pour conclure, la méthodologie de préparation à la fabrication a pour objectif de réunir et d'ordonner les étapes nécessaires à la fabrication d'un composant de grandes dimensions en synthétisant, en adaptant ou en développant les connaissances nécessaires : mise en position et sectionnement du composant à fabriquer (étape A1), mise en place des stratégies de fabrication (étape A2), choix et paramétrage des équipements (étape A3). La méthodologie est générique, ce qui signifie que son utilisation est pertinente quel que soient le cahier des charges, les géométries de la maquette numérique ou le matériau utilisé. Elle est également orientée « recherche et développement » en étant centrée sur la résolution de problématiques scientifiques et la mise en place de méthodes numériques.

4.3. ETAPES EN AVAL DE LA METHODOLOGIE

Dès que la préparation à la fabrication du composant est achevée, ce dernier est fabriqué. Plusieurs axes de recherche, non traités dans le cadre de ces travaux de recherche, sont mentionnés au sein de la littérature scientifique :

- détection et correction des défauts géométriques en temps réel permettant de corriger une sur extrusion, une sous extrusion ou encore l'effondrement d'une partie de la structure en porte-à-faux (aussi appelé monitoring géométrique [39]) ;
- contrôle et gestion de la température matière en temps réel lors des cycles de fabrication afin d'éviter une accumulation ou un manque de chaleur au sein du composant en cours de fabrication [80]. La question des problématiques thermiques est un sujet à cheval entre la préparation à la fabrication et le contrôle thermique en temps réel. Il sera traité lors de l'étape A2 en lien avec la mise en place des stratégies de fabrication.

Une fois le composant réalisé, une étape d'inspection et de validation est réalisée. Cette dernière permet d'attester que le composant respecte bien les critères spécifiés par le cahier des charges. Les méthodes d'inspection et de validation sont multiples :

- récupération et comparaison des géométries du composant avec la maquette numérique via l'utilisation d'outils de reconstruction géométriques [81] ;
- découpe d'échantillons, analyse de la santé matière et essais mécaniques [82] ;

Ces éléments sont compatibles avec la méthodologie proposée et pourront par la suite être incorporés à cette dernière. Lorsque le composant respecte le cahier des charges, le développement de ce dernier est terminé et les données générées lors de la méthodologie de préparation à la fabrication sont validées. Dans le cas contraire, une analyse des défaillances doit être réalisée. Les défauts constatés permettront alors de prendre connaissance des modifications à implémenter lors de la préparation à la fabrication.

4.4 SYNTHÈSE SUR LES OBJECTIFS DE CES TRAVAUX DE RECHERCHE

Dans le cadre de ces travaux de recherche, il a été décidé de réaliser une méthodologie de préparation à la fabrication suite à l'analyse de l'état de l'art en lien avec la fabrication additive et la fabrication additive spécifique à l'extrusion de matériaux polymères thermoplastiques fondus, ayant mis en lumière la nécessité :

- de dépasser le mode de fonctionnement « essais - erreurs – corrections » afin d'évoluer vers une préparation à la fabrication générique et rigoureuse, basée sur un ensemble de règles métier intégrant les spécificités des procédés additifs d'extrusion de matériaux polymères thermoplastiques fondus ;

- la mise en place de méthodes numériques dans le cadre de la génération des trajectoires de fabrication afin de notamment pallier la problématique d'anisotropie des propriétés mécaniques ;
- d'intégrer et de résoudre les problématiques scientifiques relatives à la préparation à la fabrication d'un composant présentées au sein de la partie précédente ;
- d'utiliser des matériaux novateurs, notamment les matériaux renforcés de fibres continues ;
- De permettre la réalisation de démonstrateurs de grandes dimensions, qui valideront par la même occasion la pertinence de la méthodologie proposée.

Au sein de cette partie, les prérequis nécessaires à la méthodologie de préparation à la fabrication ont été présentés : cahier des charges, géométries de la maquette numérique, choix d'un matériau.

Ensuite, la méthodologie de préparation à la fabrication a été présentée à travers un diagramme IDEF0 (Figure 14). Ses étapes sont les suivantes :

- mise en position et sectionnement du composant (étape A1) ;
- mise en place des stratégies de fabrication (étape A2) ;
- choix et paramétrage du moyen de fabrication (étape A3).

Chaque étape de la méthodologie, objet d'un axe de recherche, sera décrite par un chapitre dans la suite de ce manuscrit. L'objectif principal de la méthodologie de préparation à la fabrication est de réunir et d'ordonner toutes les étapes nécessaires à la préparation à la fabrication. Elle se veut être générique afin de permettre la réalisation de composants quels que soient les critères du cahier des charges, les géométries de la maquette numérique ou le matériau utilisé. Elle est également orientée « Recherche et développement » et a pour objectif la réalisation de composants jamais réalisés et sujets à des problématiques scientifiques et techniques.

Suite à la préparation à la fabrication, le composant est fabriqué, inspecté et validé ou non. Lorsque la validation du composant n'est pas actée, des modifications de la préparation à la fabrication de ce dernier doivent être implémentées.

5. MISE EN AVANT ET RESOLUTION DE PROBLEMATIQUES DE LA METHODOLOGIE PAR LA REALISATION DE CAS D'APPLICATIONS

Lors de ces travaux de recherche, la préparation à la fabrication de plusieurs composants de grandes dimensions (fémur, hélice, lame de sabre, hyperboloïde, pale d'éolienne, chaise aux géométries singulières) a été réalisée afin de mettre en évidence et résoudre les problématiques scientifiques et techniques liées à chacune des étapes de la méthodologie. En effet chacun des composants précédemment mentionnés peut avoir une ou plusieurs des problématiques à résoudre à travers la méthodologie de fabrication. Au sein de cette partie, les composants seront présentés, leurs géométries seront illustrées et les problématiques soulevées par la préparation à la fabrication de chacun d'entre eux seront introduites.

Dans la suite de ce manuscrit, la préparation à la fabrication des composants sera réalisée à la fin de chacun des chapitres afin de mettre en évidence les éléments qui ont été présentés : mise en position et sectionnement (étape A1, chapitre 2), mise en place des stratégies de fabrication (étape A2, chapitre 3), choix et paramétrage du moyen de fabrication (étape A3, chapitre 4). Afin de valider la pertinence de la méthodologie proposée, les composants ont pour finir été fabriqués et contrôlés au sein de notre laboratoire. Les résultats obtenus permettront de statuer sur les choix réalisés à travers ces travaux.

5.1 CAS D'APPLICATION ET PROBLEMATIQUES A RESOUDRE

5.1.1. HELICE

La fabrication de l'hélice étant liée à un projet confidentiel en lien avec le domaine naval, les géométries de la maquette numérique ne peuvent être dévoilées. Par conséquent, la maquette numérique d'un composant similaire sera utilisée dans la suite de ce manuscrit afin d'illustrer les différentes étapes de la préparation à la fabrication de ce composant (Figure 15) : trois pales, toutes d'une longueur égale à 150 mm, sont disposées à 120° autour d'un moyeu central d'un diamètre égal à 50 mm. Le composant a été réalisé à partir de PLA.

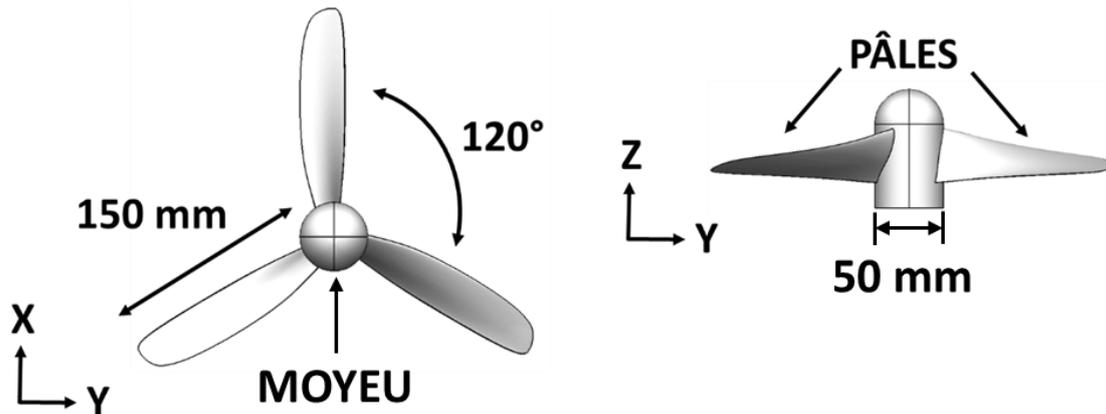


Figure 15 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, géométries de l'hélice

Le composant est destiné à devenir un démonstrateur visuel (échelle 1/14) d'une hélice équipant un bateau. Ce dernier se devra d'avoir des tolérances géométriques, dimensionnelles et un état de surface « aussi bon que possible ». Les problématiques à résoudre dans le cadre de la préparation à la fabrication de l'hélice sont les suivantes :

- mise en position du composant nécessitant une étape de décomposition (étape A1, chapitre 2) ;
- choix et paramétrage du moyen de fabrication, notamment de l'axe de l'effecteur et de la cinématique du porteur afin de réaliser l'ensemble des stratégies de fabrication (étape A3, chapitre 4).

5.1.2. FEMUR

Le fémur à fabriquer est un os de la cuisse (Figure 16A), le plus volumineux et le plus solide du corps humain [83]. Les géométries du fémur, réalisé à partir de PLA, sont présentées au sein de la Figure 16B :

- la longueur totale du composant est de 450 mm (suivant l'axe Z), ce qui représente la longueur du fémur moyen d'une femme mesurant 1,70 mètres ;
- le condyle se trouve à l'extrémité inférieure du fémur. Ses dimensions sont de 100 mm suivant l'axe X et de 120 mm suivant l'axe Z ;
- la tête fémorale se trouve à l'extrémité supérieure du fémur. Ses dimensions sont de 90 mm suivant l'axe X et de 110 mm suivant l'axe Z.

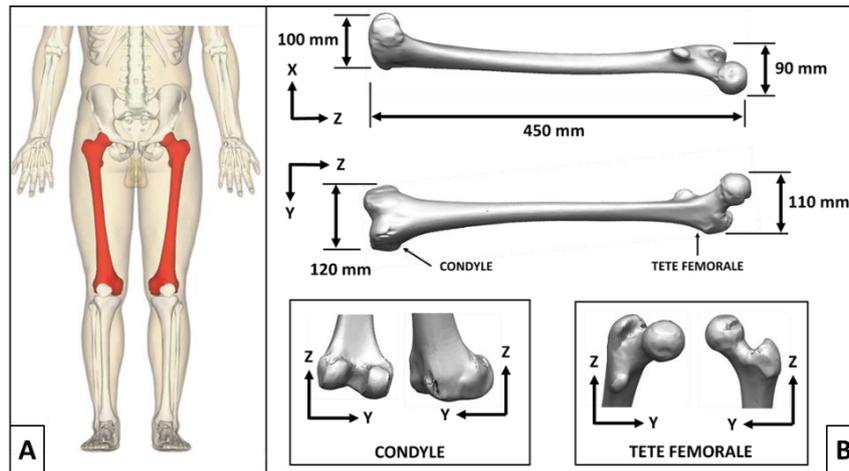


Figure 16 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, géométries du fémur

Comme le composant est utilisé dans le cadre d'un projet en lien avec le domaine médical, les tolérances géométriques, dimensionnelles et l'état de surface devront également être « aussi bon que possible ». Les problématiques à résoudre dans le cadre de la fabrication de ce composant sont les suivantes :

- mise en position du composant, long et élancé, engendrant la mise en place d'une solution de maintien en cours de fabrication (étape A1, chapitre 2) ;
- mise en place des stratégies de fabrication (étape A2, chapitre 3) ;
- problématique de choix et de paramétrage du procédé de fabrication (étape A3, chapitre 4).

Par ailleurs, les connaissances amassées lors de ce projet pourront être utilisées à des fins médicales lors de travaux futurs. En effet, la réalisation de prothèses de membres réalisées de manière additive est envisagée, notamment à partir de PEEK (pour Poly Ether Ether Kétone) qui a un module d'Young comparable aux os corticaux [84].

5.1.3. LAME DE SABRE

Les géométries de la réplique d'une lame d'un sabre datant du VI^{ème} siècle, réalisée à partir de PLA, sont montrées par la Figure 17. Le composant a été réalisé dans le cadre d'un partenariat avec un laboratoire d'archéologie sous-marine.

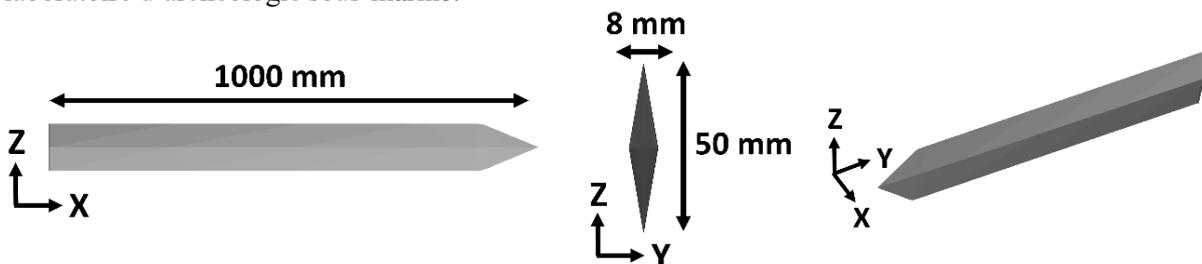


Figure 17 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, géométries de la lame de sabre

Le composant est la réplique d'un modèle historique, destiné à être exposé dans un musée. Aussi, ses géométries doivent être fidèles aux dimensions réelles du composant. Les problématiques à résoudre, dans le cadre de la fabrication de ce composant, sont les suivantes :

- choix de la mise en position du composant sur le plateau de fabrication (étape A1, chapitre 2) ;
- mise en place des trajectoires de fabrication via l'implémentation d'une étape de simulation par éléments finis (étape A2, chapitre 3).
- problématiques de choix et de paramétrage du procédé et du moyen de fabrication (étape A3, chapitre 4).

5.1.4. HYPERBOLOÏDE

L'hyperboloïde, présentée au sein de la Figure 18, a les géométries suivantes : le composant est une pièce de révolution (axe Z) d'une hauteur de 200 mm et d'un diamètre égal à 100 au niveau de la base et de son sommet. Le matériau choisi afin de réaliser ce composant est un copolymère à base de polyamide.

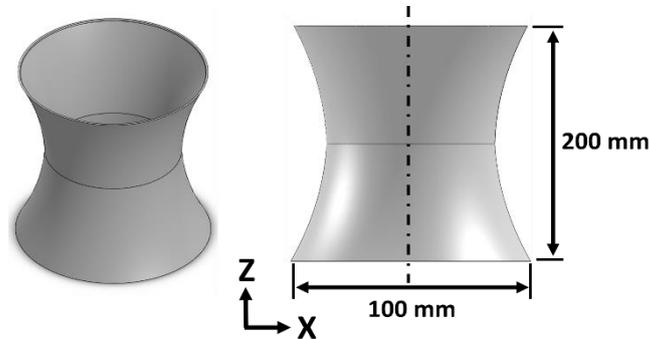


Figure 18 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, géométries de l'hyperboloïde

Les problématiques à résoudre dans le cadre de la préparation à la fabrication de ce composant sont les suivantes :

- mise en place de stratégies de fabrication et notamment des stratégies de renforcement présentées au sein du chapitre 3.
- choix et paramétrage du moyen de fabrication afin de réaliser la stratégie de renforcement (étape A3, chapitre 4).

5.1.5. PALE D'EOLIENNE

Les géométries de la pale, réalisée dans le cadre d'un projet en lien avec le secteur de l'éolien à partir d'un copolymère à base polyamide, sont illustrées par la Figure 19 :

- le composant est constitué de deux parties distinctes. L'embase, située à l'extrémité inférieure du composant, est circulaire (diamètre de 150 mm suivant l'axe X) et permet la fixation de la pale au moyeu central de l'éolienne. Le corps de la pale, d'une largeur maximale de 200 mm suivant l'axe X, permet quant à lui de convertir l'énergie éolienne en énergie mécanique ;
- la hauteur totale du composant, suivant l'axe Z, est de 1060 mm.

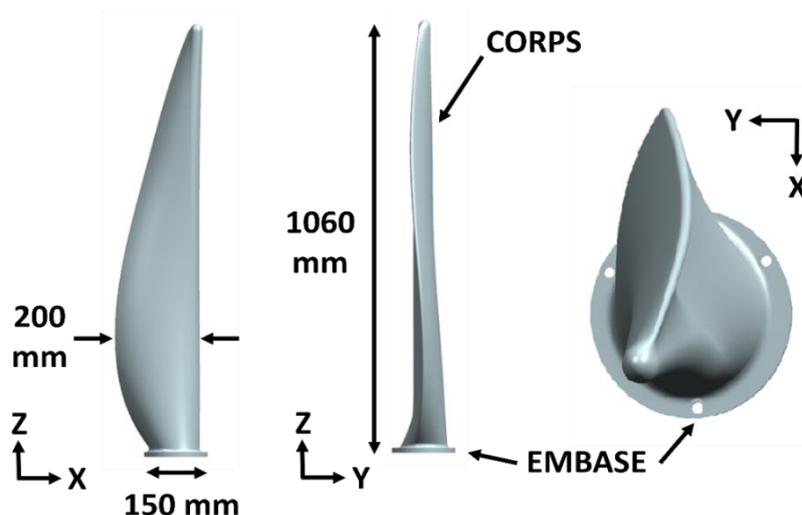


Figure 19 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, géométries de la pale d'éolienne

Les problématiques à résoudre dans le cadre de la fabrication de ce composant concernant la mise en place des stratégies de fabrication et le choix et le paramétrage du moyen de fabrication, notamment lors du positionnement du composant au sein de l'espace de travail du porteur.

5.1.6. CHAISE

Les géométries de la chaise, réalisée à partir de PLA, sont illustrées au sein de la Figure 20 :

- la hauteur totale du composant, suivant l'axe X, est de 813 mm ;
- la profondeur d'assise, suivant l'axe Y, est de 433 mm ;
- le largeur d'assise, suivant l'axe X, est de 462 mm ;
- la maquette numérique du composant est remplie. Néanmoins les trajectoires générées lors de la fabrication seront réalisées de manière à alléger ce dernier tout en maintenant sa capacité de charge.

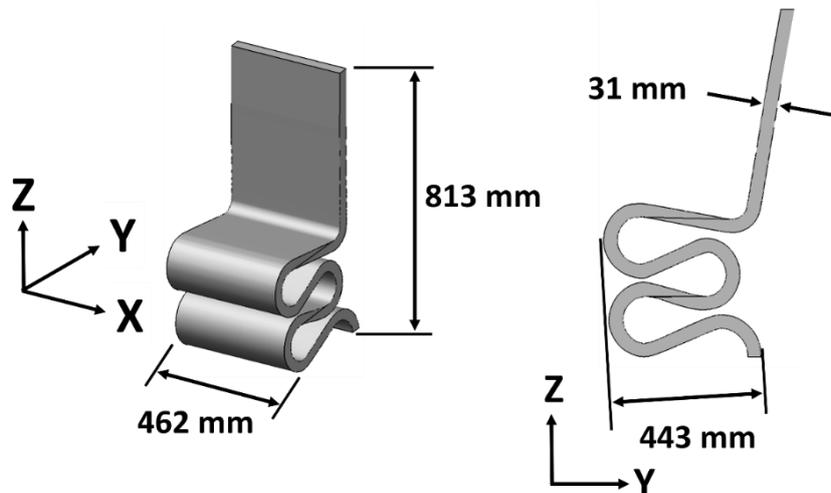


Figure 20 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, géométries de la chaise

Les contraintes liées au cahier des charges du composant sont les suivantes : la masse du composant doit être minimisée et la charge supportée par la chaise doit être égale à 80 kilogrammes. Les problématiques à résoudre dans le cadre de la préparation à la fabrication de ce composant sont liées à la mise en place des stratégies de fabrication.

5.2. CONCLUSION PARTIELLE SUR LA MISE EN APPLICATION DE LA METHODOLOGIE

Au sein de cette partie, les composants permettant de mettre en avant la pertinence et la résolution des problématiques de la méthodologie ont été présentés : fémur, lame de sabre, hyperboloïde avec renforts, pale d'éolienne, chaise aux géométries singulières. Les problématiques en lien avec la préparation de ces derniers, résumées au sein du Tableau 1, ont également été développées.

PROBLEMATIQUES A RESOUDRE	HELICE	OS	LAME DE SABRE	HYPERBOLOIDE	PALE D'EOLIENNE	CHAISE
MISE EN POSITION ET SECTIONNEMENT	X	X				
MISE EN PLACE DES STRATEGIES DE FABRICATION			X	X	X	X
CHOIX ET PARAMETRAGE DU PROCEDE		X	X			
CHOIX ET PARAMETRAGE DU MOYEN DE FABRICATION			X	X	X	X

Tableau 1 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, problématique relatives à la préparation à la fabrication de chacun des composants

Dans la suite de ce manuscrit, la préparation à la fabrication des composants sera réalisée à la fin de chacun des chapitres. Afin de valider la pertinence de la méthodologie proposée, les composants ont pour finir été fabriqués et contrôlés au sein de notre laboratoire. Les résultats obtenus, présentés en fin de manuscrit, permettront de statuer sur les choix réalisés à travers ces travaux.

6. CONCLUSION DU CHAPITRE

Dans ce chapitre, un état de l'art général de la fabrication additive puis un état de l'art spécifique à la fabrication additive de composants de grandes dimensions à partir de matériaux polymères fondus ont été réalisés. Il apparaît ce que cette dernière connaît un essor important depuis 2010 et l'arrivée sur le marché de matériaux renforcés de fibres courtes et de fibres continues qui ont permis l'amélioration des propriétés mécaniques intrinsèques des matériaux utilisés. La réalisation de démonstrateurs de grandes dimensions, développés au sein de la littérature scientifique, a permis de montrer la pertinence de ce procédé dans le cadre de la réalisation d'applications structurelles (coques de bateaux, châssis d'automobiles, équipements sportifs) et non structurelles (moules de grandes dimensions destinés à la production de pièces en matériaux composites, outillages de grandes dimensions). En effet les avantages liés aux procédés additifs à base de matériaux polymères thermoplastiques fondus, en comparaison des procédés traditionnels, sont nombreux : conception spécifique d'un composant en fonction de son application, réduction des coûts et des délais d'obtention, fabrication de composants sur-mesure, évolution des composants facilitée ou réduction du nombre de composants présents au sein d'un système.

Néanmoins, des problématiques scientifiques se doivent d'être résolues : génération de trajectoires de fabrication permettant la tenue mécanique des composants face aux sollicitations subies pendant leur service, résolution de la problématique d'anisotropie des propriétés mécaniques, respect des contraintes géométriques, dimensionnelles et d'état de surface, gestion des problématiques thermiques ou encore choix et paramétrage d'un moyen de fabrication capable de réaliser les différentes stratégies de fabrication mises en place afin de réaliser le composant. Par ailleurs, il ressort de l'analyse de la littérature scientifique que la façon de procéder dans le cadre de la fabrication de composants de grandes dimensions est de type « essais - erreurs – corrections », coûteuse en temps, en ressources et en argent. Par conséquent, il a été choisi de développer dans le cadre de ces travaux de recherche une méthodologie de préparation à la fabrication ayant pour objectif de dépasser le mode de fonctionnement « essais - erreurs – corrections » afin d'évoluer vers une préparation à la fabrication générique et rigoureuse basée sur un ensemble de règles métier intégrant également la prise en compte des problématiques scientifiques, l'utilisation de matériaux renforcés de fibres continues et la mise en place de méthodes numériques.

Les prérequis de la méthodologie sont les suivants : cahier des charges, géométries de la maquette numérique et choix d'un matériau pour le composant à fabriquer.

Les étapes de la méthodologie, présentées au sein du diagramme IDEF0 (Figure 21), sont les suivantes :

- mise en position et sectionnement du composant à fabriquer (étape A1) ;
- développement des stratégies de fabrication (étape A2) ;
- choix et paramétrage des équipements (étape A3).

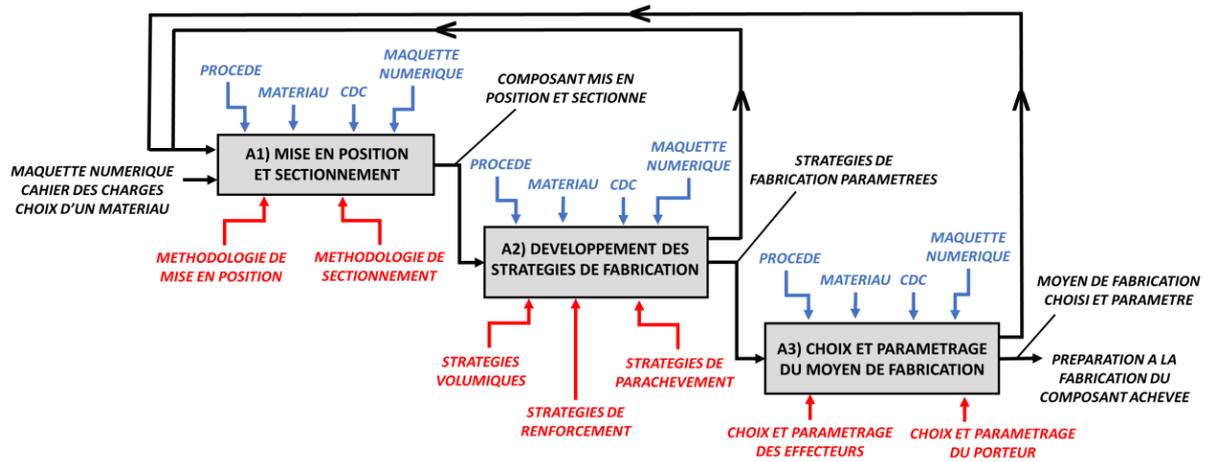


Figure 21 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, diagramme IDEF0

Dans la suite du manuscrit, chacune des étapes précédemment mentionnées sera l'objet d'un chapitre qui permettra de développer leurs problématiques scientifiques et techniques spécifiques et les solutions mises en place pour les résoudre. Suite à la préparation à la fabrication d'un composant, ce dernier est fabriqué, contrôlé et validé ou non. Lorsque la validation du composant n'est pas actée, des modifications de la préparation à la fabrication de ce dernier doivent être implémentées.

Dans le cadre de ces travaux de recherche, la préparation et la fabrication de plusieurs composants de grandes dimensions (fémur, hélice, lame de sabre, hyperboloïde, pale d'éolienne, chaise aux géométries singulières) a été réalisée afin de mettre en lumière la pertinence des éléments présentés au sein de la méthodologie. La préparation à la fabrication des composants sera réalisée à la fin de chacun des chapitres. Afin de valider la pertinence de la méthodologie proposée, les composants ont enfin été fabriqués et certains contrôlés au sein de notre laboratoire. Les résultats obtenus, présentés en fin de manuscrit, permettront de statuer sur les choix réalisés à travers ces travaux.

Le prochain chapitre portera sur la première étape de la méthodologie consistant à mettre en position et à sectionner le composant à fabriquer.

CHAPITRE 2 - MISE EN POSITION ET SECTIONNEMENT DU COMPOSANT

Au sein du chapitre précédent ont été dressés un état de l'art général de la fabrication additive ainsi qu'un état de l'art focalisé sur la fabrication additive de composants de grandes dimensions, réalisés à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus. A cette occasion, les différents domaines d'activité et applications existantes ont été mis en avant. Puis a été présentée la méthodologie de préparation à la fabrication. Les problématiques scientifiques qu'elle propose de résoudre ainsi que les différentes étapes la constituant ont été développées.

L'objectif de ce chapitre est de mettre en lumière les éléments liés à la première étape de la méthodologie de fabrication qui consiste à mettre en position et à sectionner le composant (étape A1 du diagramme IDEF0, Figure 22). Les données d'entrée de cette étape, étant par la même occasion les données d'entrée de la méthodologie, sont la maquette numérique du composant associée à un cahier des charges et au choix d'un matériau.

Dans une première partie, les notions essentielles à la compréhension du chapitre seront introduites : décomposition d'un composant en entités, ratio d'éclatement d'un composant, substrats utilisés afin de bâtir un composant ou une entité, sectionnement d'un composant et catégories de supports utilisés dans le cadre de la fabrication additive à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus. Dans une seconde partie, la problématique de mise en position d'un composant dans le but de minimiser ses surfaces en porte-à-faux par rapport au plateau de fabrication sera développée et le choix d'une mise en position permettant de fabriquer des composants sans supports sera explicité. Dans une troisième partie, une méthodologie de mise en position et de sectionnement développée dans le cadre de ces travaux et adaptée aux problématiques relatives aux composants de grandes dimensions sera proposée. Elle a pour objectif d'apporter une réponse globale en se basant sur l'expérience des résultats expérimentaux obtenus. Différents cas d'illustration permettant de mettre en lumière les étapes de la méthodologie seront présentés. Enfin, dans une quatrième partie, les démonstrateurs de grandes dimensions de la méthodologie se verront appliquer les éléments qui ont été présentés dans ce chapitre.

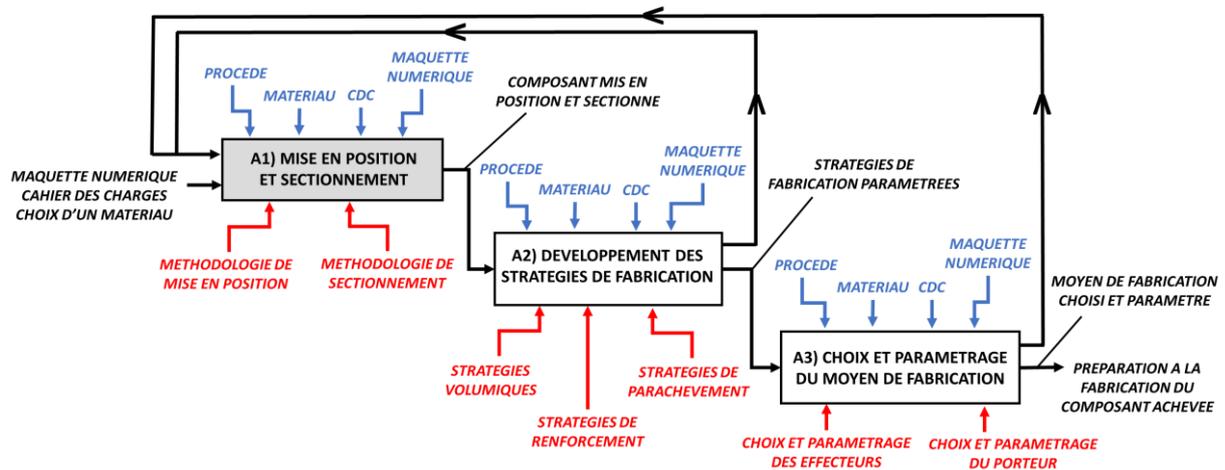


Figure 22 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, diagramme IDEF0

1. NOTIONS RELATIVES A LA MISE EN POSITION ET AU SECTIONNEMENT D'UN COMPOSANT DE GRANDES DIMENSIONS

Dans cette partie, vont être traitées les problématiques inhérentes à la mise en position et au sectionnement des composants de grandes dimensions réalisés de manière additive à partir de polymères thermoplastiques fondus. Ces problématiques qui permettent d'appréhender les problématiques du chapitre, seront ensuite intégrées aux méthodologies.

1.1 DECOMPOSITION EN ENTITES ET RATIO D'ELANCEMENT

1.1.1 DECOMPOSITION EN ENTITES

Une entité est un volume résultant d'une décomposition de la maquette numérique du composant à réaliser, décidée lors de la mise en position de ce dernier et basée sur des règles liées aux géométries du composant (présentées au sein de la partie 3.2). Dans le cadre de la méthodologie de préparation à la fabrication, les composants ont été classés dans deux catégories :

- les composants simples, qui ne sont pas décomposés en entités (Figure 23A) ;
- les composants complexes, qui doivent être décomposés en entités (Figure 23B). Si V_t représente le volume total d'un composant complexe divisé en n entités V_i , alors $V_t = \bigcup_{i=1}^n V_i$.

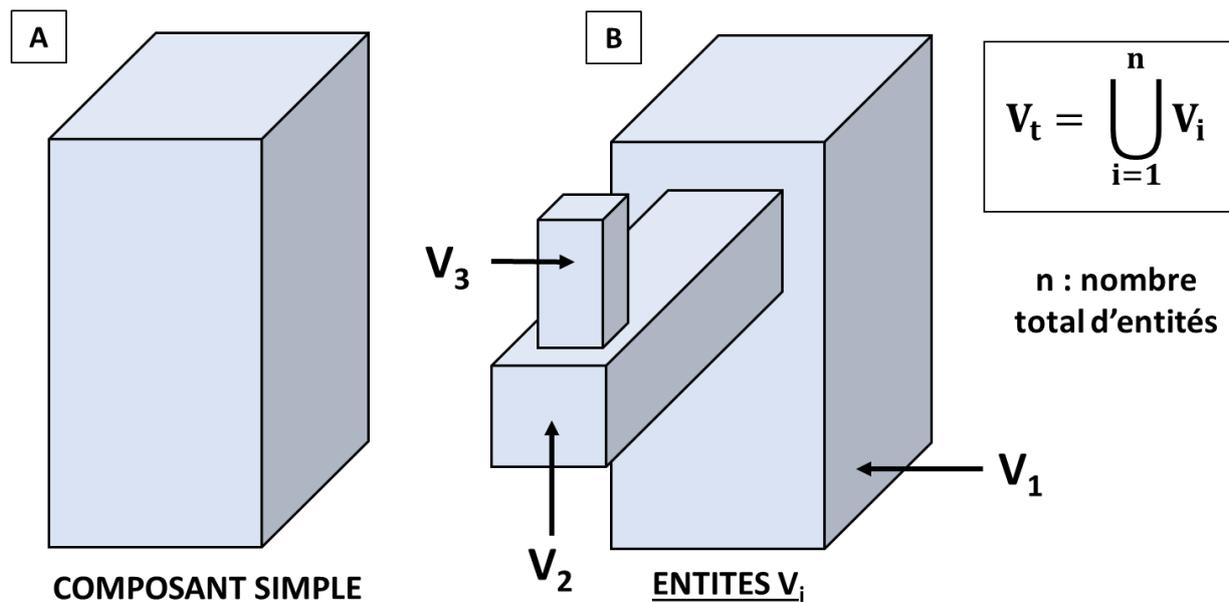


Figure 23 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, composant simple et composant complexe

1.1.2 RATIO D'ELANCEMENT

Le ratio d'élanement permet de donner sur l'élanement d'un composant des informations qui seront utilisées afin de mettre en place, dans certains cas particuliers décrits dans la partie 2, une structure de maintien au composant en cours de fabrication (Figure 24). Afin de calculer le ratio d'élanement, le composant est englobé par un parallélépipède rectangle de dimensions L_1 , L_2 et L_3 ayant une de ses faces en contact avec la plus grande surface plane extérieure du composant S_c (Figure 24B) et ses autres faces affleurant aux surfaces extérieures du composant (Figure 24C).

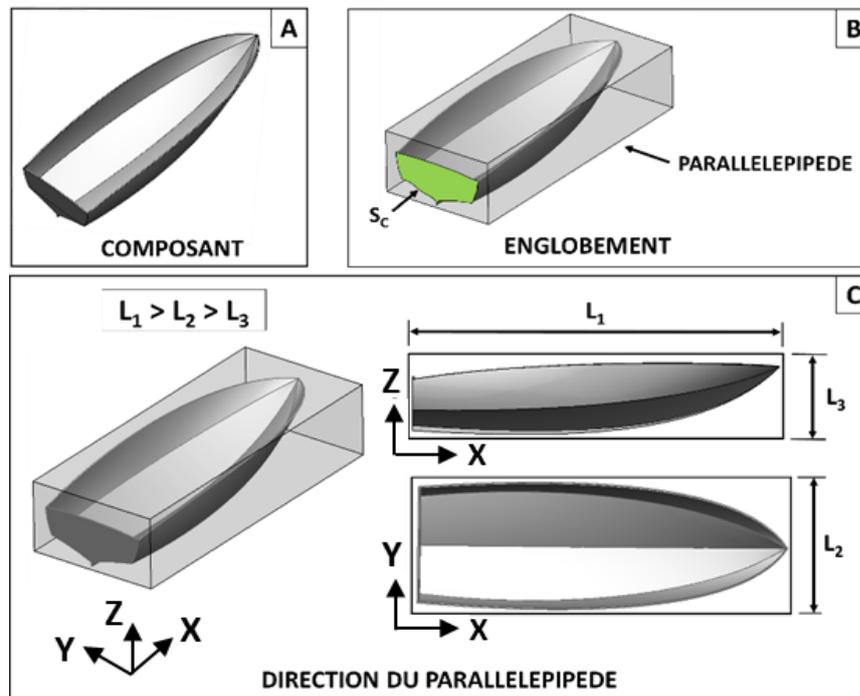


Figure 24 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondu, calcul du ratio d'élancement d'un composant

Les dimensions du parallélépipède rectangle sont classées par ordre décroissant : $L_1 > L_2 > L_3$ (Figure 24C). Les ratios d'élancement sont alors définis par le rapport d'un grand côté sur un petit côté (Figure 25).

$$\boxed{R_1 = \frac{L_1}{L_2}} \quad \boxed{R_2 = \frac{L_1}{L_3}} \quad \boxed{R_3 = \frac{L_2}{L_3}} \quad \text{avec } L_1 > L_2 > L_3$$

Figure 25 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondu, ratios d'élancement d'un composant

1.2 SUBSTRAT

Un substrat a pour objectif de soutenir la première couche de matière déposée lors de la fabrication d'un composant simple ou d'une entité. Il existe deux catégories de substrats, décrites ci-dessous.

1.2.1 PLATEAU DE FABRICATION

Le plateau de fabrication supporte la 1^{ère} couche de matière déposée lors du cycle de fabrication. A ce stade de la méthodologie, ce dernier est indépendant du porteur, choisi lors de la dernière étape de la méthodologie de fabrication. Il est représenté par une plaque plane, de longueur D_1 et de largeur D_2 adaptées aux dimensions du composant à réaliser et de normale sortante \vec{S} (Figure 26A). Il a été décidé par les auteurs de majoritairement fabriquer les composants de grandes dimensions à partir de plateaux de fabrication plans dans le cadre de cette méthodologie. En procédant ainsi, la méthodologie conserve un caractère générique et limite le recours à des montages expérimentaux coûteux en temps et en argent, ce qui est un des avantages compétitifs de la fabrication additive à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus. Néanmoins, des composants fabriqués à partir de plateau de fabrication non plans ont été réalisés dans le cadre de ces travaux et seront présentés dans la partie 3 portant sur la méthodologie de mise en position et sectionnement. En procédant ainsi, la méthodologie conservera un caractère générique.

1.2.2 SURFACES EXTERIEURES DES ENTITES

Les surfaces extérieures des entités représentent la seconde catégorie de substrats. Dans le cas de la fabrication d'un composant complexe, la première couche de matière d'une entité V_i (avec $i > 1$) est déposée sur la surface d'une entité élémentaire précédemment réalisée, qui servira alors de substrat : le substrat peut être plan (Figure 26B) ou courbe (Figure 26C). Un substrat plan servant à réaliser une entité V_i est caractérisé par un normale sortante globale S_i tandis qu'un substrat non plan est caractérisé par des normales sortantes locales en chacun de ses points.

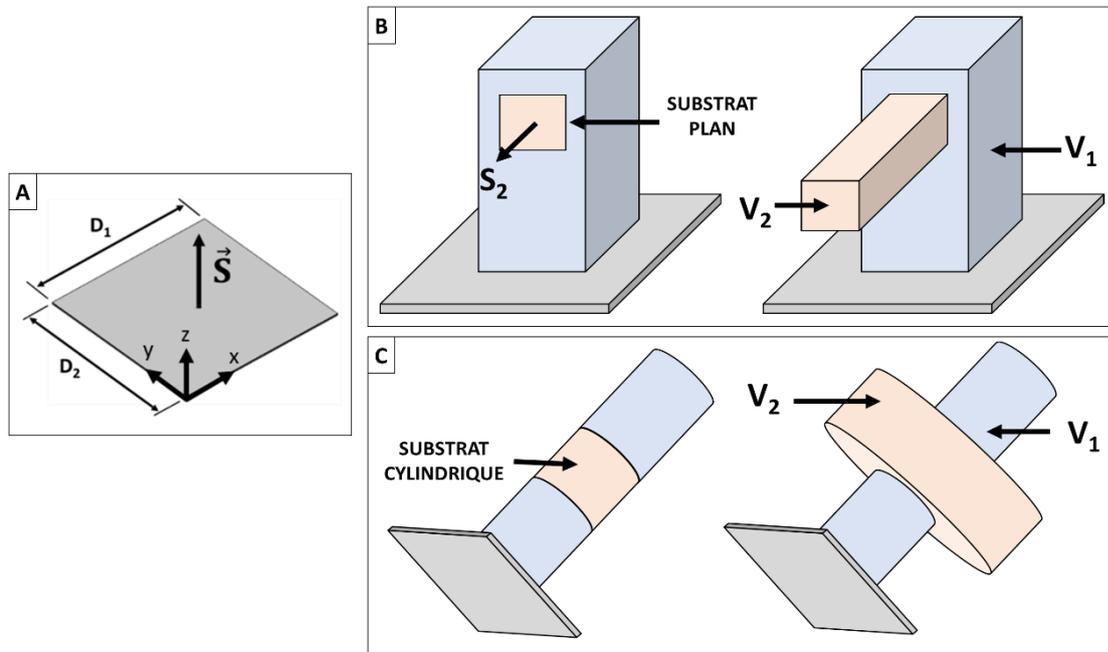


Figure 26 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, différents types de substrats présents dans le cadre de la méthodologie de préparation à la fabrication

1.3 SECTIONNEMENT

Une section est une surface résultant de l'intersection entre une surface de tranchage et la maquette numérique du composant ou de l'entité à réaliser, sur laquelle seront générées des trajectoires de fabrication et déposés des cordons de polymère fondus pour former une couche de matière (Figure 27A). La géométries (plane ou courbe) et l'orientation de la surface de tranchage (potentiellement suivant n'importe quelle orientation) sont déterminées en fonction des géométries et du positionnement du composant sur le plateau de fabrication. Une stratégie de sectionnement correspond à l'ensemble des sections d'un composant (ou d'une entité), dont les barycentres sont distants les uns des autres d'une valeur H fixe ou variable suivant une courbe de croissance (Figure 27B). La géométrie de la courbe de croissance est également fonction des géométries et du positionnement du composant sur le plateau de fabrication. Un composant simple aura une seule et même courbe de croissance C (Figure 27C) tandis qu'un composant complexe aura autant de courbes de croissance C_i que d'entités élémentaires V_i (Figure 27D).

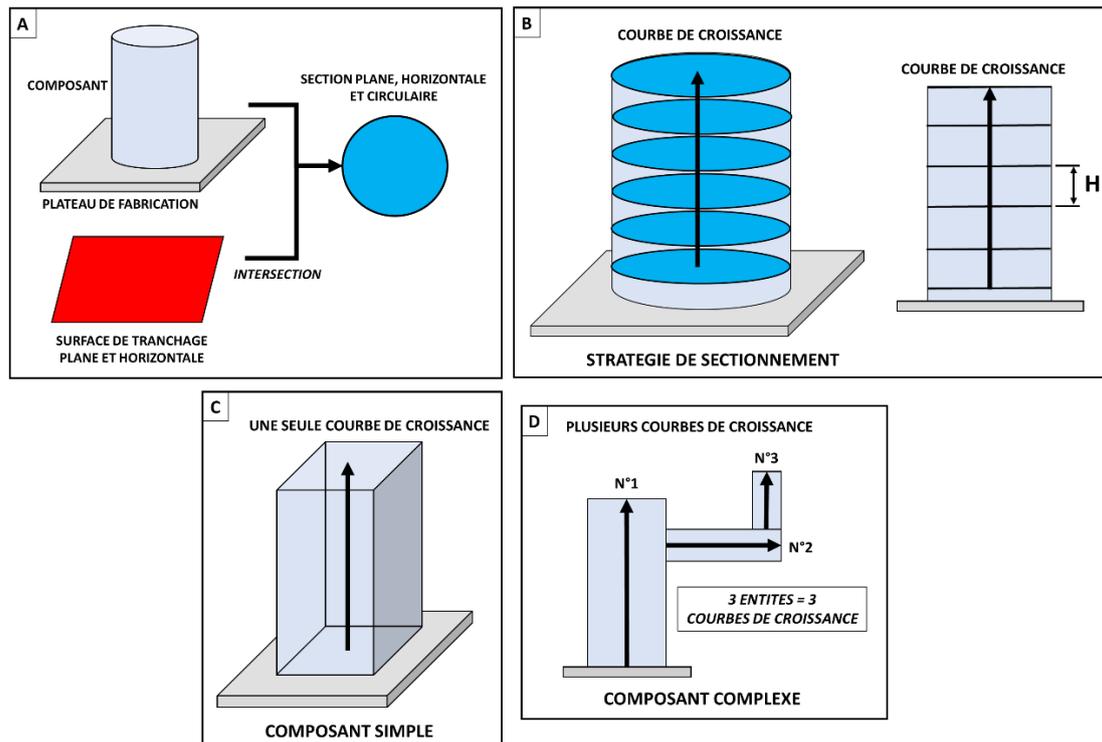


Figure 27 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondus, notions relatives au sectionnement d'un composant

Au sein de la littérature scientifique, les stratégies de sectionnement sont classifiées en plusieurs catégories : stratégies de sectionnement planaire et horizontal, autrement appelé « sectionnement 2.5D » [85], [86], stratégies de sectionnement planaire et non horizontal, autrement appelé sectionnement par « plans inclinés » [58], stratégies de sectionnement ayant une courbe de croissance suivant la fibre neutre du composant réalisé [20], stratégies de sectionnement non planaires. Nous verrons, dans le cadre de la méthodologie de mise en position et de sectionnement présentée dans la partie 3, comment ces stratégies sont appliquées et développées pour des pièces réalisées à partir de matériaux polymères fondus de grandes dimensions.

1.4 SUPPORTS

Les supports sont très utilisés dans le cadre de la fabrication additive de composants à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus. Le premier objectif des supports est d'empêcher l'effondrement, lors du cycle de fabrication, des surfaces extérieures du composant à réaliser quand il excède une limite de porte-à-faux propre à l'application réalisée sous l'effet de la gravité (Figure 28A) [87]. Le second usage d'une structure de soutien est de permettre le lien entre le plateau de fabrication et la surface inférieure d'un composant (ou de la première entité) dans le cas où cette dernière est non plane, jouant alors un rôle de substrat (Figure 28B) [88]. Dans certains cas, des composants de grandes dimensions présenteront des géométries telles qu'ils nécessiteront une structure de soutien afin de supporter la surface inférieure du composant mis en position avec le plateau de fabrication : c'est le cas du fémur, réalisé comme démonstrateur de la méthodologie.

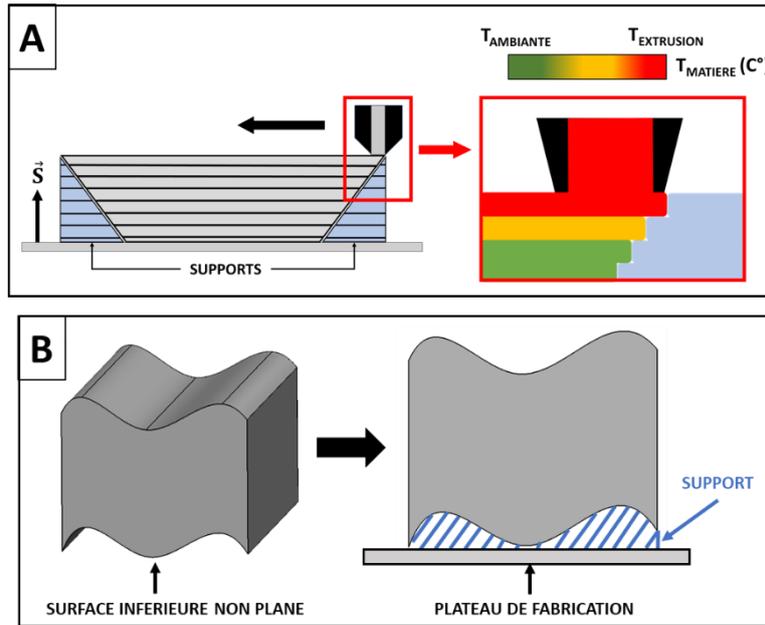


Figure 28 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondu, structure de soutien soutenant les surface excédant la limite de porte-à-faux admissible

Enfin, les supports peuvent servir à stabiliser un composant long et allongé, positionné à la verticale sur le plateau de fabrication (Figure 29A). En effet, la force appliquée par l'outil additif lors du cycle de fabrication se transforme en couple d'arrachement entre la première couche de matière déposée et le plateau de fabrication, provoquant des mouvements parasites qui génèrent des défauts géométriques et à terme un décrochage entre le composant et le plateau de fabrication (Figure 29B).

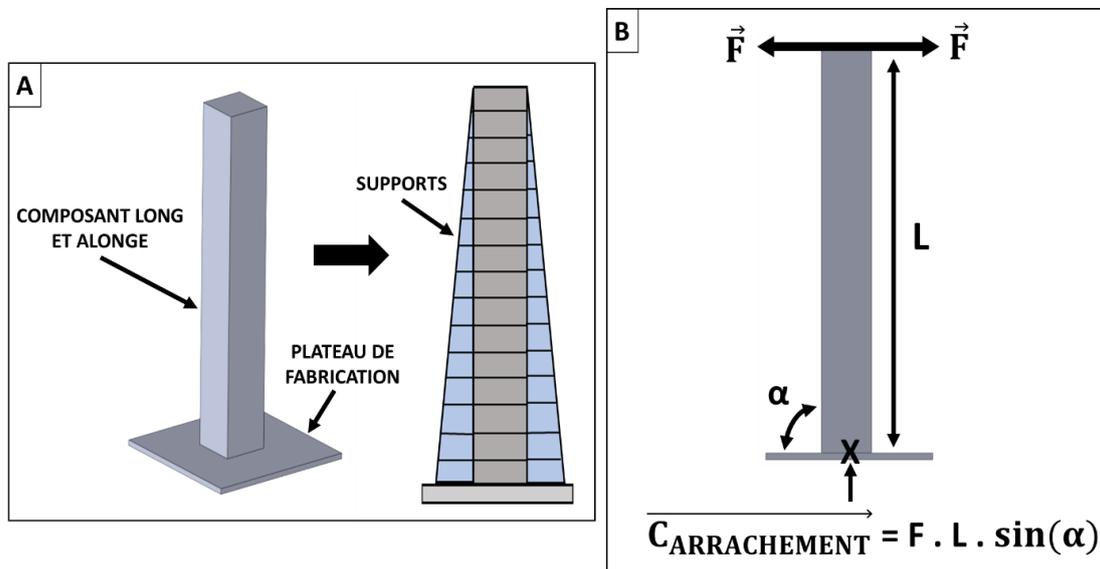


Figure 29 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondus, défaut géométriques engendrés par des mouvements parasites du composant en cours de fabrication et structure de soutien

Nous verrons, dans la partie 2, comment les supports ont été supprimés ou remplacés dans le cadre de ces travaux par le choix d'une mise en position ou l'implémentation de structures au sein de la maquette numérique.

1.5 CONCLUSION SUR LES NOTIONS RELATIVES A LA MISE EN POSITION ET AU SECTIONNEMENT

Dans cette partie, ont été illustrées les notions essentielles à la compréhension de l'étape de mise en position et de sectionnement du composant : décomposition d'un composant en entités, ratio d'élanement, différents types de substrats, sectionnement d'un composant et supports de fabrication. Ces éléments seront utilisés au sein de la partie 3 de ce chapitre portant sur le développement d'une méthodologie de mise en position.

2. PROBLEMATIQUE RELATIVE AU PORTE-A-FAUX ET A LA MISE EN POSITION D'UN COMPOSANT DE GRANDES DIMENSIONS

La valeur du porte-à-faux d'une surface d'un composant est représentée par l'angle α , situé dans le plan formé par la normale sortant au plateau de fabrication \vec{S} et la normale sortante à une surface \vec{N} (Figure 30A). La notion de porte-à-faux est de première importance dans le cadre de la fabrication additive et plus particulièrement dans le cadre de la réalisation de composants de grandes dimensions à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus : ne pas prendre en compte cette problématique lors de la mise en position d'un composant engendrera un effondrement des cordons de matière déposés sous l'effet de leur poids et de leur faible viscosité, due à leurs températures d'extrusion [87][89] (Figure 30B). Par conséquent, l'angle α doit être compris au sein d'une limite spécifique à chaque application qui dépend du matériau utilisé et de ses propriétés intrinsèques (viscosité, capacité thermique, ...) (Figure 30C). Dans le cadre de cette méthodologie, la valeur de l'angle α_{limite} a été fixée à $\pm 135^\circ$: cette valeur correspond à une moyenne des angles limites mentionnés au sein de la littérature scientifique [87].

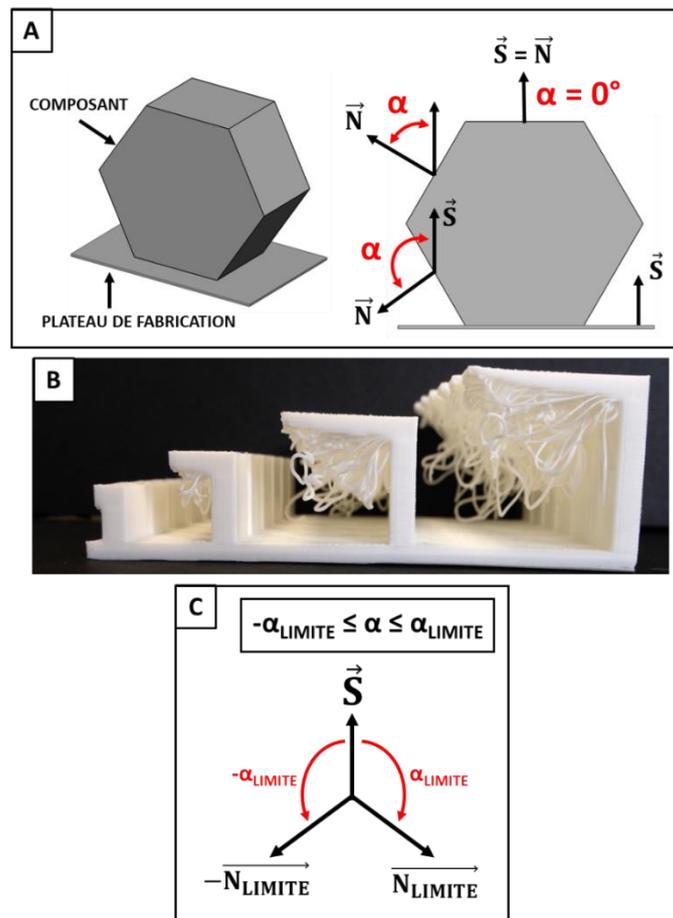


Figure 30 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, normales sortantes aux surfaces d'un composant

Lorsque la mise en position du composant par rapport au plateau est telle que la limite de porte-à-faux de certaines surfaces est dépassée, des supports sont réalisés afin de soutenir ces dernières. Dans le cadre de la mise en position d'un composant de grandes dimensions, voilà pourquoi il a été choisi de s'affranchir des supports visant à soutenir la structure en cours de fabrication :

- les supports augmentent le temps de cycle et les coûts de fabrication, problématique augmentée par les grandes dimensions des composants réalisés [90], [91] ;
- ils augmentent le coût global de la fabrication d'un composant [92] ;
- ils entraînent la réalisation d'une opération de parachèvement ;
- ce sont des structures sacrificielles, retirées et détruites après le cycle de fabrication. Des considérations d'ordre écologique poussent les auteurs à éviter autant que possible leur utilisation lors de la fabrication de composants de grandes dimensions [93], [94] ;

Par ailleurs, les supports bloquent l'accès aux surfaces extérieures d'un composant, empêchant la mise en place de stratégies de renforcement ou de parachèvement développées dans le prochain chapitre de ce manuscrit.

La mise en position d'un composant de grandes dimensions visera en premier lieu à minimiser les surfaces en porte-à-faux par rapport au plateau de fabrication. Lorsque la mise en position du composant sans surface qui excède la limite de porte-à-faux s'avère impossible, il a été choisi de répondre ainsi à cette problématique : nous avons développé un axe de recherche concernant la décomposition du composant en entités ayant chacune leur propre courbe de croissance, ce qui est rendu possible par la génération de trajectoires de fabrication multiaxes et l'utilisation de porteurs ayant de nombreux degrés de liberté. Cette façon de procéder permet également de s'affranchir du raisonnement « 2.5D » qui consiste à fabriquer les composants par un empilement de couches planes et horizontales.

A l'instar des supports ayant pour objectif de soutenir la surface inférieure du composant mis en position avec le plateau de fabrication seront réalisés (développés au sein de la partie 1), nous avons choisi de développer des structures de soutien qui permettent de créer un contact entre le composant et le plateau de fabrication (Figure 31A). Par ailleurs, la problématique de fabrication sans supports a mené au développement de structures de maintien qui permettent de s'affranchir des supports destinés à stabiliser une structure en cours de fabrication (Figure 31B). La mise en place des structures de soutien et de maintien sera présentée dans la partie portant sur la méthodologie de mise en position et de sectionnement.

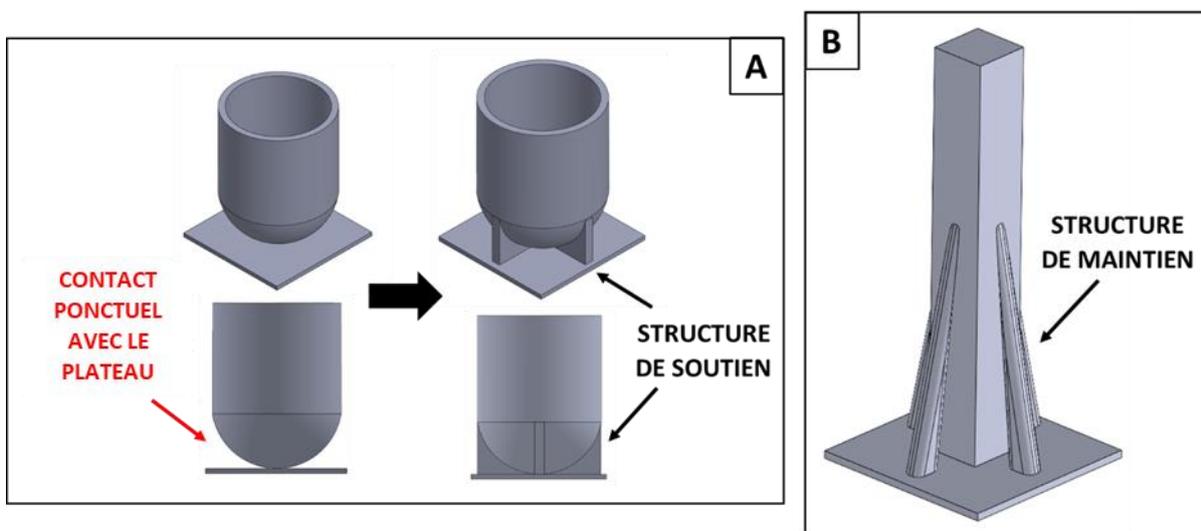


Figure 31 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, structures de support et de maintien

3. METHODOLOGIE DE MISE EN POSITION ET DE SECTIONNEMENT DU COMPOSANT A REALISER

Dans cette partie sera proposée une méthodologie qui a pour objectif la mise en position et le sectionnement d'un composant de grandes dimensions réalisé à partir de matériaux thermoplastiques fondus. Cette méthodologie est divisée en plusieurs étapes, décrites au sein de la Figure 32 : mise en position du composant par rapport au plateau de fabrication (Figure 32A), prise en considération des critères du cahier des charges (Figure 32B), implémentation d'une structure de maintien (Figure 32C), choix de la courbe de croissance et de la distance entre les sections (Figure 32D) et tranchage du composant (Figure 32E). Lors de la réalisation d'un composant complexe, les étapes de choix de la courbe de croissance, de la distance entre les sections et de tranchage du composant sont à répéter pour chaque entité. Au sortir de la méthodologie, le composant est positionné par rapport au plateau de fabrication et les sections sont déterminées.

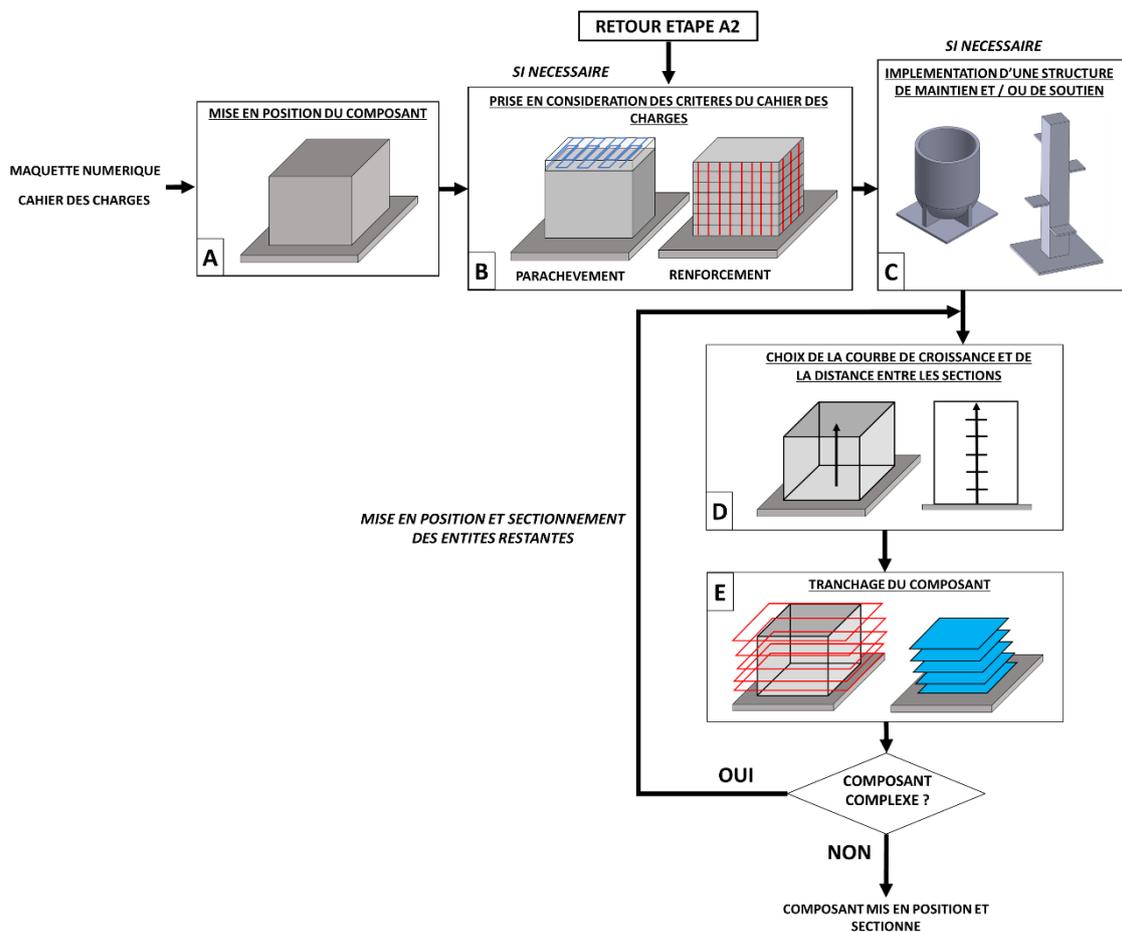


Figure 32 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondus, étapes à réaliser dans le cadre de la mise en position et du sectionnement d'un composant de grandes dimensions

3.1 MISE EN POSITION DU COMPOSANT

La mise en position du composant a pour objectif de positionner ce dernier par rapport au plateau de fabrication de façon à ce que l'angle α , relatif à la normale sortante à ses surfaces, n'excède pas la valeur α_{LIMITE} fixée à $\pm 135^\circ$ (évoqué au sein de la partie 2). Lorsqu'il existe par rapport au plateau de fabrication une et une seule orientation du composant pour laquelle ce dernier respecte la limite de porte-à-faux autorisée ($\alpha < \alpha_{LIMITE}$), elle est choisie comme étant la mise en position du composant par rapport au plateau de fabrication. Cette règle est mise en avant par la Figure 33 : l'orientation N°3 étant la seule orientation qui respecte la limite de porte-à-faux, elle est choisie comme mise en position du composant.

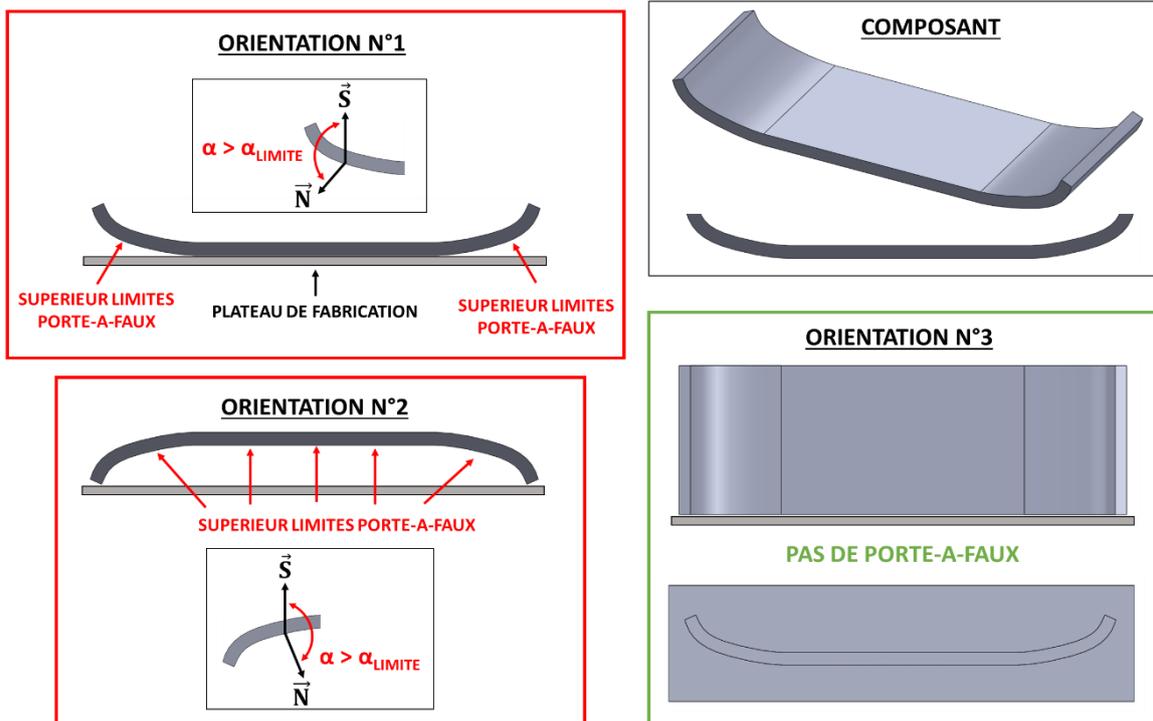


Figure 33 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondus, une seule orientation du composant respecte la limite de porte-à-faux admissible

Lorsqu'il existe plusieurs orientations du composant par rapport au plateau de fabrication pour lesquelles ses surfaces ne dépassent pas la limite de porte-à-faux autorisé, l'orientation choisie est celle offrant le minimum de surface en porte-à-faux par rapport au plateau de fabrication, ce qui est illustré par la Figure 34 dans le cas de la réalisation d'une pyramide tronquée. Dans ce cas de figure, l'orientation N°1 a été choisie.

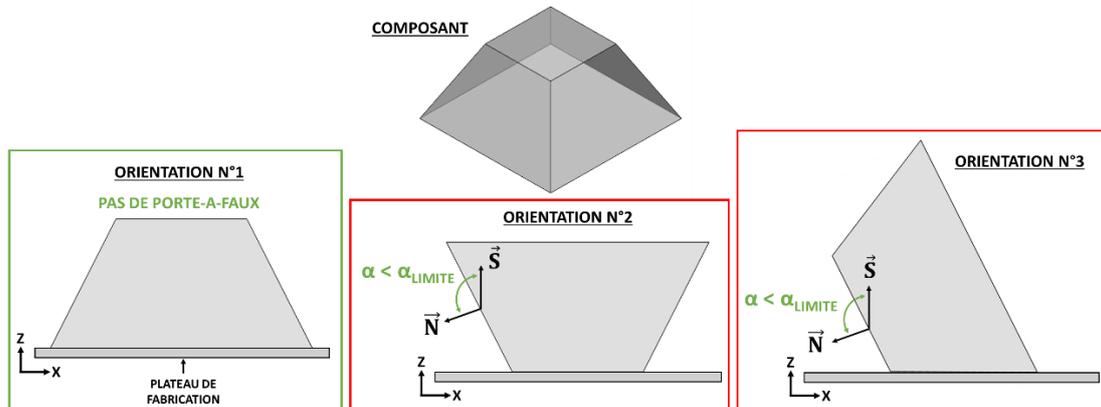


Figure 34 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondus, plusieurs orientations du composant respectent la limite de porte-à-faux admissible

Lorsque plusieurs orientations du composant par rapport au plateau de fabrication ne présentent pas de surfaces en porte-à-faux, celle offrant la plus grande surface de contact avec le plateau de fabrication sera choisie, afin de stabiliser le composant et d'éviter ainsi de potentiels mouvements parasites lors du cycle de fabrication. Au sein de la Figure 35, le composant mis en position a deux orientations pour lesquelles il n'admet pas de surfaces en porte-à-faux. L'orientation N°2 sera choisie car la surface en contact avec le plateau de fabrication de cette dernière est supérieure à celle offerte par l'orientation N°1.

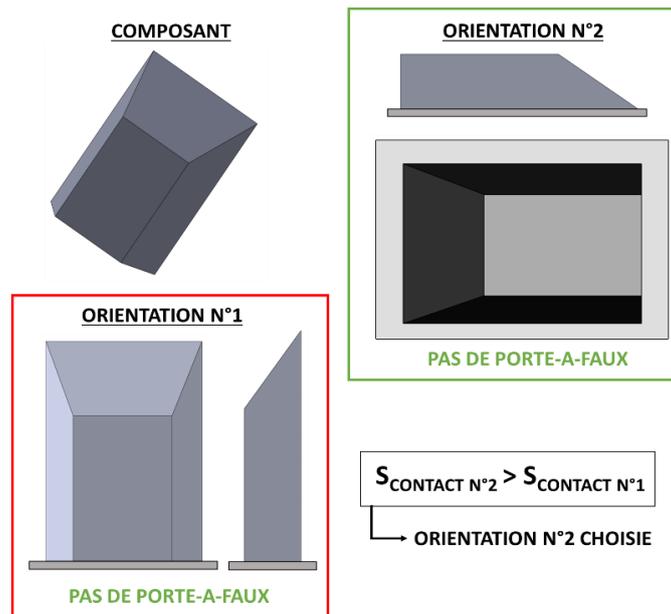


Figure 35 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondus, mise en position d'un composant simple

Lorsqu'il n'existe pas d'orientation du composant par rapport au plateau de fabrication pour laquelle ses surfaces ne dépassent pas la limite de porte-à-faux autorisé, le composant est divisé en entités (évoqué au sein de la partie 2). Cette division permet de s'affranchir de la problématique de porte-à-faux en respectant la règle suivante : une entité ne devra pas présenter de surfaces en porte-à-faux qui excèdent la limite autorisée par rapport à la normale sortante de son substrat respectif. Le substrat d'une entité peut être de deux types : le plateau de fabrication, dans le cas de première entité, ou la surface d'une autre entité dans le cas d'une entité V_i avec $i > 1$ (évoqué au sein de la partie 2).

Lorsque plusieurs décompositions en entités peuvent être réalisées, celle qui offre la plus grande surface de contact avec le plateau de fabrication sera choisie. Si deux décompositions offrent la même surface de contact avec le plateau de fabrication, on choisira celle engendrant le moins d'entités, ce qui permet de :

- minimiser le nombre de stratégies de sectionnement et de fabrication, afin de diminuer le temps nécessaire à la préparation de la fabrication du composant ;
- minimiser entre les différentes entités les jonctions qui engendrent une zone de raccord créant un défaut géométrique.

Au sortir d'une décomposition, le composant a été divisé en n entités V_i . Afin de mettre en lumière les éléments précédents, la décomposition d'un composant théorique a été réalisée au sein de la Figure 36 et de la Figure 37 : quelle que soit l'orientation du composant par rapport au plateau de fabrication, des surfaces du composant excèdent la limite de porte-à-faux. Le composant doit être divisé afin de s'affranchir de la problématique des surfaces en porte-à-faux (Figure 36).

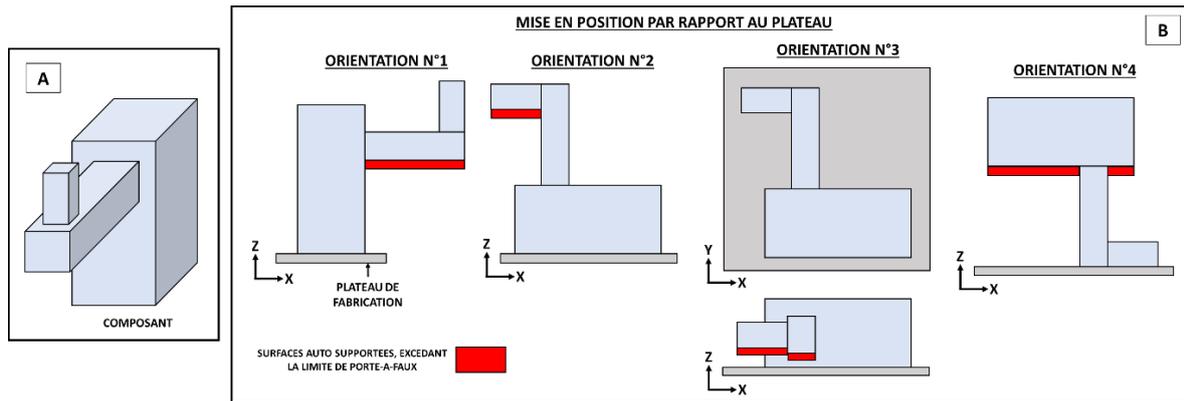


Figure 36 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondus, mise en position d'un composant complexe

Plusieurs décompositions, suivant différentes orientations du composant par rapport au plateau de fabrication, sont alors possibles (Figure 37A). Les orientations N°2 et N°3, offrant la plus grande surface de contact avec le plateau de fabrication, ont alors été sélectionnées. La décomposition N°2 engendrant deux entités tandis que l'orientation N°3 en engendre trois, c'est l'orientation N°2 qui sera choisie (Figure 37B).

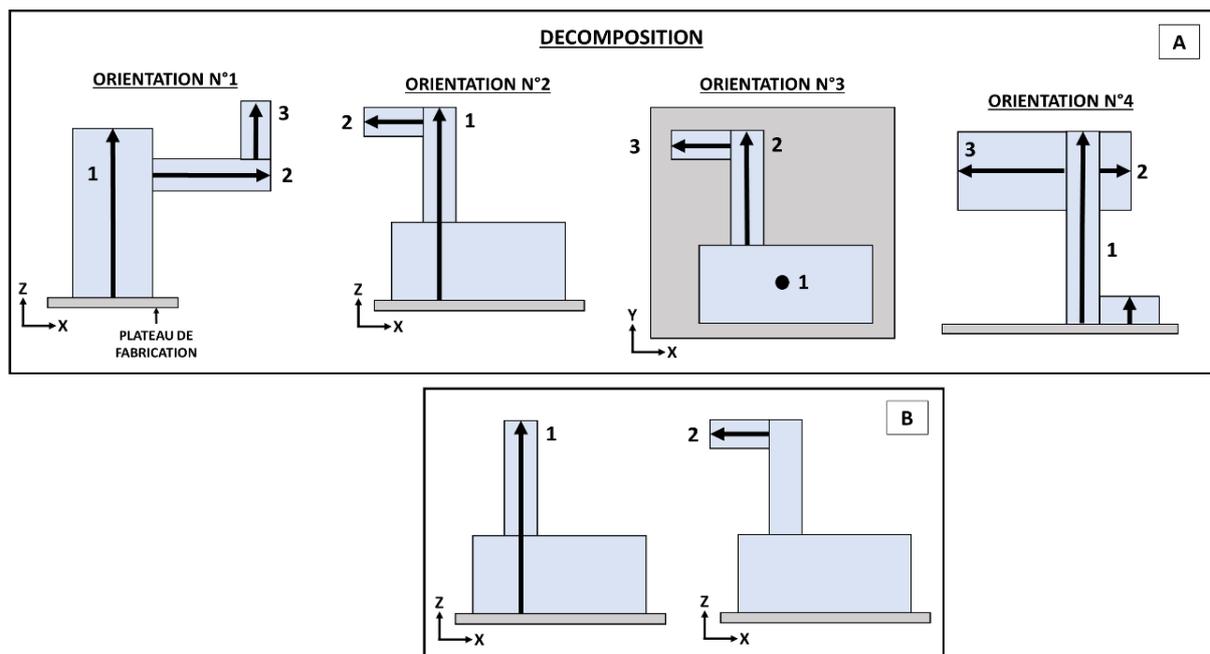


Figure 37 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondus, décomposition d'un composant complexe

Au sortir de cette étape, le composant est mis en position par rapport au plateau de fabrication qui a également été divisé en entités si nécessaire.

3.2 PRISE EN CONSIDERATION DES CRITERES DU CAHIER DES CHARGES

Dans le cadre de la méthodologie de préparation à la fabrication, deux catégories de paramètres inclus au sein du cahier des charges du composant doivent être pris en considération :

- les spécification géométriques (tolérances de formes, d'orientation, de position, de battement), dimensionnelles du composant (tolérances de diamètre, angulaires et linéaires) et d'état de surface [95]. Ces dernières peuvent, lorsque c'est nécessaire, impliquer l'ajout d'une

surépaisseur à la maquette numérique du composant à réaliser afin de mettre en place une stratégie de parachèvement (Figure 38) ;

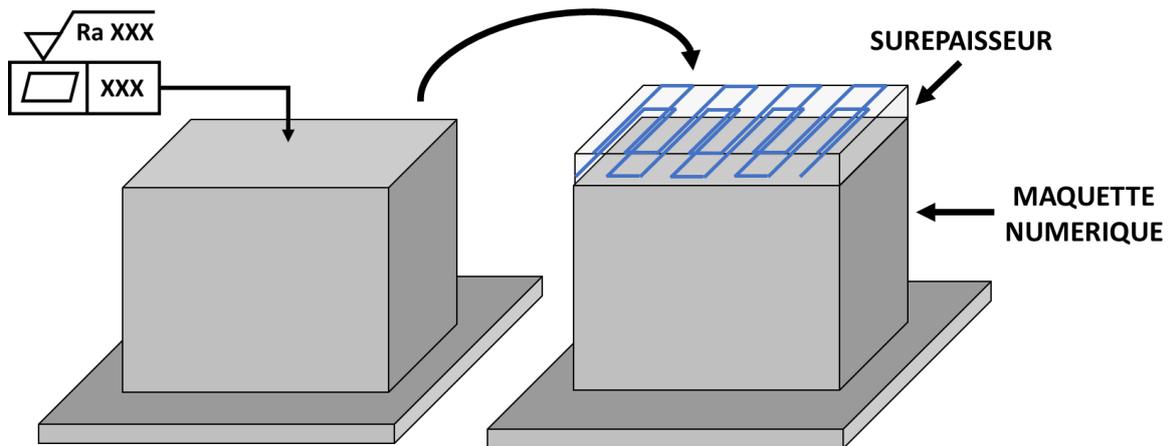


Figure 38 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, mise en place d'une stratégie de parachèvement

- les sollicitations mécaniques appliquées sur le composant pendant son service peuvent être simples (traction, compression, cisaillement, torsion, flexion pure) ou composées (flexion simple, flexion et traction, flexion et torsion, flambage, flexion déviée) [96]. Elles peuvent, lorsque c'est nécessaire, impliquer la réduction de l'épaisseur de la maquette numérique du composant à réaliser afin de mettre en place une stratégie de renforcement (Figure 39).

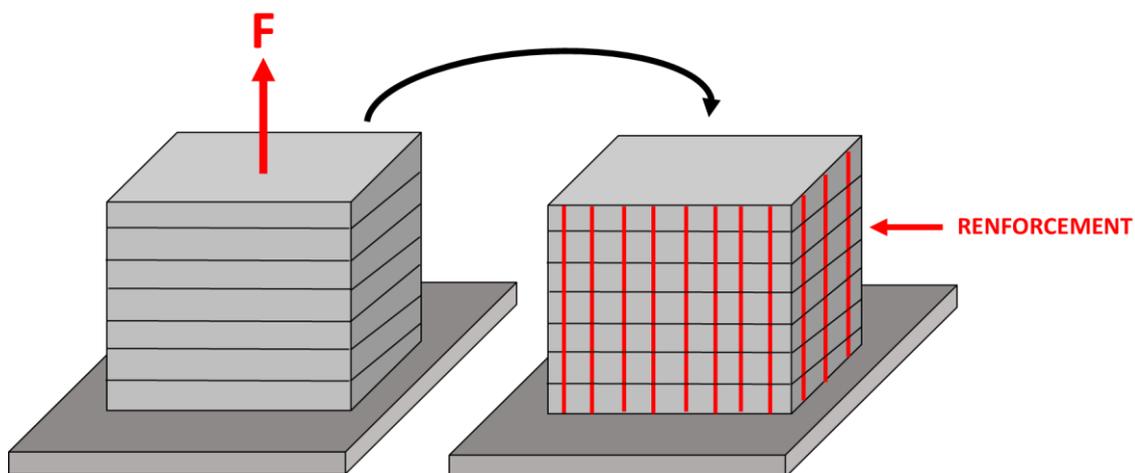


Figure 39 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, mise en place d'une stratégie de parachèvement

On décide de mettre en œuvre une stratégie de parachèvement ou de renforcement lors de l'étape suivante de mise en place des stratégies de fabrication, étape au sein de laquelle l'analyse de la capacité du procédé et sa comparaison avec le cahier des charges du composant est réalisée. Lorsqu'on doit effectuer l'une de ces opérations, on détermine la valeur ajoutée ou retirée à la maquette numérique. On réalise alors un rebouclage et on modifie les dimensions de la maquette numérique. Elles n'entraîneront pas de changements dans les dimensions finales du composant réalisé (Figure 40) :

- la surépaisseur ajoutée à la maquette numérique sera retirée par la stratégie de parachèvement ;
- l'épaisseur retirée à la maquette numérique sera comblée par la stratégie de renforcement.

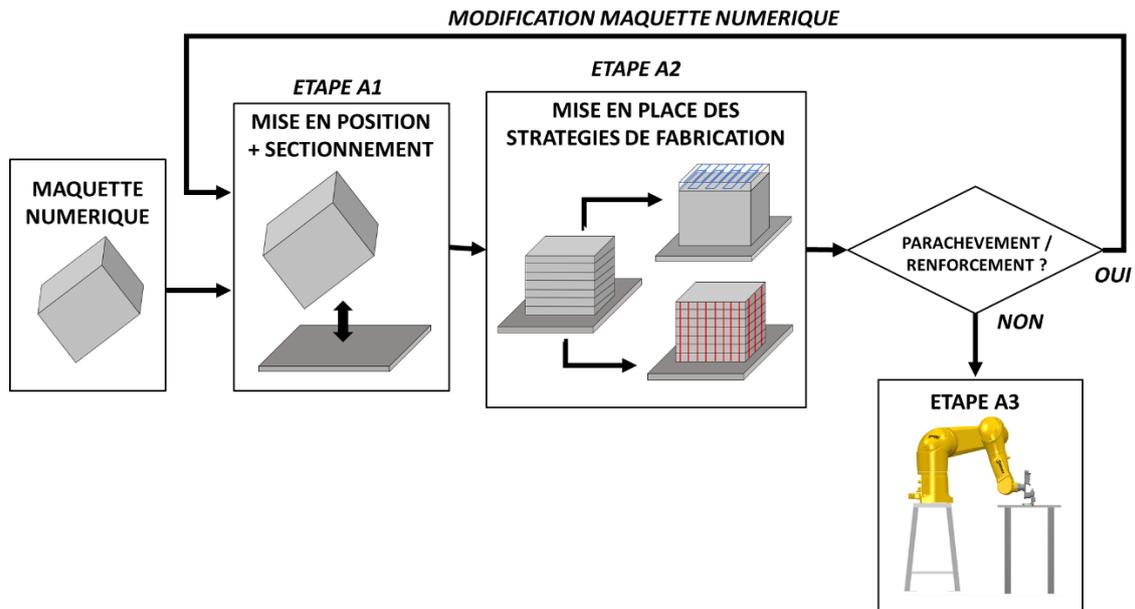


Figure 40 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, modification des dimensions de la maquette numérique suite à la mise en place d'un parachèvement ou d'un renforcement

Au sortir de cette étape, les dimensions de la maquette numérique ont été modifiées si cela s'est avéré nécessaire.

3.3 IMPLEMENTATION D'UNE STRUCTURE DE MAINTIEN OU DE SOUTIEN

La mise en position du composant par rapport au plateau de fabrication peut engendrer le besoin d'implémenter une structure de maintien ou une structure de soutien.

Les structures de maintien ont pour objectif de stabiliser un composant long et élancé lorsque : le côté le plus long du parallélépipède rectangle englobant (L_1) est vertical par rapport au plateau de fabrication et que les ratios d'élancement R_1 et / ou R_2 sont supérieurs à une valeur maximale, fixée à 3 dans le cadre de ces travaux de recherche (valeur déterminée de manière expérimentale) (Figure 41A).

Elles ont été développées dans le cadre de ces travaux de recherche afin de proposer une solution alternative à l'utilisation de supports qui doit être minimisée autant que possible. Trois différents types de structures de maintien ont été imaginées dans le cadre de ces travaux de recherche :

- structure directement implémentée au sein de la maquette numérique du composant à fabriquer (Figure 41B), cette dernière étant bâtie couche après couche en même temps que le composant. Elle prend appui sur le plateau de fabrication et entre en contact avec le composant à un ou plusieurs endroits judicieusement choisis. La liberté de conception de ce type de structures est importante et de nombreuses architectures sont possibles. Néanmoins, la structure est sacrificielle et elle devra être retirée après fabrication. Cette solution a été implémentée dans le cadre de la fabrication du fémur et sera présentée dans la partie de ce chapitre portant sur les cas d'applications ;
- maintien par contact (Figure 41C), la structure de maintien prenant position sur le plateau de fabrication et entrant en contact avec le composant en plusieurs endroits judicieusement choisis. La structure est réutilisable, ce qui n'engendre ni perte de matériau ni augmentation du temps de cycle de fabrication ; elle est retirée après fabrication du composant. Toutefois, nous avons jugé trop difficile à mettre en place le positionnement de la structure par rapport au composant, la structure devant être positionnée en cours de fabrication. Cette solution n'a pas été retenue ;

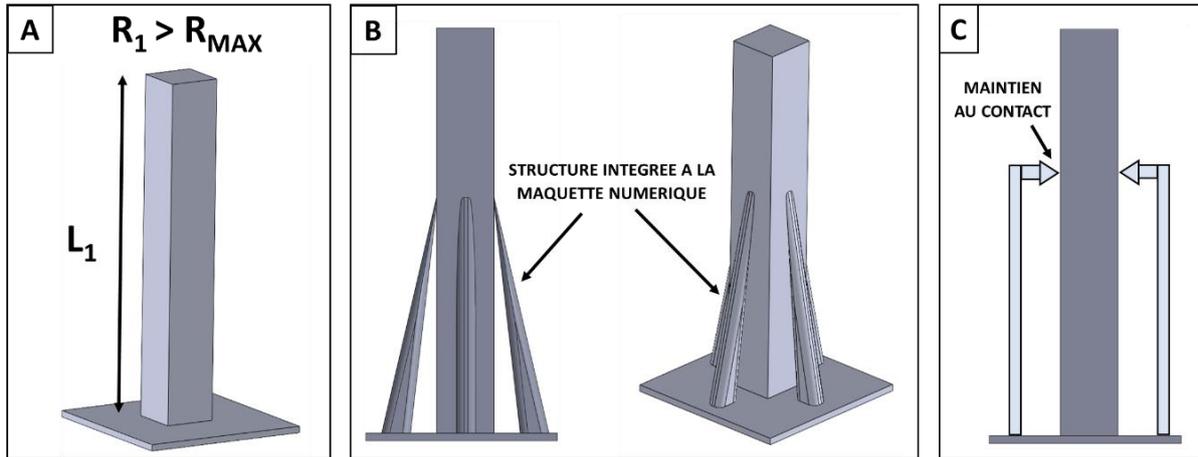


Figure 41 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondus, structures de maintien développées dans le cadre de ces travaux de thèse

- maintien par plateaux (plateaux également intégrés à la maquette numérique, Figure 42A), réalisé en deux temps. Dans un premier temps, les supports recevant les plateaux sont positionnés sur le plateau de fabrication à côté du composant en cours de réalisation. Ensuite, les plateaux recouvriront les surfaces supérieures des supports afin de maintenir le composant en position. La mise en position des supports aux plateaux est facile, les pertes de matière sont faibles, le temps de cycle de fabrication n'est pas augmenté et le retrait des plateaux aisé. Nous avons testé la faisabilité de cette solution dans le cadre de la fabrication d'un composant long et élancé, positionné à la verticale sur le plateau de fabrication (hauteur égale à 800mm). Dans un premier temps, nous avons essayé de réaliser le composant sans structure de soutien, ce qui l'a fait décrocher en cours de fabrication. Puis, un premier essai sur un composant à hauteur réduite (150 mm) a permis de paramétrer la solution (Figure 42B). Finalement, la solution a été implémentée sur le composant à taille réelle (Figure 42C). Les couches de matière ont été empilées sans décalage les unes sur les autres et le composant ne s'est pas décroché du plateau de fabrication sous l'effet du couple d'arrachement créé par l'outil additif (Figure 29B). La solution, bien que validée, n'a pas été réalisée dans le cadre de ces cas d'applications. Elle pourra être mise en application dans le cadre de futurs travaux.

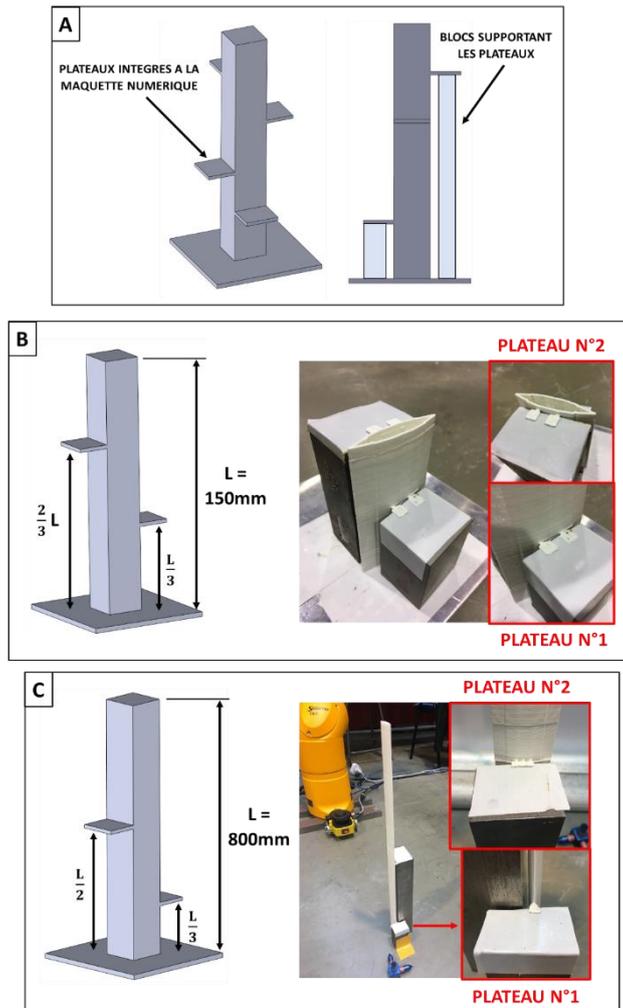


Figure 42 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, réalisation de la solution de maintien par plateau

Les structures de soutien ont pour objectif de créer un contact entre le composant et le plateau de fabrication, la mise en position n'engendrant pas dans tous les cas une large surface plane de contact. Le besoin de recourir à une structure de soutien est illustré par la Figure 43 dans le cas de la mise en position d'une pièce creuse de révolution (Figure 43A). Sa mise en position afin d'éviter le porte-à-faux n'offrant pas de surface de contact plane avec le plateau (Figure 43B), des ailettes ont été ajoutées à la maquette numérique du composant afin de le soutenir (Figure 43C).

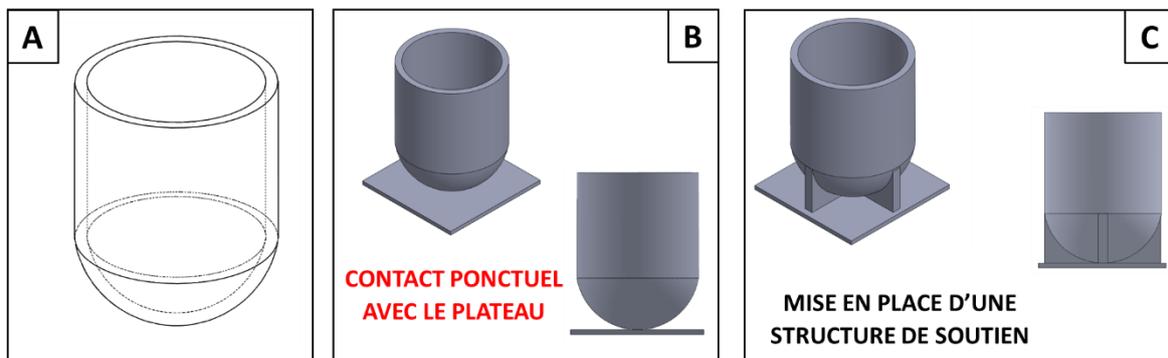


Figure 43 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, mise en place d'une structure de soutien

Au sortir de cette étape, une solution de maintien ou de soutien a été incorporée à la maquette numérique du composant lorsque cela s'est avéré nécessaire.

3.4 CHOIX DE COURBE DE CROISSANCE ET DE LA DISTANCE ENTRE LES SECTIONS

Le premier objectif de cette étape est de conférer une courbe de croissance à un composant simple ou à chaque entité d'un composant complexe, ce qui permettra par la suite de trancher le composant afin de lui définir des sections. Elle est choisie en fonction de l'orientation du composant par rapport au plateau de fabrication, de l'orientation de chacune des entités V_i ($1 < i \leq n$) par rapport à leurs substrats respectifs et des géométries du composant à réaliser :

- suivant l'intersections des plans de symétrie du composant. Dans ce cas de figure, la courbe de croissance démarre au niveau du substrat (Figure 44A) ;
- suivant l'orientation des parois du composant. Deux cas de figure sont possibles : la courbe de croissance démarre au niveau du substrat (Figure 44B) ou au niveau d'une paroi qui n'est pas en contact avec le substrat (Figure 44C) ;
- suivant la fibre neutre du composant. Dans ce cas de figure, la courbe de croissance démarre au niveau du substrat (Figure 44D) ;
- suivant l'axe de révolution du composant. Dans ce cas de figure, la courbe de croissance démarre au niveau du substrat (Figure 44E) ;
- perpendiculaire à l'axe de révolution. Dans ce cas de figure, la courbe de croissance démarre au niveau d'un substrat localisé sur une entité V_i avec $i > 1$ (Figure 44F).

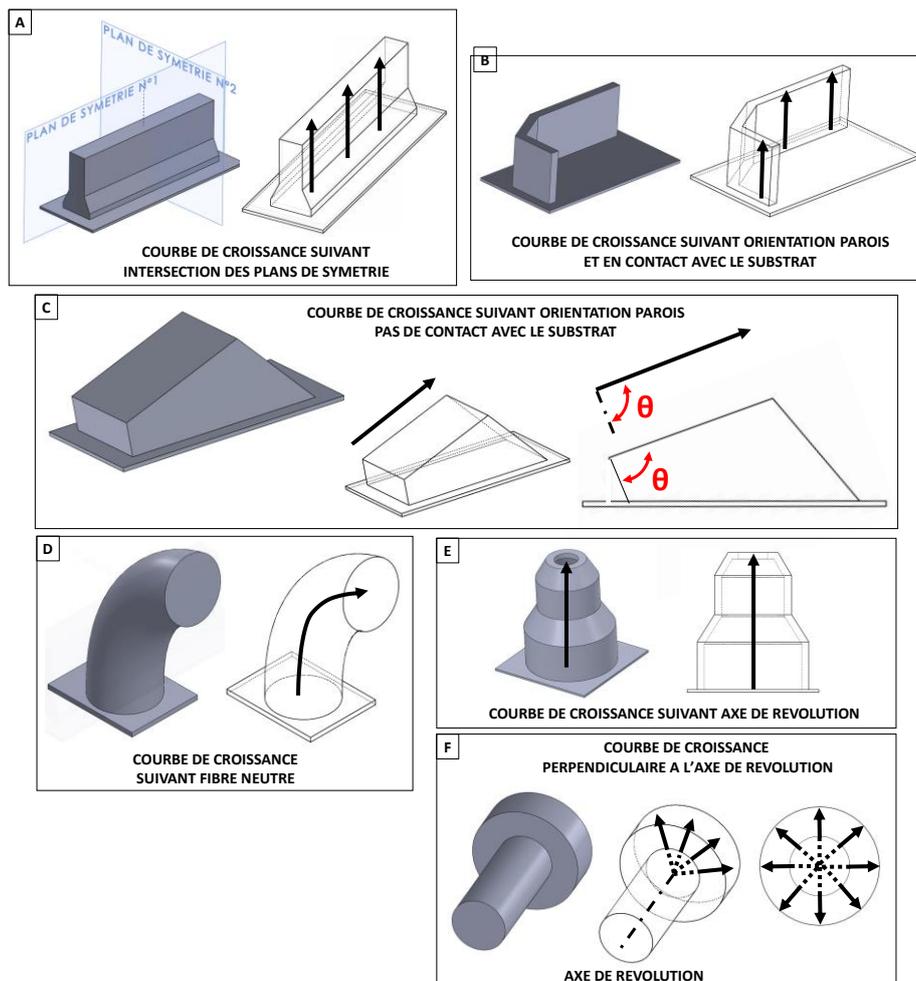


Figure 44 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondus, courbes de croissance

La distance entre les sections H suivant la courbe de croissance est ensuite déterminée. Elle correspond à un intervalle fixe (Figure 45A) ou variable, lorsque les dimensions du composant changent brusquement suivant une direction perpendiculaire à la courbe de croissance (Figure 45B). Elle est déterminée pour chaque application en fonction de la résolution nécessaire : plus la distance entre les sections est faible, plus les détails des géométries du composant à réaliser seront apparents.

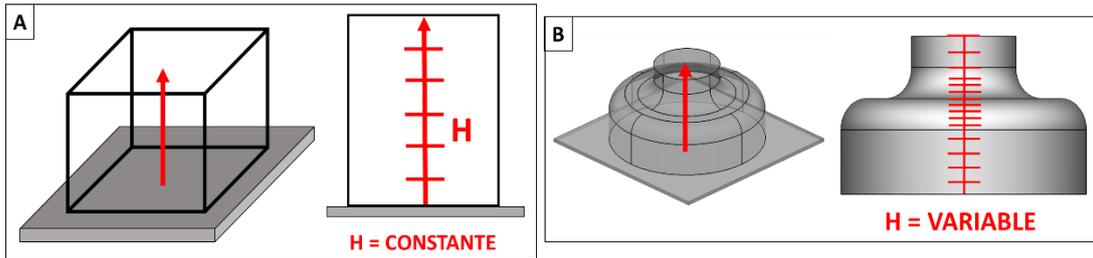


Figure 45 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, distance entre les sections

Le nombre de sections n d'un composant (ou d'une entité) est défini comme le ratio entre la longueur totale de la courbe de croissance par la distance entre les sections H (Figure 46). Les sections générées coupent la courbe de croissance en n point H_i ($1 \leq i \leq n$).

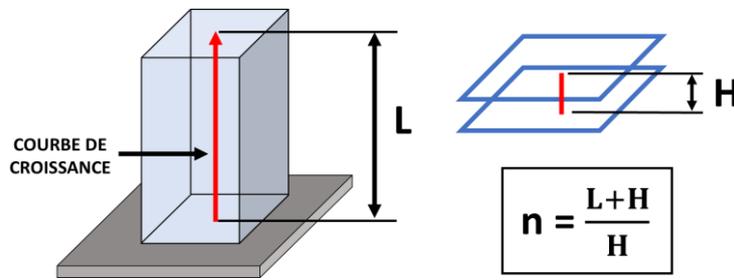


Figure 46 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, calcul du nombre de sections d'un composant (ou d'une entité)

3.5 TRANCHAGE DU COMPOSANT

Afin de trancher un composant, la géométrie et l'orientation des plans de tranchage doit d'abord être déterminée. La première surface de tranchage T_1 aura la même géométrie et la même orientation que son substrat respectif. Elle sera décalée de ce dernier d'une distance H correspondant à l'épaisseur de couche (Figure 47A et Figure 47A B). En procédant ainsi, le dépôt de la première couche de matière épouse les géométries du substrat : le dépôt de matière est correctement réalisé, la surface de contact entre l'entité et le substrat est maximisée. Dans le cas où le substrat est une surface de révolution, la première surface de tranchage est également une surface de révolution, décalée suivant le vecteur perpendiculaire à l'axe de révolution d'une distance H (Figure 47C).

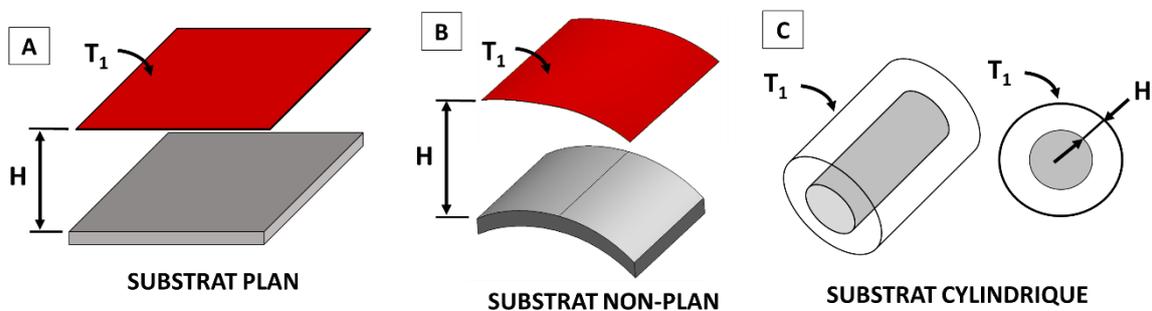


Figure 47 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, définition de la première surface de tranchage

Les surfaces de tranchage suivantes sont ensuite déterminées par décalage de la première surface de tranchage le long de la courbe de croissance du composant (Figure 48A) et les sections S_i sont définies comme étant l'intersection des surfaces de tranchage et de la maquette numérique (Figure 48B).

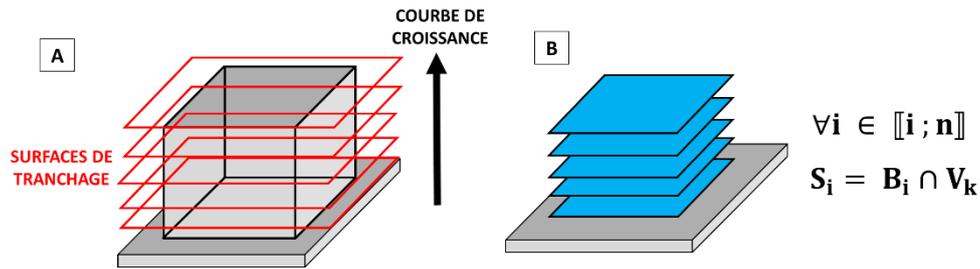


Figure 48 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, tranchage et sectionnement d'un composant

Le décalage des surfaces de tranchage par rapport au plateau de fabrication est illustré au sein de la Figure 49 dans le cas de la réalisation d'un composant ayant une courbe de croissance identique à son axe de révolution positionné sur un plateau de fabrication plan (Figure 49A). Les surfaces de tranchage, planes et horizontales, ont été décalées suivant la courbe de croissance suivant un décalage H égal à 1,425 mm (Figure 49B). Ainsi tranché, le composant a été correctement réalisé (Figure 49C).

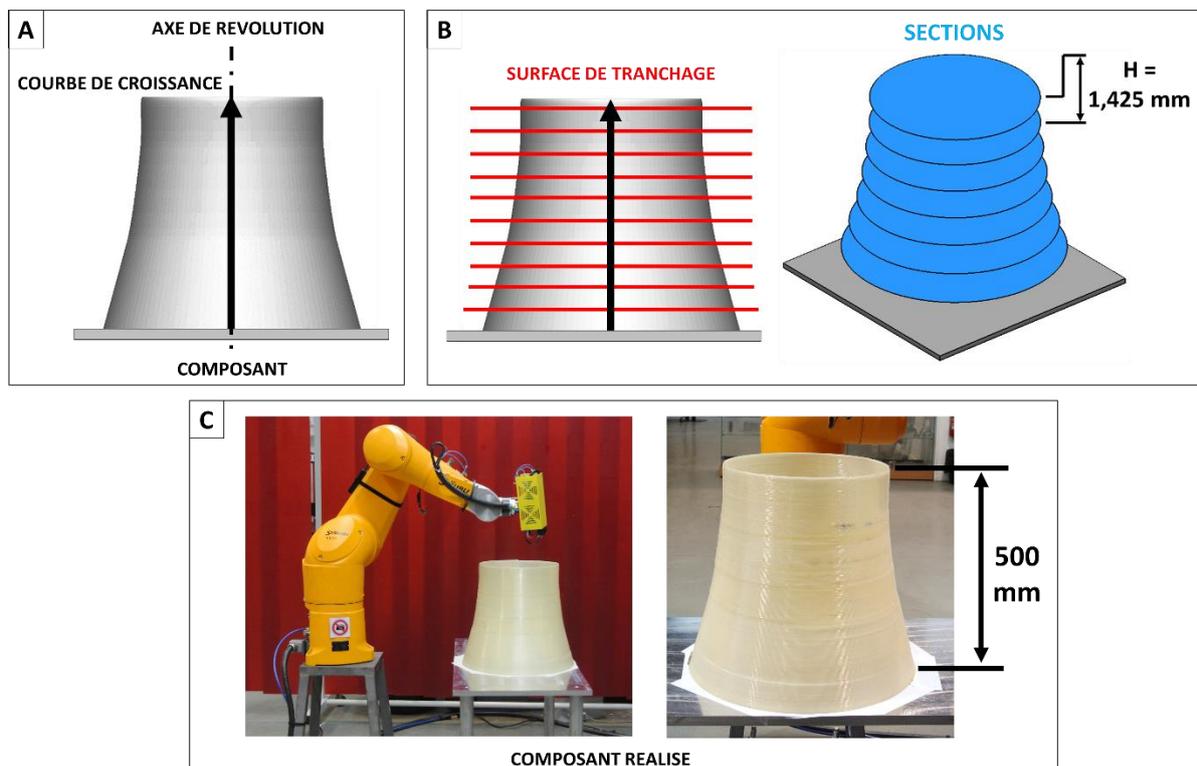


Figure 49 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, exemple d'application de tranchage par rapport à un plateau de fabrication plan

La Figure 50 illustre un cas d'application réalisé à partir d'un substrat non planaire (Figure 50A). Les surfaces de tranchage ont été décalées suivant la courbe de croissance du composant (Figure 50B), les trajectoires de fabrication générées sur chacune des sections (Figure 50C) et le composant finalement réalisé (Figure 50D).

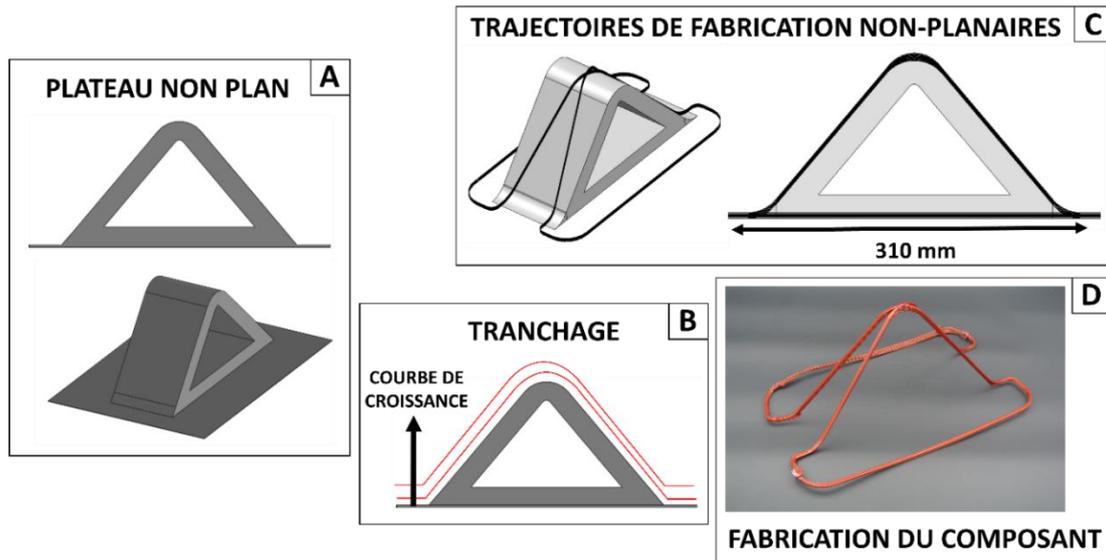


Figure 50 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, exemples d'applications de tranchage par rapport à un plateau de fabrication non plan

Tranchage d'un composant ayant une courbe de croissance à partir d'une surface latérale

Lorsque la courbe de croissance est positionnée par rapport à la paroi latérale d'un composant, elle ne prend pas naissance au niveau du plateau de fabrication (Figure 51A). Il apparaît alors nécessaire de réaliser un plateau de fabrication secondaire permettant aux premières couches d'être déposées (Figure 51B).

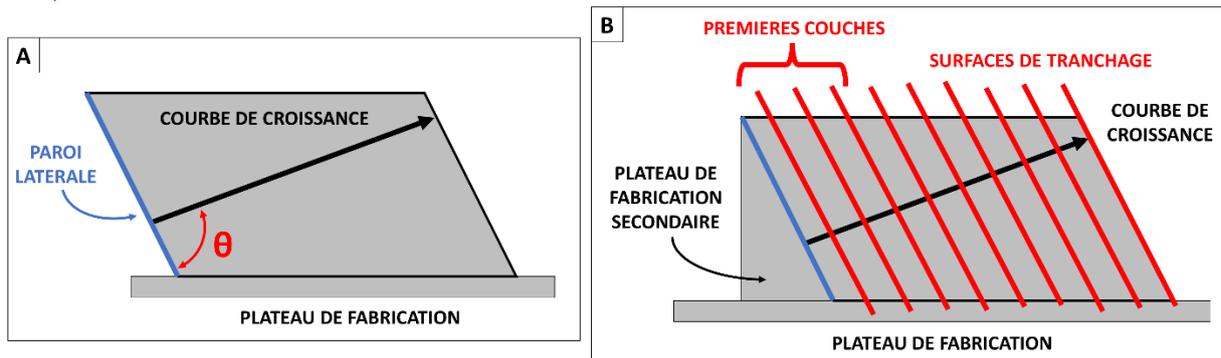


Figure 51 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, plateau de fabrication secondaire

Un cas d'application a été réalisé dans le cadre de ces travaux de recherche. Pour des raisons de confidentialité, le composant n'est pas montré dans son intégralité.

Il a été choisi de définir une courbe de croissance perpendiculaire à une des surfaces extérieures du composant, inclinée à 45 degrés (Figure 52). L'orientation des surfaces de tranchage a pour effet de minimiser l'impact des surfaces en porte-à-faux du composant ainsi positionné sur le plateau de fabrication en comparaison d'un tranchage selon une courbe de croissance suivant la verticale ascendante.

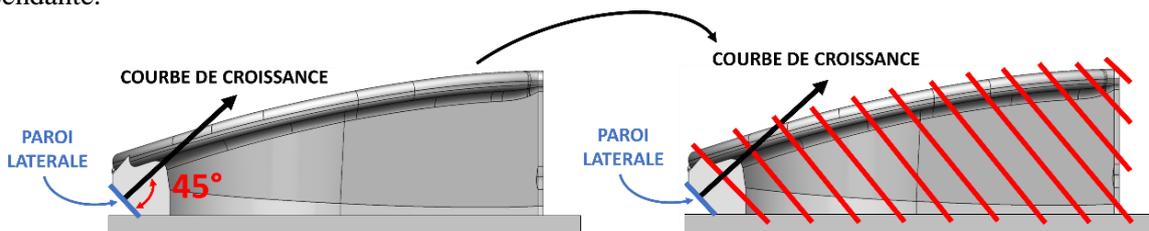


Figure 52 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, tranchage du composant

Afin de permettre la réalisation des premières couches, un plateau de fabrication secondaire a été bâti en amont de la fabrication du composant (Figure 53A). En procédant ainsi, le composant a pu être correctement réalisé (Figure 53B).

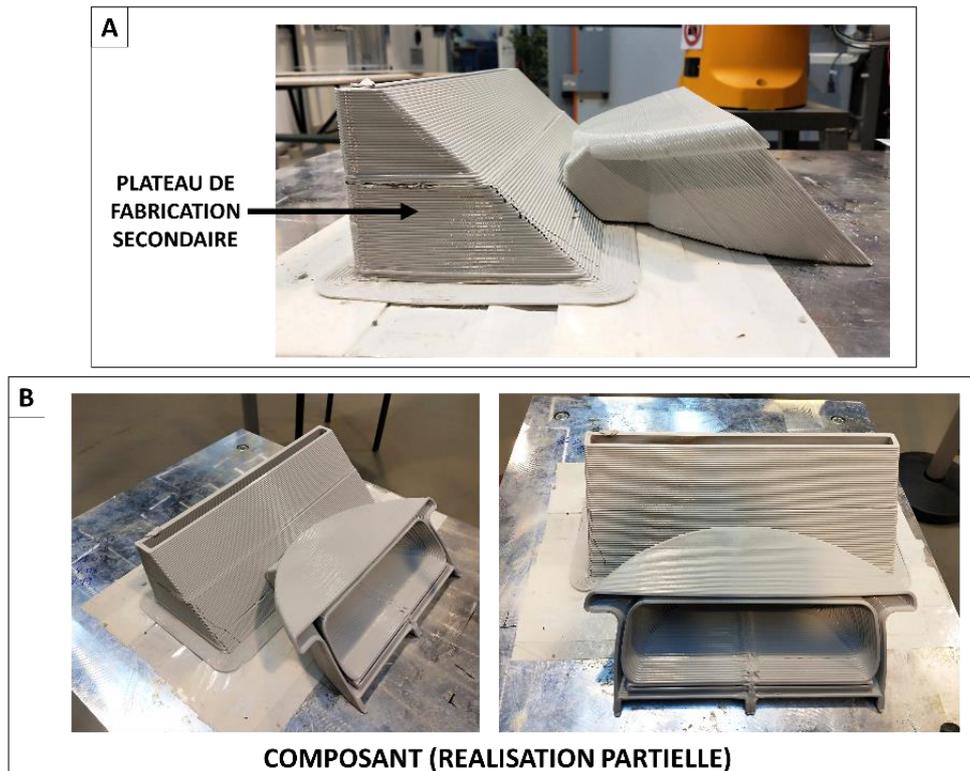


Figure 53 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, réalisation du composant

Tranchage d'un composant ayant une courbe de croissance de direction non constante

Dans le cas d'un composant ayant une courbe de croissance de direction non constante (Figure 54A), le barycentre B_i d'une surface de tranchage T_i coïncidera avec le point H_i localisé le long de la courbe de croissance du composant (ou de l'entité) et aura un vecteur normal colinéaire à un vecteur allant du point H_i au point H_{i+1} (Figure 54B).

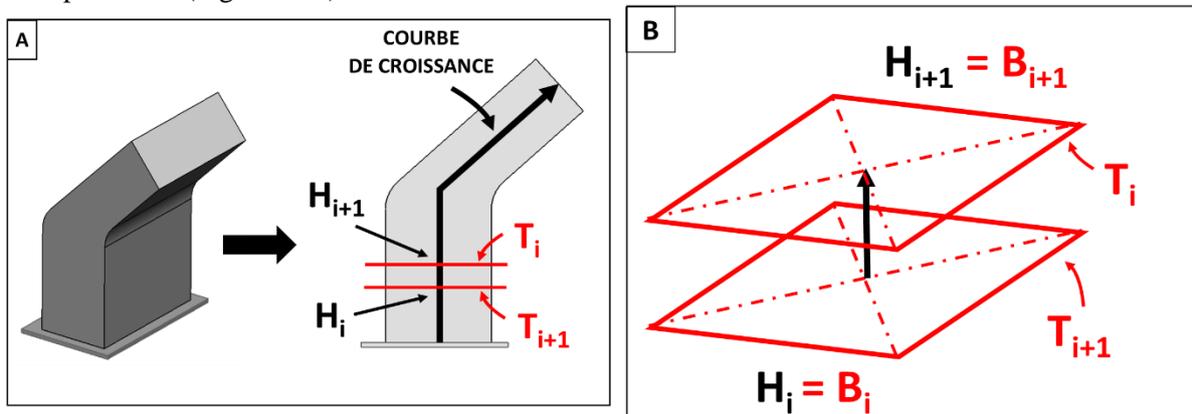


Figure 54 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, orientation des surfaces de tranchage dans le cas d'un composant ayant une courbe de croissance de direction non constante

Par ailleurs, les composants ayant une courbe de croissance de direction non constante peuvent également faire face à une problématique de chevauchement des sections. Ce cas de figure est représenté

au sein de la Figure 55A par un composant ayant une courbe de croissance formant un angle \widehat{OAC} différent de 180° . Les sections en amont et en aval du point A s'entrecroisent (Figure 55B), il a été choisi de redéfinir les sections en aval de la zone de chevauchement afin qu'elles ne s'intersectent plus (Figure 55C). Cette façon de procéder permet aux couches de polymère fondu se trouvant en aval du point A d'avoir un substrat sur lesquelles prendre appui. La redéfinition des zones de chevauchement sera réalisée autant de fois que nécessaire.

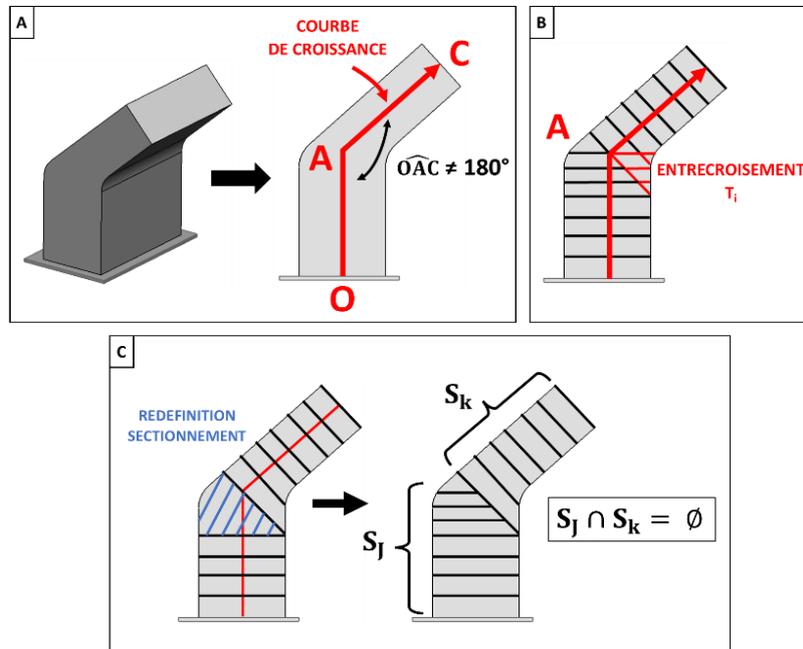


Figure 55 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, redéfinition des zones ou les sections s'entrecroisent suite au tranchage du composant

Le tranchage d'un composant ayant été sectionné suivant sa fibre neutre est illustrée par la réalisation d'une tuyère dont les géométries sont présentées au sein de la Figure 56.

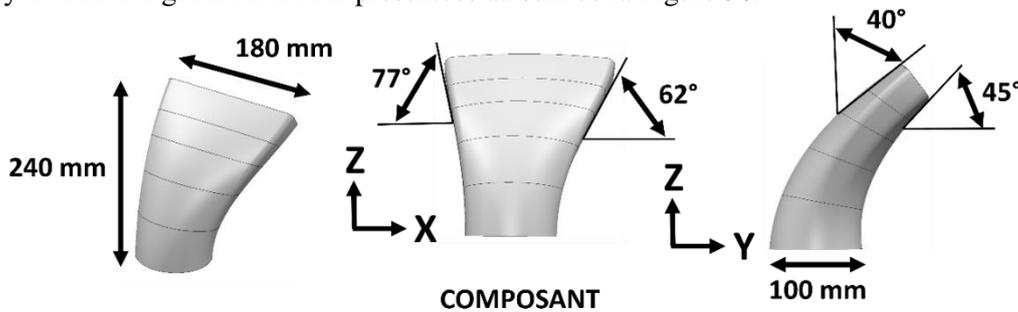


Figure 56 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, géométries de la tuyère réalisée

Nous avons choisi l'orientation illustrée au sein de la Figure 57 qui est la seule pour laquelle les surfaces intérieures et extérieures du composant ne dépassent pas la limite de porte-à-faux autorisée.

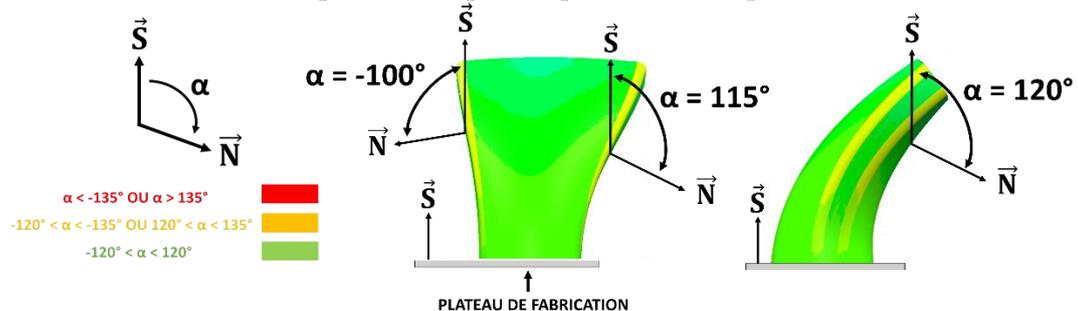


Figure 57 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, orientation des surfaces par rapport au plateau de fabrication

La courbe de croissance du composant a été choisie comme étant la fibre neutre du composant, tranchée par un ensemble de points H_i distants d'une distance H constante et égale à 0,5 mm (Figure 58A). Le composant étant en contact avec le plateau de fabrication, les surfaces de tranchage seront planes et orientées suivant la fibre neutre du composant. Ce faisant, les sections s'intersectent dans la zone décrite au sein de la Figure 58B.

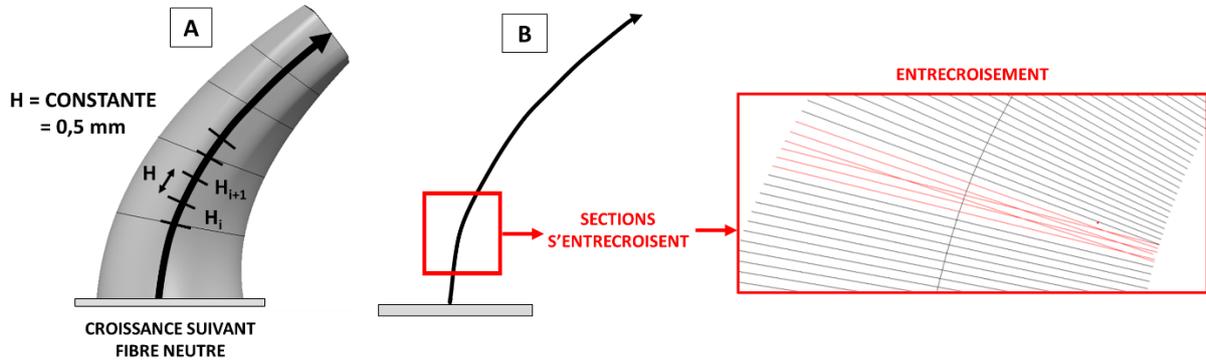


Figure 58 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, entrecroisement des sections

Par conséquent, les sections localisées en aval du point d'intersection ont été redéfinies de manière à ce que les sections situées dans la zone en amont et en aval ne s'intersectent plus, suivant la règle précédemment énoncée (Figure 59).

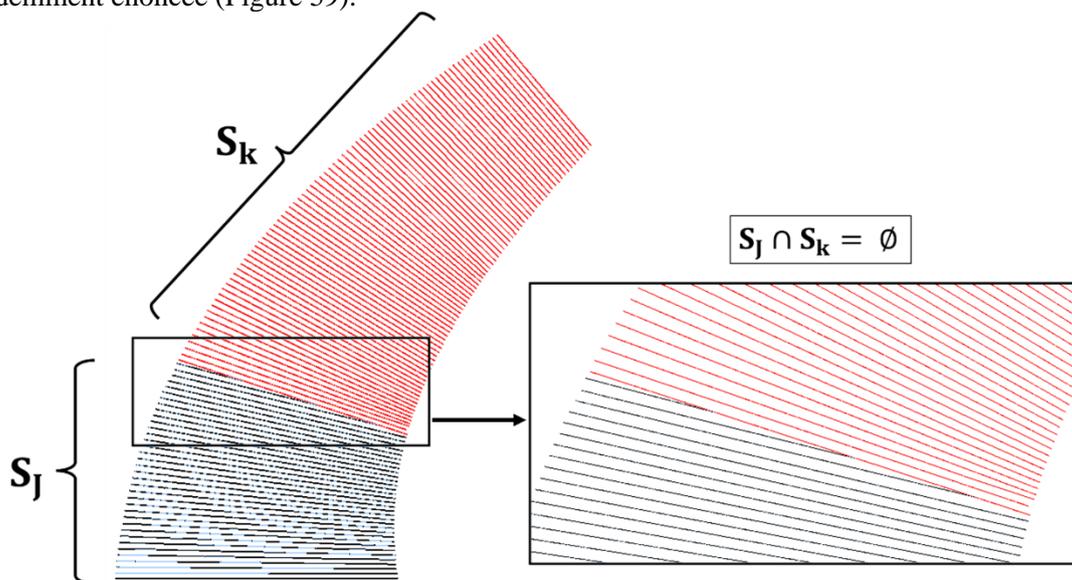


Figure 59 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, tranchage après redéfinition des sections

Le composant a été ensuite fabriqué en réalisant une passe sur le contour extérieur de chacune des sections. Les résultats post fabrication sont présentés au sein de la Figure 60.



Figure 60 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, réalisation de la tuyère

3.6 CONCLUSION SUR LA METHODOLOGIE DE MISE EN POSITION ET DE SECTIONNEMENT DU COMPOSANT A REALISER

Dans cette partie, a été proposée une méthodologie portant sur la mise en position et le sectionnement de composants de grandes dimensions réalisés à partir de matériaux thermoplastiques fondus. Le positionnement du composant par rapport au plateau de fabrication y est d'abord réalisé en choisissant une orientation qui respecte la limite de porte-à-faux autorisée. Dans le cas contraire, le composant est divisé en entités. Puis, on réalise un bouclage avec l'étape A2 de la méthodologie : une épaisseur est ajoutée ou retirée de la maquette numérique en fonction de la mise en place ou non de stratégies de parachèvement ou de renforcement. Ensuite, une solution de maintien est incorporée à la maquette numérique du composant lorsque celui-ci est positionné à la verticale par rapport au plateau de fabrication. Pour finir, les différentes entités sont tour à tour sectionnées en ayant préalablement défini une courbe de croissance et la distance entre les sections. Au sortir de la méthodologie, le composant est mis en position et sectionné par rapport au plateau de fabrication.

4. CAS D'APPLICATION

Les différents cas d'application ayant pour objectif de mettre en avant la généricité et la pertinence de chacune des étapes de la méthodologie de fabrication ont été présentés lors du chapitre précédent. La suite de cette partie consistera à leur appliquer les deux méthodologies précédemment présentées.

Dans cette partie, les démonstrateurs de grandes dimensions (chaise, pale d'éolienne, hyperboloïde, fémur et lame du sabre) ont été tour à tour mis en position et tranchés suivant la méthodologie présentée au sein de la partie précédente.

4.1 MISE EN POSITION ET IMPLEMENTATION DE STRUCTURES DE SOUTIEN

En ce qui concerne la chaise, il n'existe qu'une seule orientation qui permette de respecter la limite de porte -à-faux autorisée lorsque l'une ou l'autre des faces latérales est en contact avec le plateau de fabrication (Figure 61). Le composant étant symétrique suivant un plan parallèle aux axes XY, les

positionnements avec faces latérales en contact avec le plateau de fabrication sont équivalents. A été choisie la mise en position du composant avec faces latérales en contact avec le plateau de fabrication.

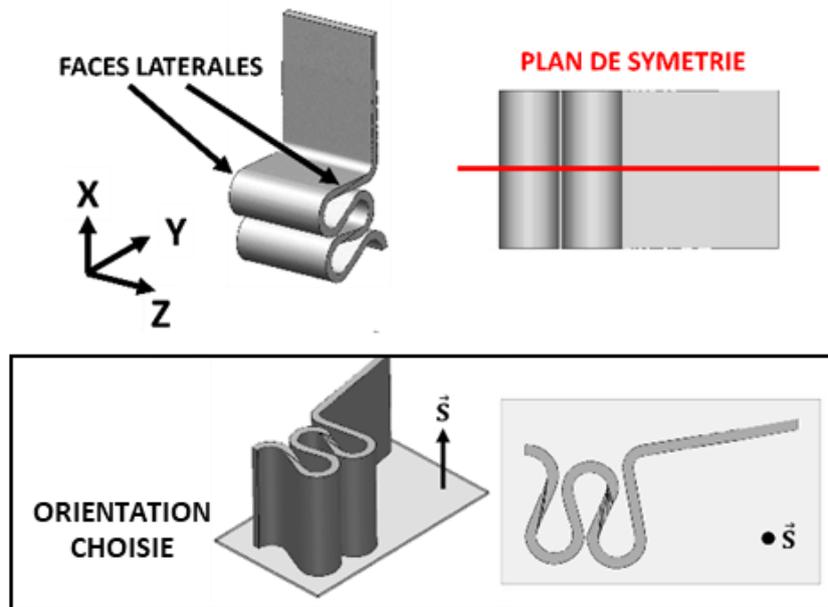


Figure 61 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, mise en position de la chaise

Lorsque le fémur est placé à l'horizontale par rapport au plateau de fabrication (Figure 62A), la surface du composant dépassant la limite de porte-à-faux admissible est élevée, et ce quelle que soit l'orientation de l'axe anatomique fémoral (Figure 62B). Cette orientation nécessitera une quantité de support importante, ce qui est contraire à la règle concernant la mise en position des composants visant à minimiser la quantité de support déposés (Figure 62C).

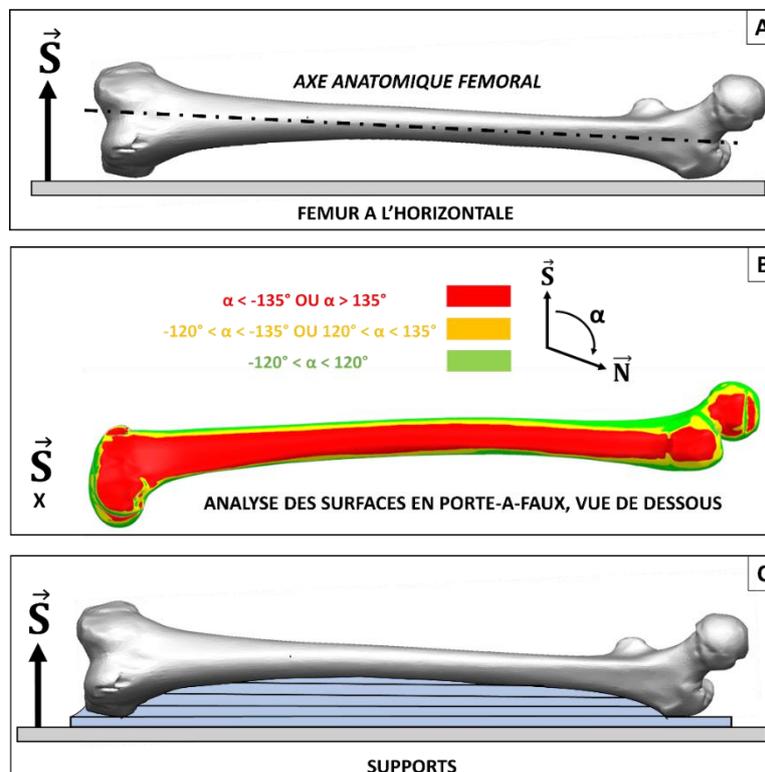


Figure 62 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, fémur à l'horizontale

L'orientation du fémur devra alors privilégier une orientation à la verticale (axe anatomique fémoral colinéaire à la normale sortante au substrat), avec un angle β égal à 90° . En effet, pour des valeurs de l'angle β comprise entre 0 et 90° (Figure 63A), la quantité de support à déposer reste importante (Figure 63B).

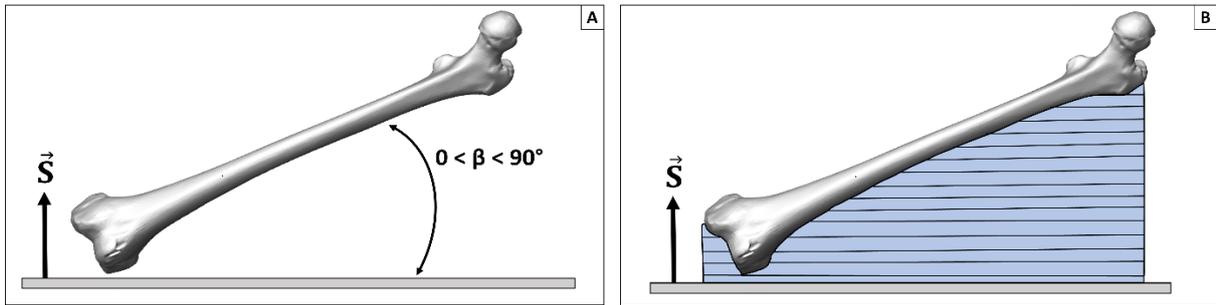


Figure 63 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, fémur positionné avec son axe anatomique compris entre 0 et 90° par rapport au plateau de fabrication

Deux orientations sont alors possibles (Figure 64A) :

- condyle en contact avec le plateau de fabrication ;
- tête fémorale en contact avec le plateau de fabrication.

Le condyle en contact avec le plateau de fabrication est l'orientation qui présente le moins de surfaces en porte-à-faux (Figure 64B). La présence de surfaces excédant la limite de porte-à-faux admissible au niveau de la tête fémorale a été jugée suffisamment faible pour ne pas engendrer une décomposition en entités. Le condyle ne comportant pas de surface plane, il y a présence de zones auto-supportées entre sa face inférieure et le plateau de fabrication. Par conséquent, une structure de soutien, qui permet de lier le plateau de fabrication à la surface inférieure du condyle a été implémentée à la maquette numérique (Figure 64C). Cette structure de soutien est bâtie avec le composant et retirée après fabrication.

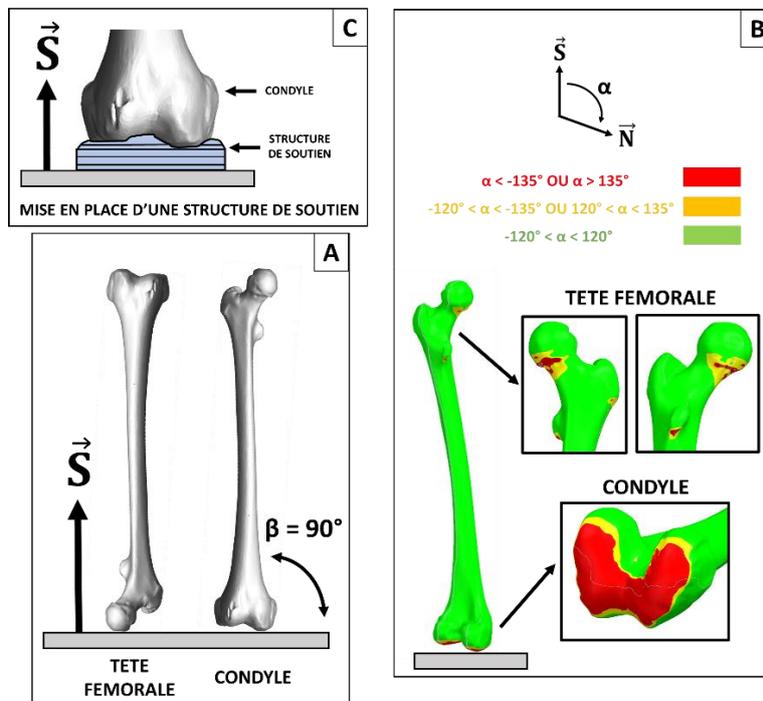


Figure 64 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, mise en position du fémur sur le plateau de fabrication

Ainsi positionné sur le plateau de fabrication, le composant fait face à une problématique de mouvements parasites engendrés par le déplacement de l'effecteur additif en cours de fabrication ce qui provoque à terme un décrochage entre le composant et le plateau de fabrication (Figure 65A). Il a alors été choisi d'implémenter une structure de maintien via une modification de la maquette numérique (Figure 65B). Cette structure de maintien est bâtie avec le composant et retirée après fabrication.

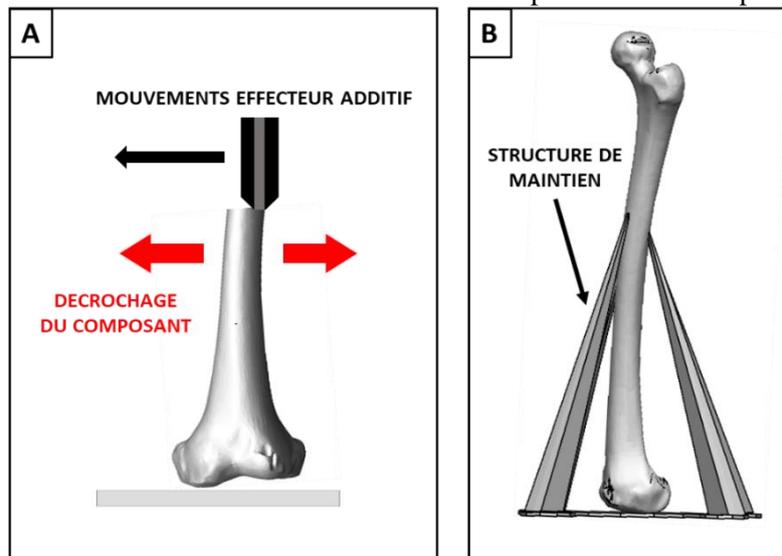


Figure 65 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, structure de maintien mise en place dans le cadre de la fabrication du fémur

Pour ce qui est de la pale d'éolienne, plusieurs mises en position peuvent être réalisées. Lorsque le composant est positionné « sur le côté », des supports ayant pour objectif de joindre le composant et le substrat et de supporter les surfaces dépassant la limite de porte-à-faux admissible sont nécessaires (Figure 66A). C'est également le cas lorsque le composant est positionné « à plat » (Figure 66B).

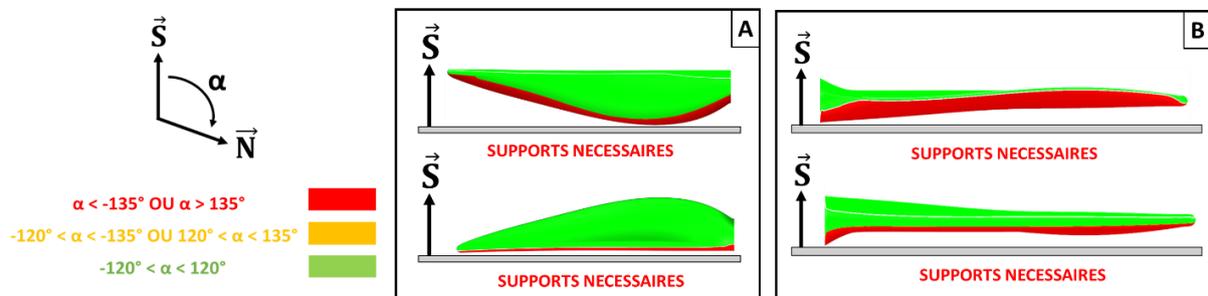


Figure 66 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, positionnement de la pale « sur le côté » et « à plat »

Le positionnement de la pale à la verticale n'engendrant pas de surfaces supérieures à la limite de porte-à-faux admissible, on a choisi l'orientation offrant la plus grande surface de contact avec le plateau de fabrication (Figure 67).

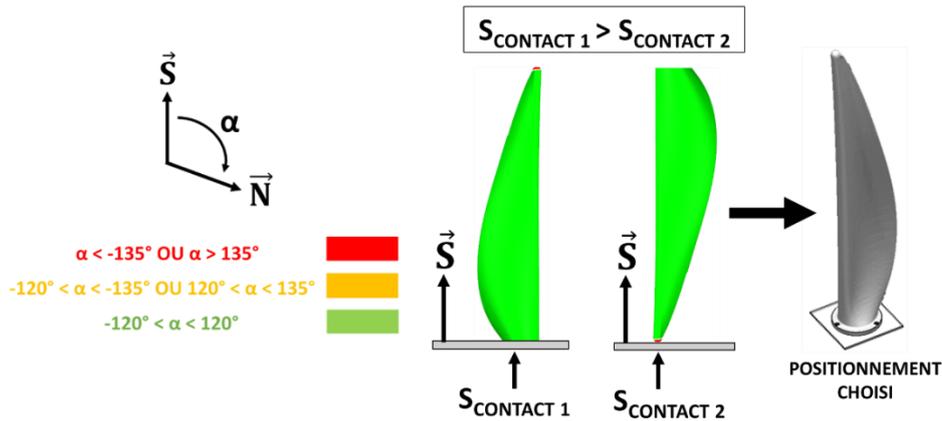


Figure 67 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, positionnement de la pale à la verticale

En ce qui concerne l'hyperboloïde, deux orientations du composant par rapport au plateau de fabrication sont possibles :

- lorsque le composant est positionné avec son axe de révolution normal au vecteur \vec{S} , les surfaces intérieures et extérieures dépassant la limite de porte-à-faux admissible sont importantes. Des supports entre le composant et le plateau de fabrication mais aussi à l'intérieur même du composant sont nécessaires (Figure 68A) ;
- lorsque le composant est positionné avec son axe de révolution colinéaire au vecteur \vec{S} , les surfaces du composant respectent la limite de porte-à-faux admissible. Cette orientation offre également une large surface de contact entre le plateau de fabrication et le composant. Par conséquent, cette mise en position a été choisie (Figure 68B).

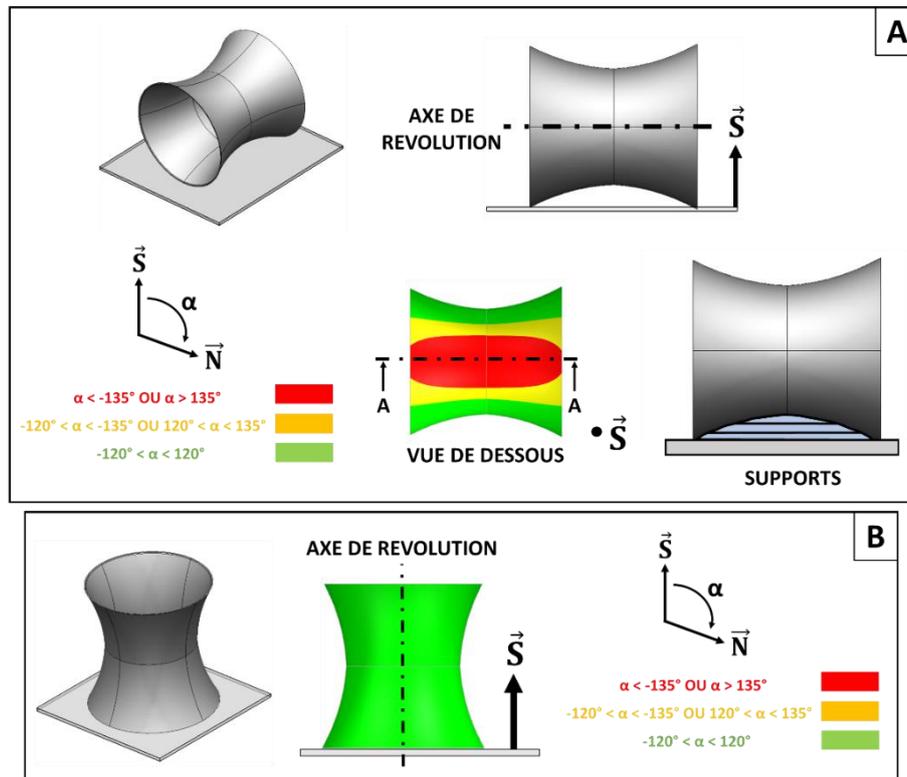


Figure 68 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, mise en position de l'hyperboloïde

La mise en position de la lame de sabre par rapport au plateau de fabrication offre trois possibilités : à plat, sur le côté et à la verticale. Positionnée à plat, la lame présente un porte-à-faux par rapport au plateau de fabrication excédant la limite admissible et par conséquent, cette orientation n'est pas retenue

(Figure 69A). Sur le côté (Figure 69B) et à la verticale (Figure 69C), les surfaces du composant n'excèdent pas la limite de porte-à-faux autorisée. Un choix entre ces deux orientations est à réaliser.

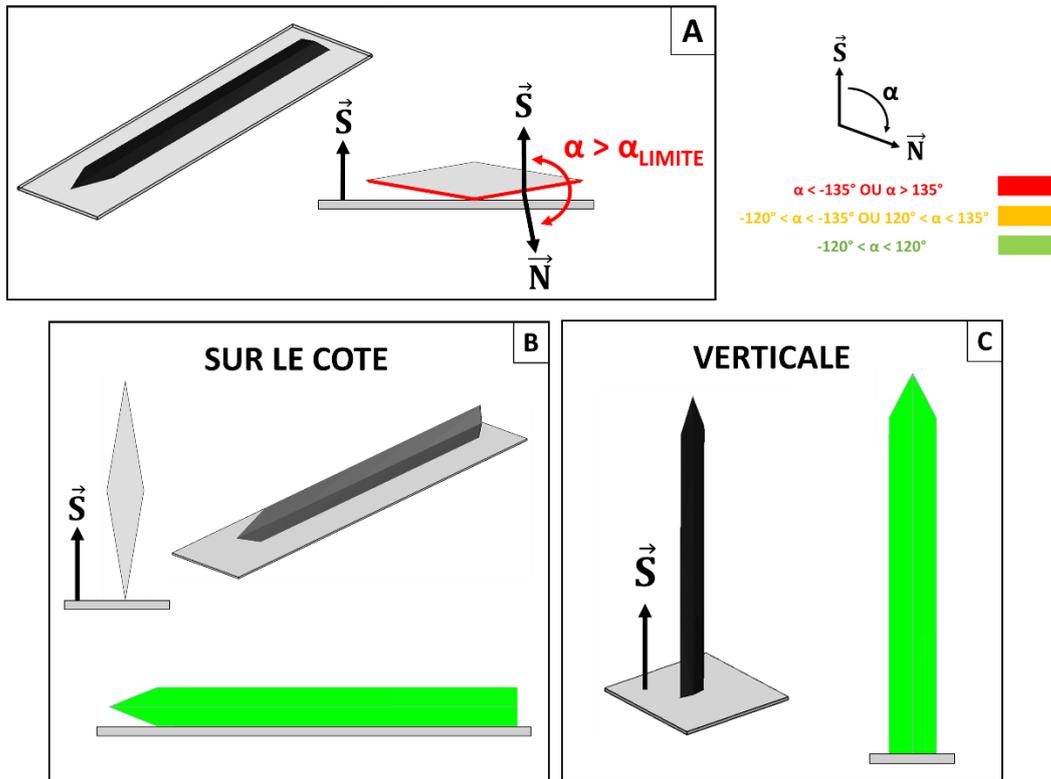


Figure 69 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, analyse des surfaces en porte-à-faux pour chacune des orientations de la lame de sabre par rapport au plateau de fabrication

L'orientation du composant à la verticale, bien qu'offrant la plus grande surface de contact avec le plateau de fabrication, nécessite également la mise en place d'une structure de maintien, le composant allant faire face à la problématique de décrochage pendant le cycle de fabrication (Figure 70A). Une structure de maintien de moindre ampleur devra également être ajoutée à la lame positionnée sur le côté afin de maintenir cette dernière pendant le cycle de fabrication car elle n'offre pas de surface plane avec le plateau de fabrication (Figure 70B). Sa réalisation s'avère néanmoins plus simple à mettre en œuvre et ne nécessite pas de modification de la maquette numérique : la structure de soutien sera réalisée en amont du cycle de fabrication et servira de support lors de la fabrication du composant. L'orientation de la lame de sabre « sur le côté » avec implémentation d'une solution de maintien a donc été retenue.

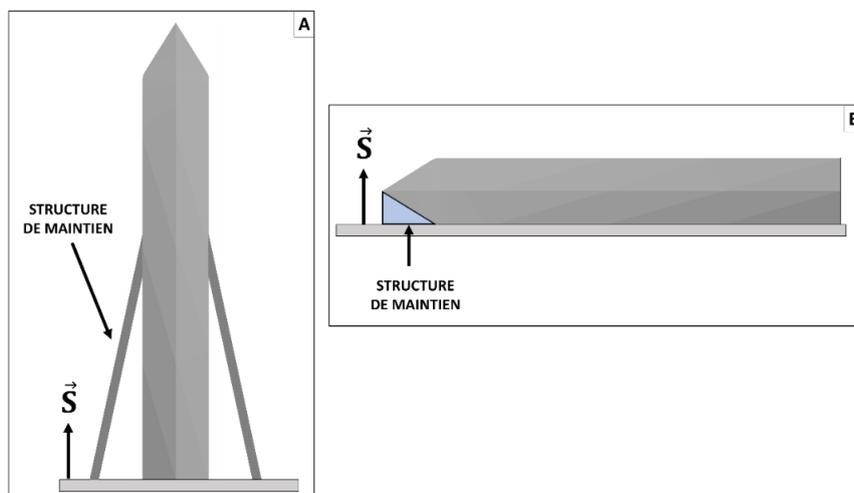


Figure 70 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, structures de maintien de la lame de sabre en position verticale et sur le côté

Il n'existe pas d'orientation de l'hélice par rapport au plateau de fabrication pour laquelle les surfaces n'excèdent pas la limite de porte-à-faux autorisée :

- lorsque l'axe du moyeu central est colinéaire à la normale sortante au plateau de fabrication, les surfaces inférieures des pales sont autosupportées (Figure 71A) ;
- lorsque l'axe du moyeu central est perpendiculaire à la normale sortante au plateau de fabrication, le moyeu et deux pales dépassent la limite de porte-à-faux autorisée (Figure 71B).

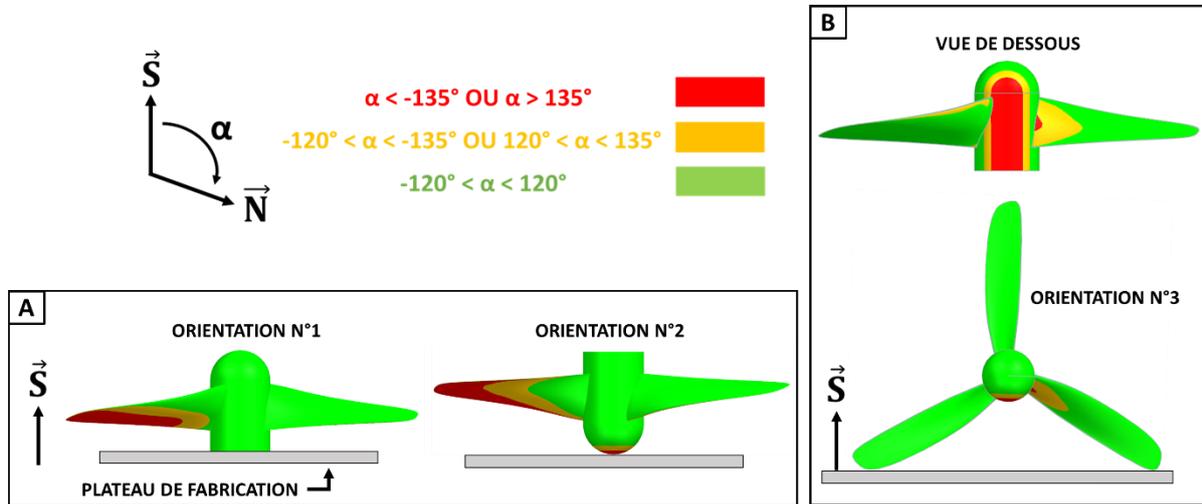


Figure 71 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, mise en position de l'hélice

Par conséquent, le composant a été décomposé en entités élémentaires, l'agencement des entités présenté ci-dessous permettant de dépasser la problématique de porte-à-faux par rapport au plateau de fabrication :

- l'entité V_1 est le moyeu central de l'hélice. Il existe une et une seule orientation pour laquelle le moyeu n'admet pas de surfaces excédant la limite de porte-à-faux autorisé par rapport au plateau de fabrication, lorsque sa plus grande surface plane est en contact avec le plateau de fabrication (Figure 72A) ;
- les entités V_2 , V_3 et V_4 sont les pales de l'hélice (Figure 72B). Le substrat commun aux trois entités est la surface extérieure du moyeu (surface cylindrique). Par rapport à cette dernière, les pales ne présentent pas de surface en porte-à-faux excédant la limite autorisée.

La mise en position de l'hélice retenue est illustrée Figure 72C.

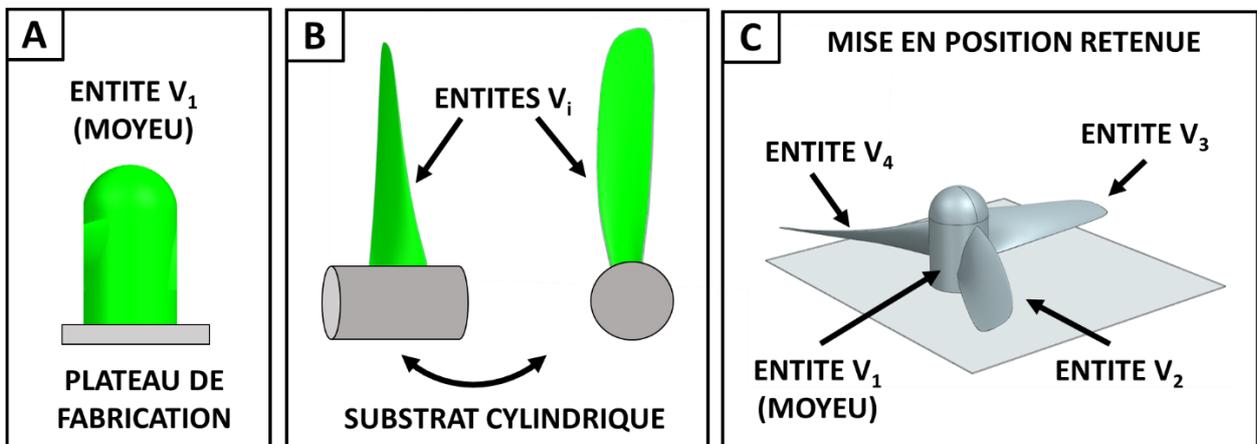


Figure 72 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, décomposition du composant en entités

4.2 CHOIX DE LA COURBE DE CROISSANCE, DE LA DISTANCE ENTRE LES SECTIONS ET TRANCHAGE DES COMPOSANTS

Une fois les composants mis en position, leurs courbes de croissance ont été choisies en fonction de leurs géométries respectives et leur mise en position sur le plateau de fabrication. La courbe de croissance de l'hyperboloïde a été définie comme colinéaire à l'axe de révolution du composant (Figure 73A). Celle de la pale d'éolienne l'a été comme parallèle au bord d'attaque du composant (Figure 73B) et celle de la chaise comme parallèle aux parois extérieures et verticales du composant (Figure 73C).

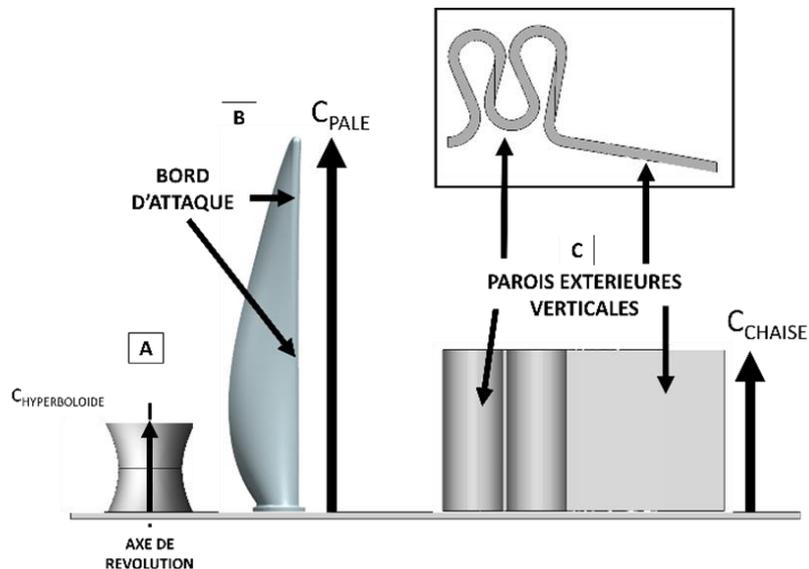


Figure 73 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, courbes de croissance choisies pour réaliser l'hyperboloïde, la pale d'éolienne et la chaise

Dans le cas de la fabrication de la chaise, de la pale d'éolienne et de l'hyperboloïde, une distance entre les sections H égale à 1,425 mm a été choisie. Les composants étant fabriqués à partir du plateau de fabrication, les surfaces de tranchages sont planes et horizontales.

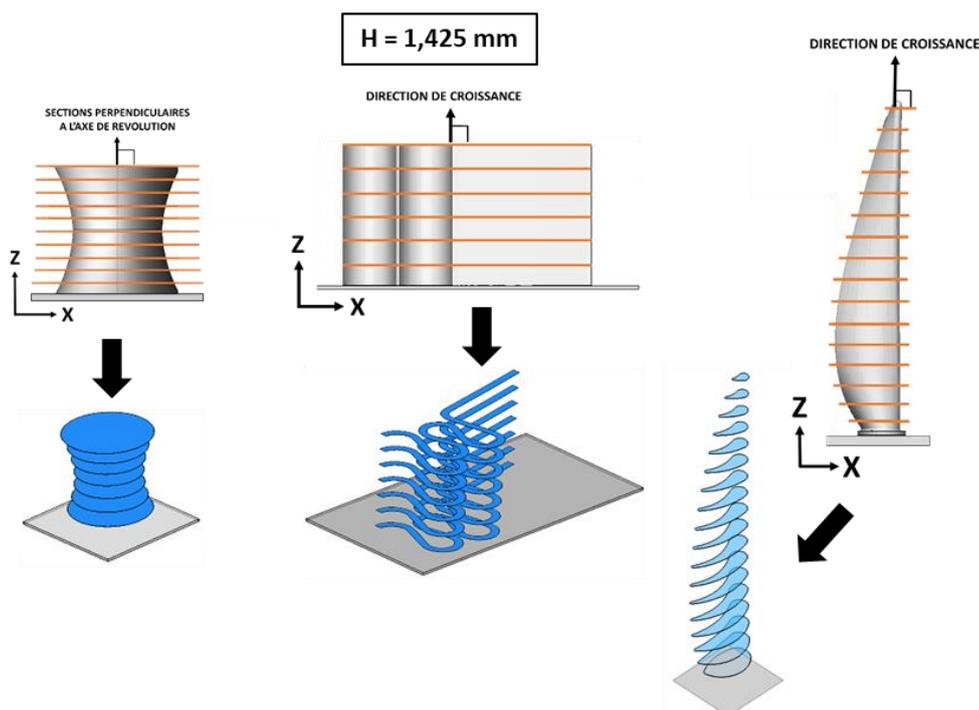


Figure 74 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, sectionnement des composants

La courbe de croissance de la lame de sabre a été définie afin d'être contenue dans le plan de symétrie du composant (ZX) et parallèle à la surface A se trouvant à l'extrémité du composant (Figure 75A). La courbe de croissance du fémur a, quant à elle, été définie comme colinéaire à l'axe mécanique fémoral (Figure 75B).

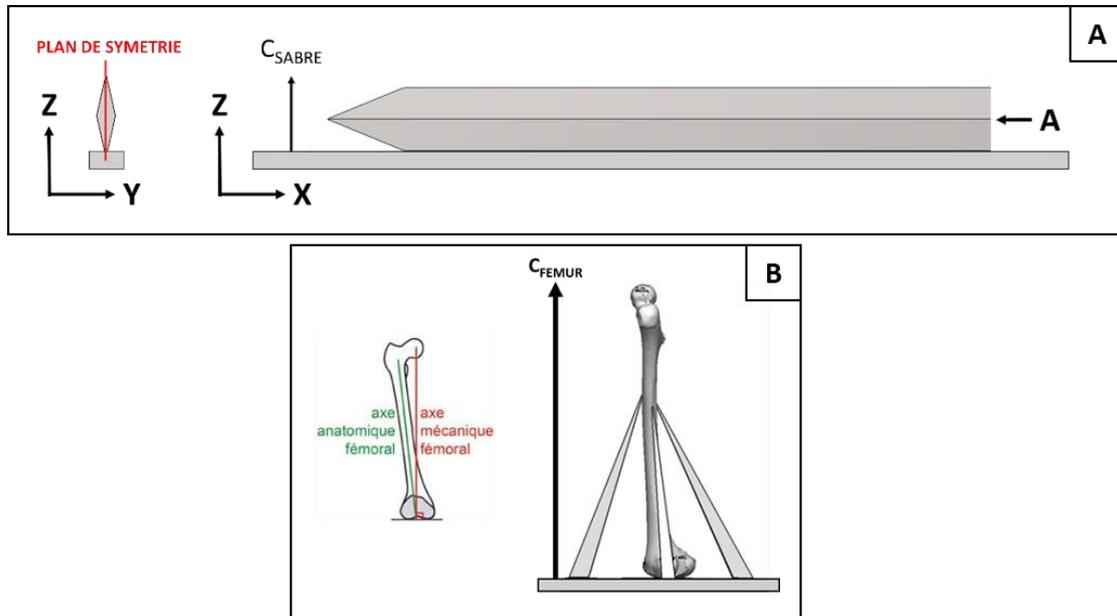


Figure 75 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, courbe de croissance de la lame du sabre et du fémur

Comme la réalisation du fémur et de la lame du sabre demandent une forte résolution afin d'optimiser le niveau de détails du composant, on a défini une épaisseur de couche égale à 0,2 mm. Les composants étant fabriqués à partir du plateau de fabrication, les surfaces de tranchages sont planes et horizontales.

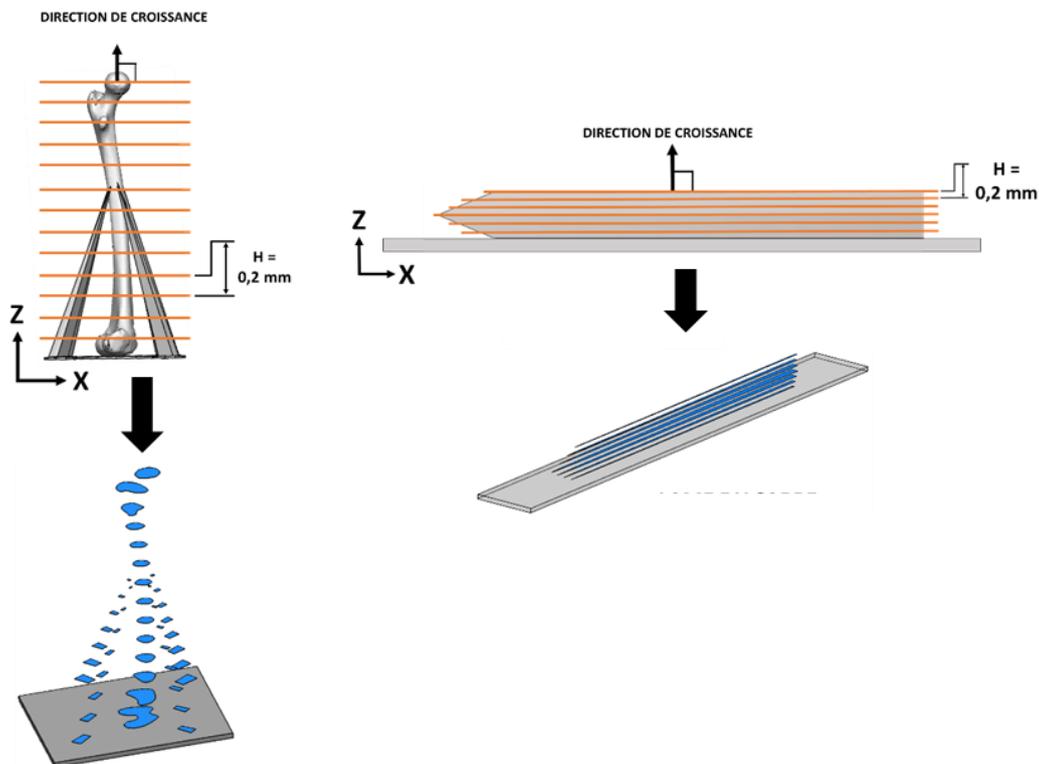


Figure 76 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, sectionnement du fémur et de la lame de sabre

L'hélice s'est vu attribuer une courbe de croissance et un tranchage pour chaque entité en fonction de leurs géométries respectives :

- le moyeu a une courbe de croissance identique à son axe de révolution. Les surfaces de tranchage sont planes, horizontales et distantes de 0,2 mm. La distance entre les surfaces de tranchage a été choisie pour que l'entité ait une résolution forte (Figure 77A) ;
- les pales ont des courbes de croissance perpendiculaires à l'axe du moyeu et passant par le sommet de chacune d'entre elles. Pour des raisons de confidentialité (le composant réalisé à des géométries différentes, ces dernières ne peuvent pas être dévoilées), les surfaces de tranchage ont été définies comme planes et horizontales. Une distance entre les sections de 0,2 mm a été choisie, la résolution des entités devant être forte (Figure 77B).

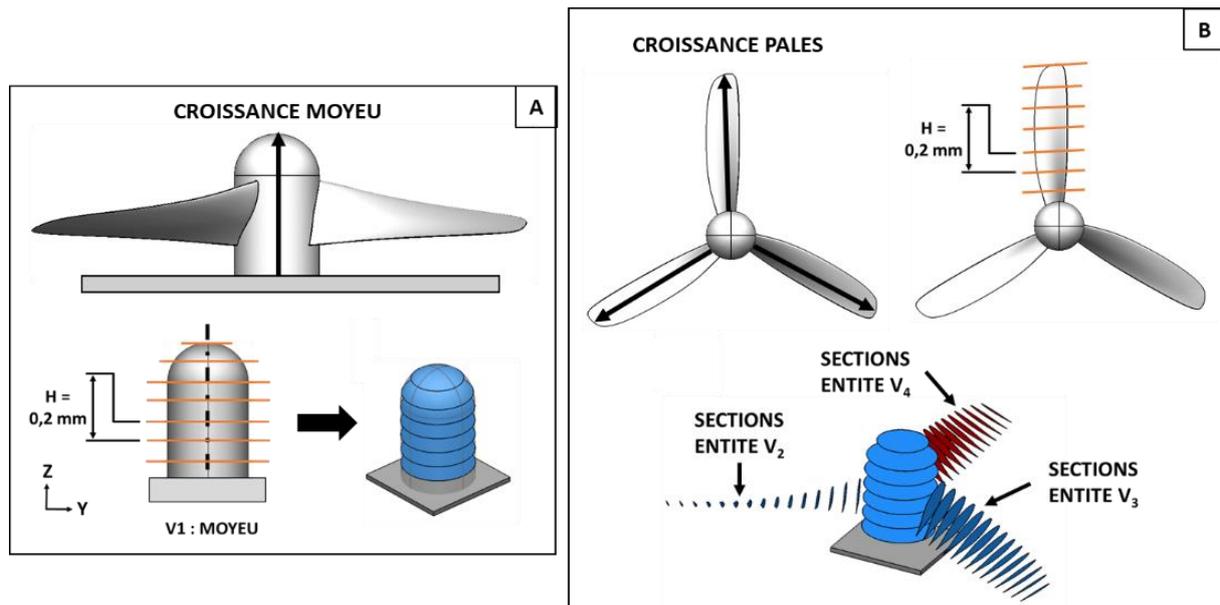


Figure 77 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, sectionnement de l'hélice

En quittant cette étape, les démonstrateurs de grandes dimensions ont été mis en position par rapport au plateau de fabrication et sectionnés suivant les éléments proposés au sein de la méthodologie présentée dans la partie 3.

5. CONCLUSION DU CHAPITRE

Les travaux présentés dans ce chapitre ont porté sur la mise en position et le sectionnement de composants de grandes dimensions réalisés en fabrication additive à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus. C'est la première étape de la méthodologie de préparation à la fabrication.

Dans une première partie, les éléments de contexte ont été introduits : décomposition d'un composant en entités, ratio d'élancement d'un composant, substrats utilisés afin de bâtir un composant ou une entité, sectionnement d'un composant et catégories de supports utilisés dans le cadre de la fabrication additive à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus.

Une seconde partie a développé la problématique de mise en position d'un composant dans le but de minimiser ses surfaces en porte-à-faux par rapport au plateau de fabrication. En effet, si l'on ne prend pas en compte cette problématique lors de la mise en position d'un composant, il pourra en résulter un effondrement sous l'effet de leur poids des cordons de matière déposés en cours de fabrication, lors de la réalisation de surfaces ayant dépassé une valeur critique, spécifique à l'application. Dans le cadre de ces travaux, l'inclinaison maximale des surfaces retenue est celle majoritairement utilisée dans la littérature scientifique qui, par ailleurs, traite la problématique de surface excédant la limite de porte-à-faux par la mise en place de supports. En revanche, ce travail de recherche a préféré choisir une mise en position du composant qui permette de fabriquer sans supports, afin de limiter le recours à des opérations

de parachèvement, de diminuer les temps de cycle de fabrication et le coût global de la fabrication. Lorsque la mise en position du composant sans surface excédant la limite de porte-à-faux s'avère impossible, il a été choisi de répondre à cette problématique par le développement d'un axe de recherche concernant la décomposition du composant en entités. Par ailleurs, des structures de soutien et de maintien du composant pourront également être intégrées à la maquette numérique et retirées du composant suite à sa fabrication.

Une troisième partie a proposé une méthodologie de mise en position et de sectionnement adaptée aux problématiques relatives aux composants de grandes dimensions (Figure 78). Elle propose d'apporter une réponse globale à la mise en position d'un composant de grandes dimensions en prenant en compte la problématique forte de mise en position sans supports. Cette dernière est divisée en plusieurs étapes : mise en position du composant en fonction de la problématique de porte-à-faux précédemment développée, prise en compte des critères du cahier des charges pouvant entraîner la mise en place d'une étape de DFAM, implémentation d'une structure de maintien ou de soutien à la maquette numérique, choix d'une courbe de croissance et d'une distance de tranchage basée sur les géométries du composant, tranchage du composant en fonction de la géométries du substrat et de la courbe de croissance. Des cas d'applications de la méthodologie ont été présentés : composant de révolution tranché suivant des plans horizontaux, composant tranché suivant des plans horizontaux inclinés à 45°, composant tranché suivant sa fibre neutre et composant tranché à partir de surfaces non planaires.

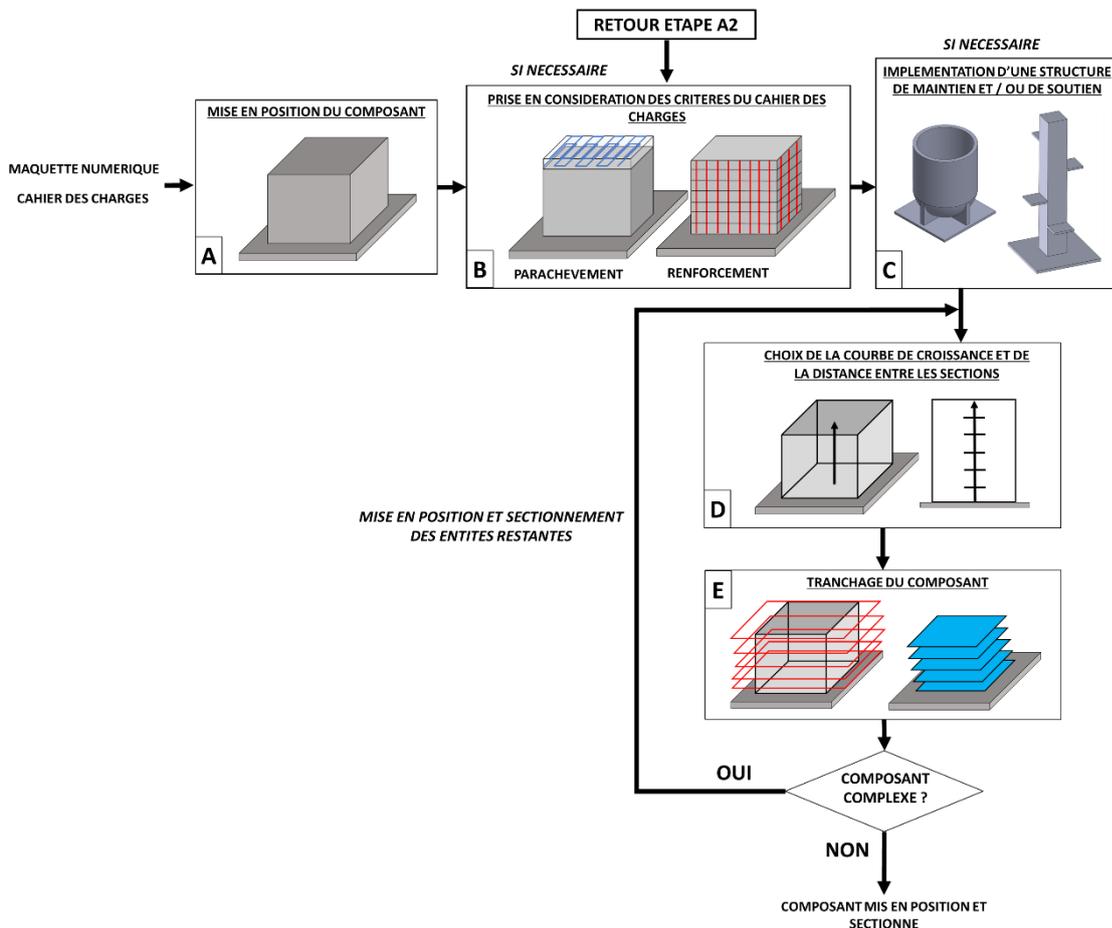


Figure 78 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondus, étapes à réaliser dans le cadre de la mise en position et du sectionnement d'un composant de grandes dimensions

Enfin, dans une quatrième partie, les maquettes numériques des démonstrateurs, chaise, fémur, pale d'éolienne, hyperboloïde, lame de sabre et hélice, se sont vu appliquer la méthodologie présentée dans ce chapitre. La chaise, le fémur, la pale d'éolienne, l'hyperboloïde et la lame de sabre ont pu être mis en position par rapport au plateau de fabrication tout en respectant la limite de porte-à-faux admissible. Le

fémur étant positionné à la verticale par rapport au plateau de fabrication, nous avons attribué à ce dernier une structure de soutien et une structure de maintien qui ont été implémentées à la maquette numérique du composant. La courbe de croissance des composants précédents a été définie suivant la verticale et le tranchage réalisé a été planaire et horizontal. L'hélice a quant à elle été décomposée en quatre entités car ses géométries ne lui permettent pas d'être orientée par rapport au plateau de fabrication sans outrepasser la limite de porte-à-faux admissible :

- le moyeu a été défini comme la première entité en contact avec le plateau de fabrication et sa courbe de croissance comme identique à son axe de révolution ; le tranchage a été réalisé suivant des surfaces planes et horizontales ;
- quant aux pales, elles ont été bâties depuis la surface extérieure du moyeu. Leur courbe de croissance a été définie comme perpendiculaire à l'axe de révolution du moyeu et le tranchage comme planaire et horizontal.

Pour conclure, la méthodologie de mise en position et de tranchage des composants propose d'apporter une réponse à la problématique du positionnement optimal d'un composant en prenant en compte la fabricabilité, la baisse des coûts et des temps de cycle de fabrication. Elle propose également, lorsque cela s'avère nécessaire, de mettre en place des étapes de DFAM adaptées aux composants de grandes dimensions réalisés à partir de matériaux thermoplastiques fondus. Ces étapes permettent de prendre en considération les futures stratégies de fabrication (parachèvement, renforcement) et le besoin d'un soutien ou d'un maintien du composant lors de sa réalisation. Les stratégies de tranchage sont quant à elles implémentées en prenant en considération les contraintes liées au procédé de fabrication. Plusieurs cas d'illustration et la partie portant sur les démonstrateurs de grandes dimensions ont par ailleurs étayé les différentes règles et méthodes relatives à la première étape de la méthodologie.

Le chapitre suivant portera sur la mise en place des stratégies de fabrication, deuxième étape de la méthodologie.

CHAPITRE 3 - MISE EN PLACE DES STRATEGIES DE FABRICATION

Au sein du chapitre précédent a été développée la première étape de la méthodologie qui a pour objectif de mettre en position et de sectionner le composant à fabriquer. A cet effet, une méthodologie de mise en position et de sectionnement a été créée et présentée, approche que nous avons utilisée, en fin de chapitre, pour les cas d'application présentés au sein de chapitre 1, afin de mettre en lumière leur pertinence et leur généralité.

Ce chapitre aborde, quant à lui, les éléments relatifs à la deuxième étape de la méthodologie (étape A2 du diagramme IDEF0, Figure 79) qui consiste à mettre en place les stratégies de fabrication nécessaires au composant à fabriquer. Y seront d'abord développées les notions relatives à la mise en place de stratégies de fabrication : trajectoires de fabrication, type et ordonnancement des stratégies de fabrication. Ensuite seront traitées les problématiques scientifiques en lien avec la fabrication additive de composants de grandes dimensions (mécaniques, thermiques, géométriques, chimiques) et nous chercherons à les résoudre par la mise en place de stratégies de fabrication qui seront présentées puis mises en place dans le cadre de ces travaux de recherche : stratégies volumiques, stratégies de renforcement et stratégies de parachèvement. Des méthodologies de mise en place des stratégies volumiques et de renforcement, incluant des méthodes de simulation par éléments finis, ont été créées et seront explicitées. Après, les cas d'applications mis en position et sectionnés lors de l'étape A1 de la méthodologie se verront appliquer les différentes stratégies de fabrication. Nous terminerons par une conclusion générale sur l'étape A2 de la méthodologie.

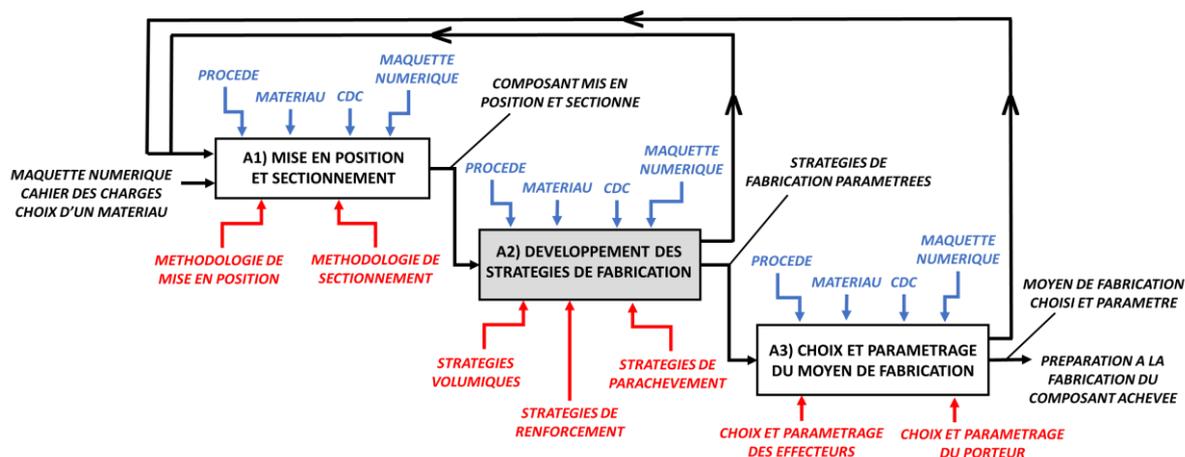


Figure 79 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, diagramme IDEF0

1. NOTIONS RELATIVES AUX STRATEGIES DE FABRICATION

Dans cette partie seront explicitées plusieurs notions développées dans le cadre de la méthodologie de préparation à la fabrication et nécessaires à la compréhension des stratégies de fabrication : trajectoires de fabrication, types de stratégies de fabrication et ordonnancement de ces stratégies.

1.1. TRAJECTOIRES DE FABRICATION

Dans le cadre de la méthodologie de préparation à la fabrication, les trajectoires de fabrication sont divisées en deux catégories : les trajectoires additives et les trajectoires soustractives. Un effecteur additif déposera des cordons de matériaux polymères thermoplastique fondus suivant des trajectoires additives tandis qu'un outil de coupe retirera de la matière suivant des trajectoires soustractives. Les trajectoires de fabrication représentent la matière première des stratégies de fabrication : la mise en place d'une telle stratégie consiste à organiser les trajectoires de fabrication dans l'espace afin de réaliser un composant en fonction de critères à maximiser ou minimiser. Chaque type de stratégie de fabrication sera associé à une et une seule catégorie de trajectoires de fabrication.

Ce travail a choisi de représenter les cordons de matériaux polymères thermoplastiques déposés suivant les trajectoires de fabrication additives par des rectangles de largeur L et d'épaisseur H (avec H égal à la distance entre les sections). Cette représentation géométrique des cordons de matière déposés est conforme à la représentation des cordons de polymère présente au sein de la littérature scientifique [97], [98].

1.2. TYPES DE STRATEGIES DE FABRICATION

Dans le cadre de la méthodologie de préparation à la fabrication, trois types de stratégies de fabrication ont été développés :

- les stratégies volumiques, développées au sein de la partie 3.1 du présent chapitre, ont pour objectif la construction du volume global d'un composant (ou d'une entité). Leurs trajectoires de fabrication sont additives et sont générées sur chacune des sections définies lors de l'étape A1 de la méthodologie (Figure 80A) ;
- les stratégies de renforcement, développées au sein de la partie 3.2 du présent chapitre, ont pour objectif de pallier la problématique d'anisotropie des propriétés mécaniques inhérentes au procédé. Leurs trajectoires de fabrication sont additives et sont définies sur le pourtour extérieur d'un composant (ou d'une entité). Cet axe de recherche, novateur, a été développé dans le cadre de ces travaux de thèse (Figure 80B) ;
- les stratégies de parachèvement, développées au sein de la partie 3.3 du présent chapitre, sont des stratégies soustractives. Elles ont pour but l'obtention de surfaces conformes à des contraintes dimensionnelles, géométriques ou d'état de surface via le retrait d'un surplus de matière volontairement ajouté à la maquette numérique lors de l'étape de mise en position et de sectionnement du composant (Figure 80C).

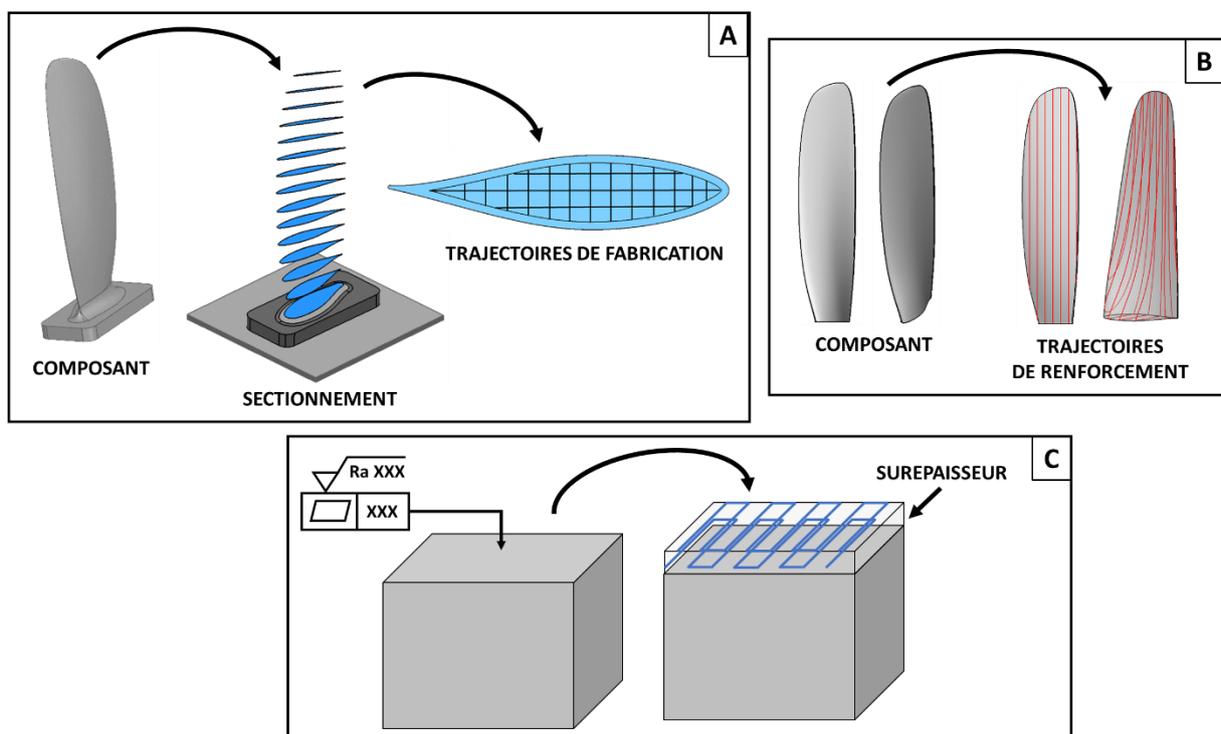


Figure 80 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, différents types de stratégies de fabrication utilisées dans le cadre de la méthodologie

En combinant les trois stratégies de fabrication décrites ci-dessus, il est possible de réaliser des composants qui respectent un cahier des charges mécanique et géométrique. La suite de ce chapitre

présentera les problématiques scientifiques et les solutions développées à travers les méthodologies de mise en place de chacune des stratégies de fabrication pour les résoudre.

1.3. ORDONNANCEMENT DES STRATEGIES DE FABRICATION

L'ordonnancement de la fabrication consiste à organiser le séquençement, dans le temps, des stratégies de fabrication nécessaires à la fabrication d'un composant. Dans le cadre de la fabrication de composants de grandes dimensions à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus, les stratégies volumiques réalisées en premier pourront être suivies par une stratégie de renforcement ou de parachèvement (Figure 81).

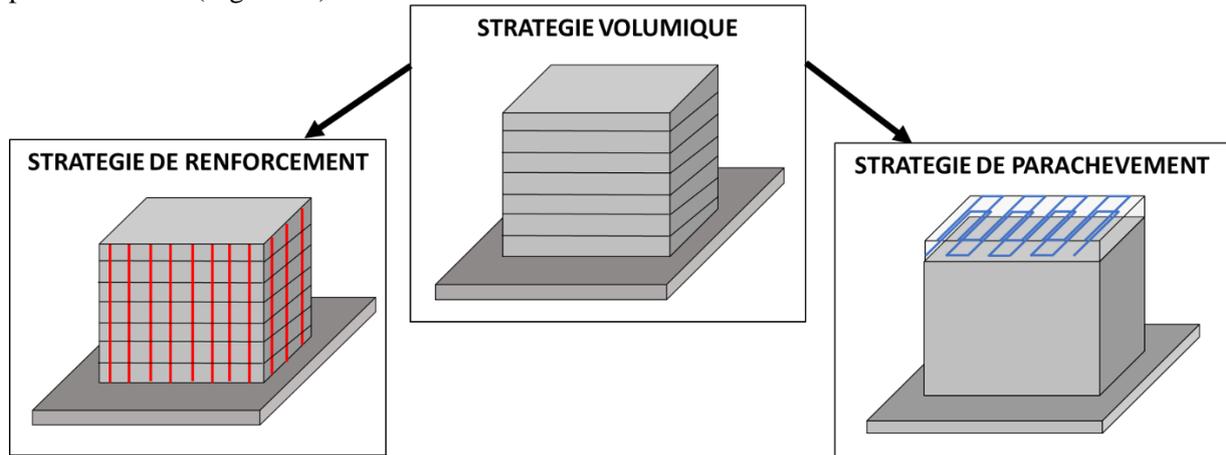


Figure 81 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, ordonnancement des stratégies de fabrication pour un composant simple ou une entité

La fabrication des entités au sein d'un composant complexe est organisée en fonction de la localisation de leurs substrats respectifs : une entité V_i ayant un substrat se trouvant sur l'entité V_{i-1} sera réalisée à la suite de cette dernière (Figure 82A). Lorsque plusieurs entités ont un substrat se trouvant sur la même surface, leur fabrication pourra être réalisée en parallèle (Figure 82B) ou en série (Figure 82C), ce qui sera décidé lors de la prochaine étape de la méthodologie en fonction des problématiques d'accessibilité de l'effecteur additif.

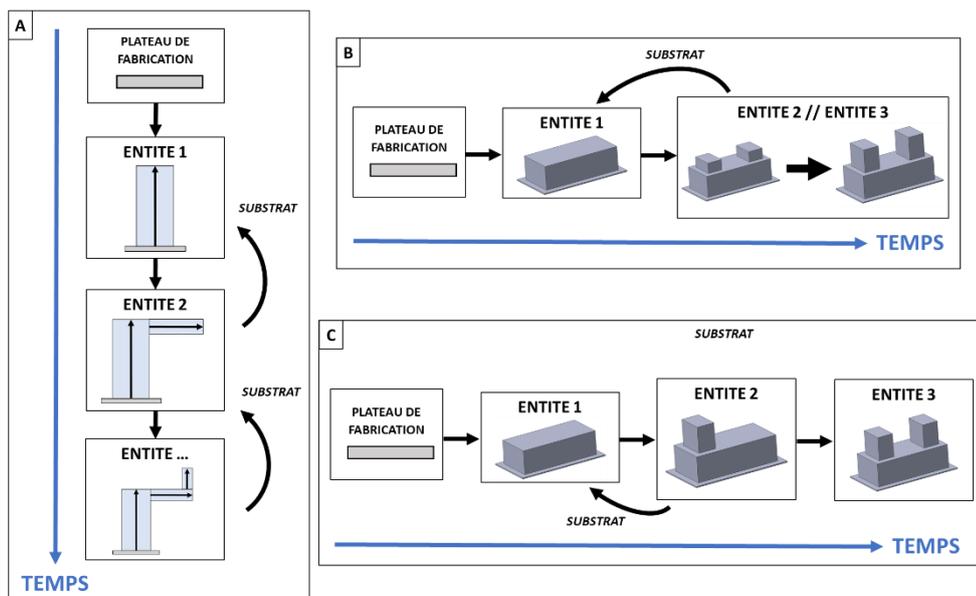


Figure 82 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, ordonnancement de la fabrication des entités d'un composant complexe

1.4. CONCLUSION SUR LES NOTIONS RELATIVES AUX STRATEGIES DE FABRICATION

Dans le cadre de la méthodologie de préparation à la fabrication, les trajectoires de fabrication sont de type additives ou soustractives. Les stratégies de fabrication sont, quant à elles, divisées en trois catégories : stratégies volumiques, qui ont pour objectif de réaliser le volume global du composant à fabriquer et utilisent des trajectoires additives; stratégies de renforcement, qui visent à pallier la problématique d'anisotropie des propriétés mécaniques inhérentes au procédé et utilisent des trajectoires additives; stratégies de parachèvement, qui cherchent à obtenir des surfaces conformes à des contraintes dimensionnelles, géométriques ou d'état de surface et utilisent des trajectoires soustractives.

De plus, les stratégies de fabrication sont ordonnancées les unes par rapport aux autres. Dans le cadre de la fabrication d'un composant ou d'une entité, les stratégies volumiques sont réalisées en premier et peuvent être suivies d'une stratégie de renforcement ou de parachèvement. Dans le cadre de la fabrication d'un composant complexe, les entités peuvent être réalisées en série ou en parallèle, en fonction de la localisation de leur substrats respectifs.

2. PROBLEMATIQUES SCIENTIFIQUES RELATIVES AUX COMPOSANTS DE GRANDES DIMENSIONS ET STRATEGIES DE FABRICATION

Dans cette partie seront développées les différentes problématiques scientifiques en lien avec la fabrication de composants de grandes dimensions à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus (problématiques mécaniques, géométriques, thermiques et chimiques) et leur résolution par la mise en place de stratégies de fabrication adaptées.

2.1. PROBLEMATIQUES MECANIQUES

2.1.1. ANISOTROPIE DES PROPRIETES MECANIQUES

L'anisotropie des propriétés mécaniques est le talon d'Achille des composants réalisés de manière additive à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus : elle est inévitable et intrinsèquement liée au procédé [35], [99]. C'est l'empilement des couches de matière les unes sur les autres, combiné à la nature chimique du matériau utilisé, qui lui donne naissance. L'adhésion d'une couche de matière N sur une couche de matière N-1 à l'instant t pendant un cycle de fabrication est obtenue via le déplacement des chaînes macromoléculaires de la couche N vers la couche N-1 et réciproquement (enchevêtrement macromoléculaire) [100] : à l'instant de la mise en contact d'un cordon de polymère thermoplastique de la couche N chauffé jusqu'à sa température d'extrusion sur la couche N-1 (Figure 83A), les macromolécules se trouvent respectivement chacune de leur côté, orientées dans le sens du dépôt. Instantanément, elles se mettent en mouvement et se déplacent de part et d'autre sous l'effet de la chaleur (Figure 83B). La complétude du phénomène d'adhésion est évaluée suivant la quantité d'échange de part et d'autre des cordons.

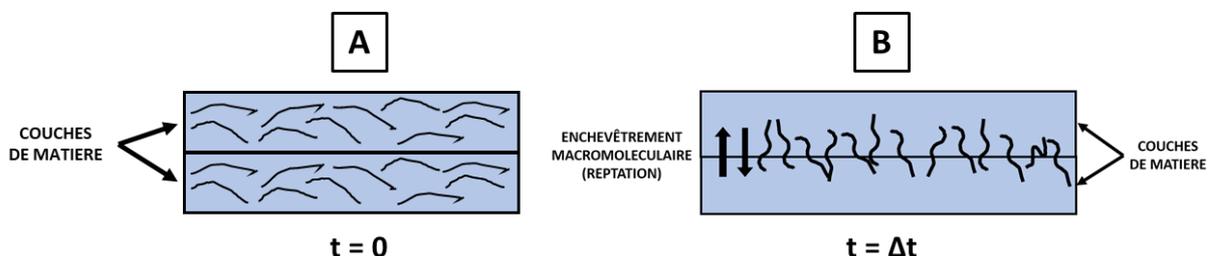


Figure 83 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, enchevêtrement macromoléculaire entre deux cordons de matériau polymère thermoplastique

Dans le cas théorique du dépôt de deux très faibles quantités de matériau polymère thermoplastique de même nature chimique, la complétude du phénomène d'adhésion peut être obtenue moyennant un temps très long et une température matière maintenue égale à la température de fusion [97]. Ce faisant, les deux éléments au départ séparés ne forment plus qu'un seul et même élément homogène ayant des propriétés mécaniques égales aux propriétés mécaniques des éléments initiaux pris séparément. Il n'y a

pas de problématique d'anisotropie des propriétés mécaniques à l'interface entre les deux éléments car cette dernière n'existe plus [101]. En pratique, ces conditions de laboratoire ne peuvent pas être reproduites lors de la fabrication additive d'un composant de grandes dimensions et la complétude du phénomène d'adhésion entre les couches de matière d'une entité élémentaire ne sera pas obtenue [89]. A la suite d'un cycle de fabrication, les couches de matière déposées ne forment pas un seul et même bloc homogène et isotrope mais un ensemble de couches liées entre elles par une force d'adhésion aux propriétés mécaniques limitées, en fonction de l'histoire thermique des cordons déposés. C'est cela qui donne naissance à la problématique d'anisotropie des propriétés mécaniques : dans le cas d'un composant sollicité en traction suivant une direction perpendiculaire à ses sections (Figure 84), ce dernier aura une résistance mécanique basée sur la force d'adhésion entre les couches et sa rupture mécanique sera prématurée. La littérature scientifique s'accorde sur une baisse de 40% des propriétés mécaniques dans le cas d'une sollicitation en traction par rapport à la résistance mécanique d'un matériau brut sollicité le long de sa direction de dépôt [102].

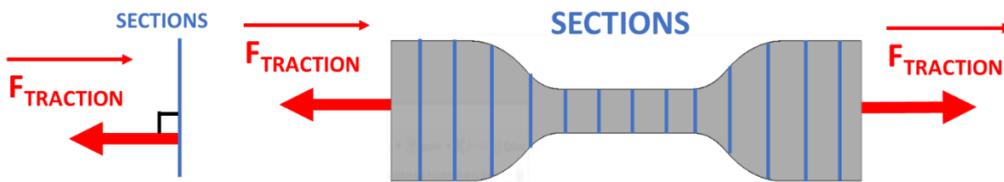


Figure 84 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, éprouvette sollicitée en traction suivant une direction perpendiculaire à ses sections

On peut généraliser cette réflexion à l'ensemble des sollicitations mécaniques pouvant être appliquées sur un composant : flexion, compression, torsion, cisaillement. Lorsque la résistance mécanique d'un composant soumis à une ou plusieurs de ces sollicitations est basée sur les propriétés de l'interface entre les couches de matière déposées, la résistance maximale est moindre et la rupture prématurée.

Pour conclure, l'anisotropie des propriétés mécaniques d'un composant réalisé à partir d'un procédé de fabrication additive à base de matériaux polymères thermoplastiques fondus est inévitable et inhérente au procédé car liée aux faiblesses mécaniques des interfaces entre les couches de matière. Ce travail de recherches propose de prendre en considération la direction des sollicitations mécaniques par rapport à l'orientation des couches de matière dans le cadre de la mise en place des stratégies de fabrication. Il propose de plus de dépasser la problématique d'anisotropie par la mise en place de stratégies de renforcement, présentées au sein de la partie 3.2.

2.2.2. CLASSIFICATION DES SOLLICITATIONS MECANIQUES

On peut classer en deux catégories les trois composantes d'une sollicitation mécanique appliquée sur un composant pendant son service : sollicitation suivant une direction mécaniquement forte ou mécaniquement faible vis-à-vis de la stratégie de sectionnement précédemment déterminée.

On considère qu'une composante est suivant une direction mécaniquement faible lorsqu'elle sollicite l'interface mécanique entre plusieurs couches de matière en traction ou cisaillement : c'est le cas lors d'un effort de traction perpendiculaire aux sections (Figure 85A), lors d'un effort de torsion ayant un axe de torsion perpendiculaire aux plans formés par les sections (Figure 85B) et lors d'un effort de flexion lorsque la direction de sollicitation mécanique est parallèle aux sections (Figure 85C). Dans ce cas de figure, la rupture mécanique est prématurée car la force d'adhésion entre les couches de matière est faible. La rupture sera atteinte lors la force appliquée par une des composantes aura dépassé la valeur maximale de résistance inter couches en traction ou en cisaillement. C'est dans l'objectif de répondre à cette problématique qu'ont été créées et développées les stratégies de renforcement, traitées dans la partie 3.2 du présent chapitre. L'ensemble des composantes suivant des directions considérées comme faibles, engendrées par les sollicitations appliquées sur le composant lors de son service, serviront de données d'entrée à l'étape de paramétrage des stratégies de renforcement si une telle stratégie est nécessaire.

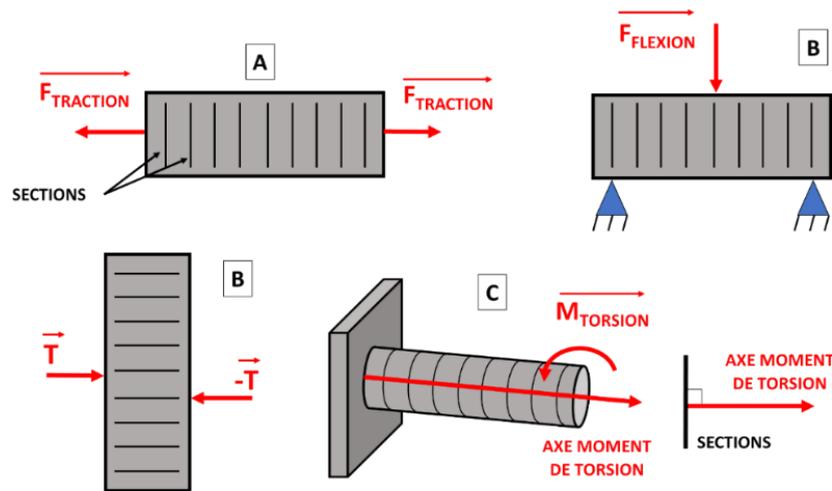


Figure 85 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, directions de sollicitation mécaniquement faible vis-à-vis de la stratégie de sectionnement

On considère qu'une composante est suivant une direction mécaniquement forte lorsqu'elle sollicite les couches de matière du composant (ou de l'entité), lorsque la direction de sollicitation est contenue dans les plans formés par les sections dans le cas d'un effort de traction (Figure 86A), lorsque la direction de sollicitation est normale aux plans formés par les sections dans le cas d'effort de flexion ou cisaillement (Figure 86B) ou encore lorsque l'axe du moment de torsion est contenu dans les plans formés par les sections dans le cas d'une sollicitation en torsion (Figure 86C). Dans les cas de figures précédemment décrits, les propriétés mécaniques du composant (ou de l'entité) sont basées sur les propriétés intrinsèques aux couches de matière qui seront paramétrées dans le cadre des stratégies volumiques, développées dans la partie 3.1. L'ensemble des composantes suivant des directions considérées comme fortes, engendrées par les sollicitations appliquées sur le composant lors de son service serviront de données d'entrée à l'étape de paramétrage des stratégies volumiques dans le cas où une stratégie de renforcement est nécessaire.

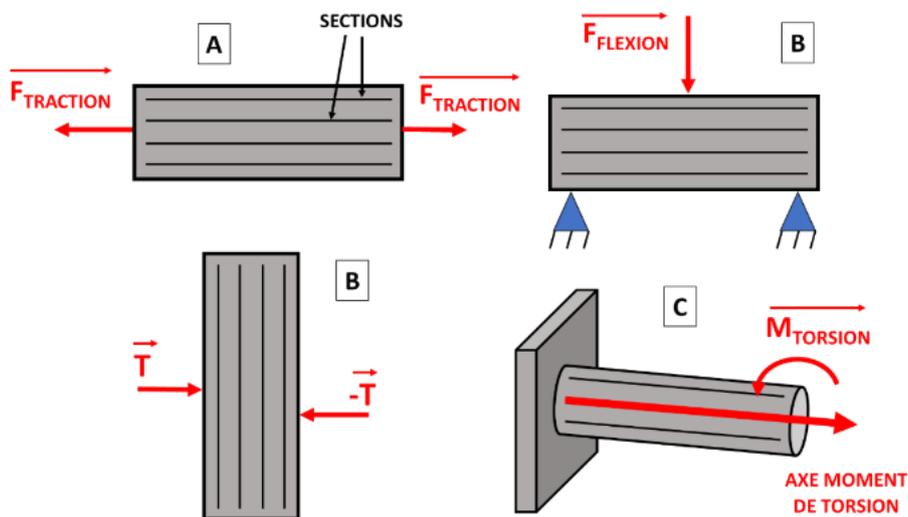


Figure 86 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, directions de sollicitation mécaniquement forte vis-à-vis de la stratégie de sectionnement

2.3. PROBLEMATIQUES GEOMETRIQUES, DIMENSIONNELLES ET D'ETAT DE SURFACE

Dans le cadre de la fabrication de composants de grandes dimensions, certaines surfaces sont sujettes à des tolérances dimensionnelles, géométriques ou d'état de surface : surfaces de contact (transmission effort, guidage, ...), surfaces de contact non intentionnel (esthétique, déviation d'un fluide, ...).

Les stratégies volumiques peuvent se révéler incapables de respecter les contraintes dimensionnelles, géométriques et d'état de surface auxquelles peuvent être soumises les surfaces d'un composant de grandes dimensions lorsque ces dernières sont trop sévères :

- l'état de surface et les tolérances géométriques obtenues après la réalisation d'une stratégie volumique sont limités par l'effet escalier présent au niveau des surfaces concaves, convexes ou inclinées [103]. L'impact de ce défaut est proportionnel à la distance entre les sections H et au décalage entre le centre des cordons ΔC (Figure 87A). L'importance de l'effet escalier est proportionnel à sa résolution : pour le même composant, celui réalisé avec une distance entre les sections plus faible aura une déviation entre les surfaces de sa maquette numérique et les cordons de matière réellement plus faible (Figure 87B) ;

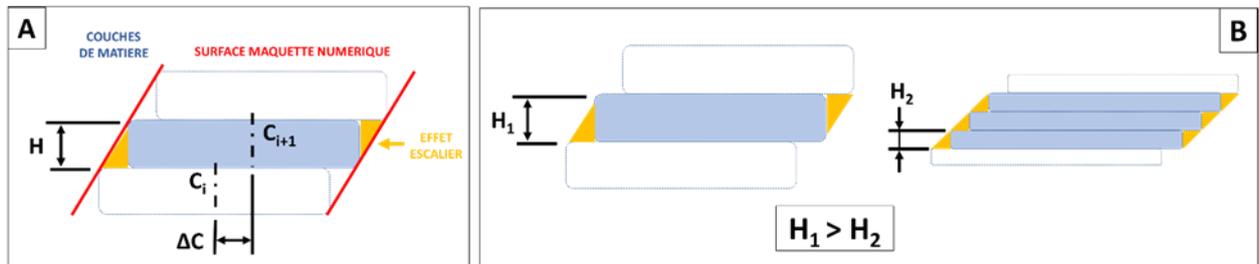


Figure 87 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, effet escalier

- les tolérances dimensionnelles obtenues après la réalisation d'une stratégie volumique sont limitées par les tolérances spécifiques aux procédés additifs à base de polymères thermoplastiques fondus, qui dépendent du type de volumes réalisés [104]–[106]. Les volumes extérieurs auront tendance à être supérieurs aux cotes nominales tandis que les volumes intérieurs auront tendance à être inférieurs aux cotes nominales.

Lorsque le procédé de fabrication n'est pas capable de respecter les tolérances dimensionnelles, géométriques ou d'état de surface auxquels un composant est assujéti, une stratégie de parachèvement sera mise en place et réalisée.

2.4. PROBLEMATIQUES THERMIQUES ET STRATEGIES DE FABRICATION

2.4.1. GAUCHISSEMENT ET DECOLLEMENT

La problématique de gauchissement d'un composant, induite par la présence de gradients thermiques au cours du cycle de fabrication et provoquant l'apparition de contraintes résiduelles, a été développée au sein du précédent chapitre (partie 1.8) (Figure 88A). Elle a pour conséquence l'apparition d'un décollement du composant du plateau de fabrication (Figure 88B).

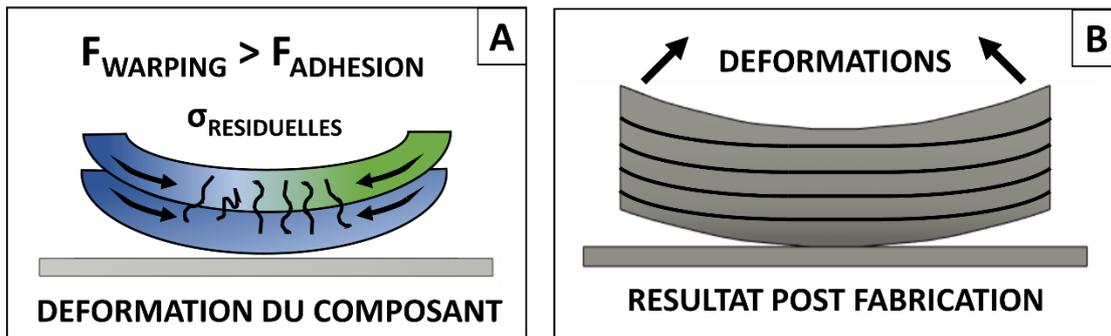


Figure 88 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, problématique de décollement entre le composant et le plateau de fabrication

Cette problématique thermique sera prise en compte dans le cadre de la mise en place d'une stratégie volumique, lors de la génération des trajectoires de la couche en contact avec le plateau de fabrication (partie 3.1) : une règle permettant de prendre en compte les géométries du composant et l'apparition de contraintes résiduelle sera énoncée.

2.4.2. DELAMINATION ET EFFONDREMENT

La délamination et l'effondrement d'un composant (ou d'une entité) en cours de réalisation sont deux problématiques dues à la mauvaise gestion des températures en cours de fabrication :

- la délamination entre deux couches de matières superposées N (couche en cours de dépôt) et N-1 (couche recevant la matière déposée) est causée par un niveau d'énergie thermique trop faible entre ces dernières [107] ;
- l'effondrement d'un composant sous son propre poids est dû à un excès d'énergie thermique au cours du cycle de fabrication couplé à un temps passé par couche faible, empêchant la matière déposée de redescendre en dessous de sa température de solidification [108].

Le composant ou l'entité en cours de fabrication doivent être réalisés avec une température matière suffisamment élevée au niveau du dépôt, permettant l'enchevêtrement macromoléculaire et une température matière globale contrôlée afin d'éviter l'effondrement du composant sous son poids propre. Ces problématiques peuvent être anticipées lors de la préparation à la fabrication d'un composant via le développement d'un modèle thermomécanique qui permette de prédire le gauchissement, la délamination entre les couches et l'effondrement d'un composant en cours de fabrication [107]. Toutefois, elles devront être gérées par le biais de stratégies de contrôle thermique en temps réel. Au sein de la littérature scientifique, plusieurs travaux relatent cet axe de recherche :

- implémentation lorsque nécessaire entre les couches de temporisations permettant à la chaleur présente en excès au sein du composant de s'évacuer (Figure 89A) [109] ;
- mise en place d'un apport de chaleur externe en cours de fabrication permettant d'augmenter localement la température de la couche recevant de la matière lorsque nécessaire (Figure 89B) : par rayonnement infrarouge [110], par rayonnement laser [111], [112], par l'envoi de radiations ionisantes [113], par récupération de la chaleur générée par la buse d'injection [114], par l'envoi d'air chaud en amont et en aval du filament déposé [115], par chauffage du plateau de fabrication [110] ;

- mise en place d'un refroidissement externe ayant pour objectif de refroidir la matière précédemment déposée lorsque nécessaire, afin d'extraire une certaine quantité de chaleur du composant en cours de fabrication (Figure 89C) [116] ;

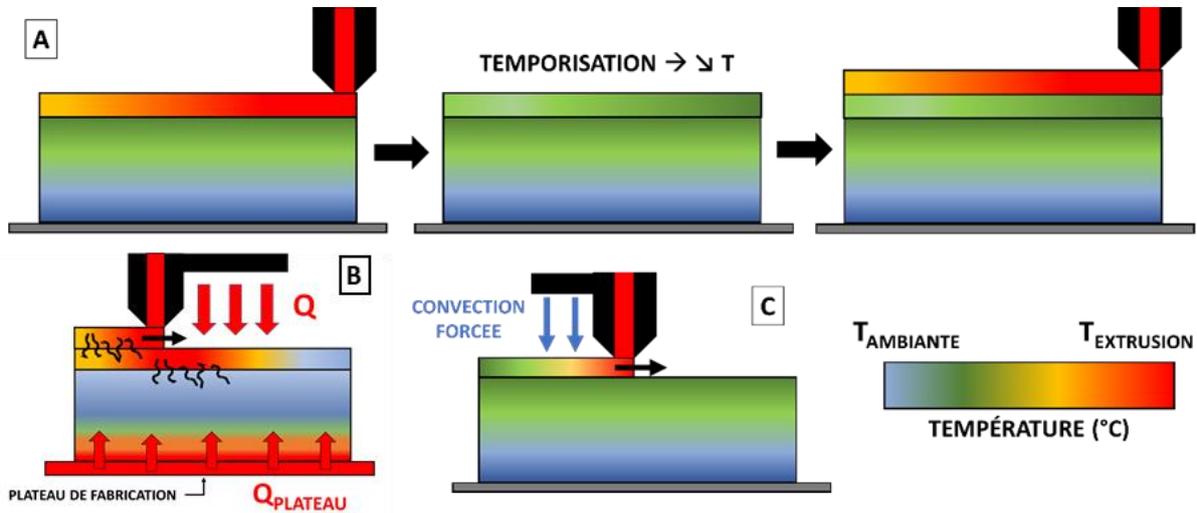


Figure 89 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, mise en place d'un refroidissement via une convection forcée afin d'évacuer une partie de la chaleur contenue dans le matériau précédemment déposé

- analyse de la température matière en cours de fabrication permettant de déclencher les temporisations, l'apport de chaleur ou le refroidissement externe [108][117].

Le contrôle thermique en temps réel est à mettre en place lors du cycle de fabrication et sort par conséquent du cadre de cette méthodologie. Il permet la réalisation de composants sans délamination et sans effondrement.

2.5 PROBLEMATIQUES CHIMIQUES

Les problématiques chimiques qui doivent être prises en compte lors de la préparation à la fabrication d'un composant sont liées à la nature du matériau utilisé afin de réaliser la stratégie de renforcement. Une stratégie de renforcement étant réalisée à partir d'un substrat localisé sur les surfaces extérieures d'un composant (ou d'une entité), le matériau choisi doit être chimiquement compatible avec le matériau utilisé dans le cadre de la stratégie volumique sur laquelle est réalisé le renforcement. La compatibilité entre deux matériaux thermoplastiques signifie que l'interpénétration macromoléculaire et donc l'adhésion entre ces derniers sont possibles [97] (Figure 90).

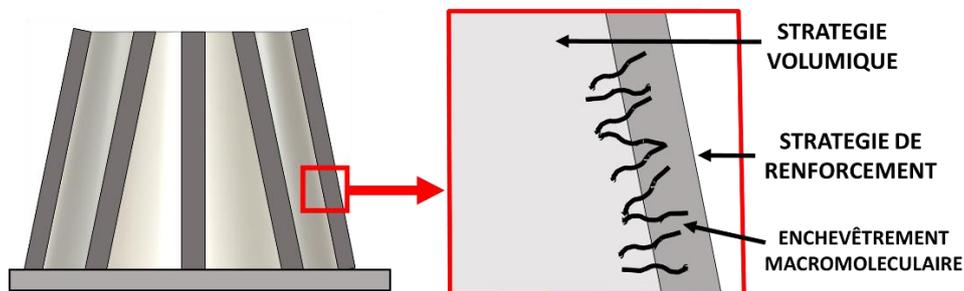


Figure 90 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, problématiques chimiques

Trois cas de figures sont possibles [118] :

- lors de l'assemblage de matériaux polymères thermoplastiques issus de la même famille, la compatibilité chimique est assurée ;

- lors de l'assemblage de matériaux polymères thermoplastiques de la même famille avec des renforts de part et d'autre ou d'un seul côté, la compatibilité chimique est également assurée. Cependant, la quantité de matrice aux interfaces doit être suffisamment importante afin de permettre l'enchevêtrement macromoléculaire. Lorsqu'une telle proportion est faible, l'adhésion de la couche de renforcement sur la paroi recouverte est limitée. Nous aborderons cette problématique dans la suite de cette partie, dans le cadre des travaux portant sur les essais menés sur un matériau prototype renforcé de fibres continues ;
- l'assemblage de différents matériaux thermoplastiques dépend de leur nature chimique. De manière générale, les matériaux thermoplastiques cristallins de familles différentes ne sont pas compatibles entre eux tandis que les matériaux amorphes de familles différentes le sont. Les matériaux thermoplastiques amorphes ne sont pas compatibles avec les matériaux thermoplastiques cristallins hormis quelques exceptions (mélanges de polymères). Les données concernant la compatibilité des différentes familles de matériaux thermoplastiques sont disponibles dans la littérature scientifique.

Le choix d'un matériau chimiquement compatible avec son substrat sera pris en compte lors de la mise en place des stratégies de renforcement (partie 3.2).

2.6. CONCLUSION SUR LES PROBLEMATIQUES RELATIVES AUX STRATEGIES DE FABRICATION

Les sollicitations mécaniques auxquelles est soumis un composant lors de son service ont été divisées en deux catégories :

- sollicitations suivant une direction considérée comme mécaniquement forte, sollicitant les couches de matière déposées. La tenue mécanique du composant sera prise en compte lors de la mise en place des stratégies volumiques ;
- sollicitations suivant une direction considérée comme mécaniquement faible, sollicitant l'interface entre les couches de matière déposées. Dans ce cas de figure, le composant fait face à une rupture mécanique prématurée car la résistance mécanique réside dans les propriétés des interfaces. Les sollicitations suivant la direction mécaniquement faible seront prises en compte lors de la mise en place des stratégies de renforcement.

Un composant peut également posséder des surfaces de contact intentionnelles et non intentionnelles contraintes par des tolérances géométriques, dimensionnelles ou d'état de surface. Lorsque les stratégies volumiques ne permettent pas d'assurer leur réalisation, une surépaisseur devra être réalisée à leur niveau. Ces dernières feront ensuite l'objet d'une stratégie de parachèvement.

Les problématiques thermiques sont liées à la mise en place des stratégies volumiques et divisées en deux catégories : problématiques de décollement entre le composant et le plateau de fabrication, prise en charge lors de la génération des trajectoires de la première couche de matière déposée et problématiques d'effondrement et de délamination, prises en compte par l'implémentation d'un contrôle de la température et de la quantité de chaleur au sein du composant en cours de fabrication. Cet axe de recherche n'est pas inclus dans la méthodologie de préparation à la fabrication.

Les problématiques chimiques sont, quant à elles, en lien avec la mise en place des stratégies de renforcement. Les matériaux utilisés lors de ces dernières devront être chimiquement compatibles avec leurs substrats, ces substrats étant les parois extérieures d'un composant (ou d'une entité) réalisé à partir d'une stratégie volumique. La compatibilité entre deux matériaux polymères thermoplastiques permet l'enchevêtrement macromoléculaire et donc la possibilité d'adhésion entre deux couches de matière successives.

Dans la suite de ce chapitre, les différentes stratégies de fabrication seront tour à tour développées : stratégies volumiques, stratégies de renforcement, stratégies de parachèvement. Pour finir, les cas d'applications mis en position et sectionnés lors du chapitre 2 se verront appliquer les différentes stratégies de fabrication précédemment présentées.

3. MISE EN PLACE DES STRATEGIES DE FABRICATION

Cette partie développera la mise en place des stratégies de fabrication basée sur la résolution des problématiques scientifiques : stratégies volumiques (partie 3.1), stratégies de renforcement (partie 3.2), stratégies de parachèvement (partie 3.3). Pour chacune des stratégies de fabrication, une étude de la littérature scientifique sera réalisée et un positionnement scientifique choisi. Des méthodologies permettant la mise en place des stratégies volumiques et de renforcement, développées dans le cadre de ces travaux de recherche, seront également présentées. Pour finir, une synthèse sur les éléments présentés dans cette partie sera réalisée.

3.1. MISE EN PLACE DES STRATEGIES VOLUMIQUES

Cette partie réalisera d'abord une étude et une analyse de la littérature scientifique concernant les stratégies volumiques. Puis seront présentés le positionnement scientifique choisi dans le cadre de ces travaux de thèse et, par la suite, une méthodologie générique permettant la mise en place de stratégies volumiques. Pour finir, une synthèse sur les éléments concernant les stratégies volumiques sera faite.

3.1.1. ETUDE DE LA LITTERATURE ET POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE

Au sein de la littérature scientifique, la mise en place de stratégies volumiques est dans la majorité des cas associée à la réalisation d'éprouvettes sollicitées en traction ou en flexion [119]–[122]. Dans ces travaux, il est question d'optimisation des propriétés mécaniques, en fonction de la densité de matière déposée et de la stratégie de remplissage utilisée, ou encore de minimisation du temps et des coûts engendrés par la fabrication. L'analyse des résultats présents au sein de la littérature scientifique permet de faire ressortir les éléments suivants :

- les composants réalisés sont de faibles dimensions (ordre de grandeur des éprouvettes normalisées) ;
- il n'y a pas de consensus concernant un motif géométrique de remplissage permettant d'obtenir des performances mécaniques supérieures, les différentes sources utilisant différents motifs pour arriver à leurs fins (carrés, rectangles, triangles, pentagones, hexagones, ... [120]) ;
- les propriétés mécaniques des éprouvettes réalisées sont déterminées de manière empirique. Il n'est pas fait mention de l'utilisation de la simulation numérique afin de paramétrer les stratégies volumiques ;
- les stratégies volumiques n'incluent pas la réalisation de futures stratégies de parachèvement, nécessitant le dépôt d'une surépaisseur de matière ;
- les problématiques de déformations du composant par rapport au plateau de fabrication ne sont pas prises en compte lors de la mise en place des stratégies volumiques.

Ce travail de recherche a choisi de développer une méthodologie générique qui permette la mise en place des stratégies volumiques dédiées à la réalisation de composants de grandes dimensions et prenne en compte les problématiques thermiques provoquant le décollement entre le composant et le plateau de fabrication, l'implémentation de stratégies de parachèvement et la mise en place d'une étape de paramétrage et de validation par la simulation numérique afin de valider la tenue mécanique suivant la direction considérée comme mécaniquement forte.

3.1.2. METHODOLOGIE DE MISE EN PLACE D'UNE STRATEGIE VOLUMIQUE

Dans la suite de cette partie, les étapes nécessaires à la mise en place des stratégies volumiques seront présentées de manière chronologique, de la première à la dernière section du composant (ou de l'entité) à réaliser (Figure 91). A chaque étape, ont été développées une ou plusieurs règles permettant de prendre en charge les problématiques précédemment présentées.

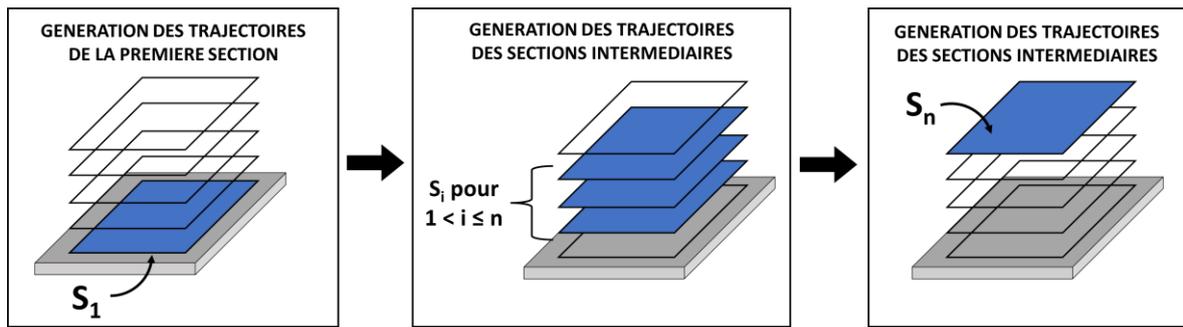


Figure 91 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, méthodologie de mise en place des stratégies volumiques

A. GENERATION DES TRAJECTOIRES DE LA PREMIERE SECTION

Les trajectoires de la première section S_1 permettent de réaliser la couche de matière en contact avec le plateau de fabrication, dans le cas d'un composant simple ou de l'entité V_1 d'un composant complexe (Figure 92A) ou la couche de matière en contact avec un substrat localisé sur une entité précédemment réalisée (entité V_i avec $i > 1$, Figure 92B).

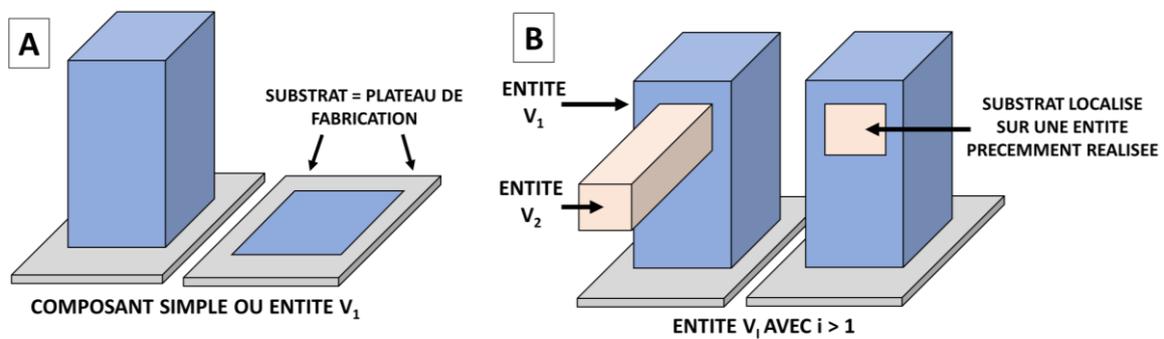


Figure 92 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, différents types de substrats

Les trajectoires de fabrication relatives à la première section seront générées de manière à ce que les cordons de matière déposés soient en contact les uns avec les autres (Figure 93). Cela permettra de fermer le composant dans le cas de la réalisation d'un composant simple (ou de la première entité d'un composant complexe) et de maximiser la quantité de matière déposée à la jonction entre deux entités, dans le cas de la réalisation d'un composant complexe (entité V_i avec $i > 1$) afin d'augmenter l'enchevêtrement macromoléculaire et de renforcer la jonction entre deux entités. L'orientation des trajectoires liées à la première section est arbitraire.

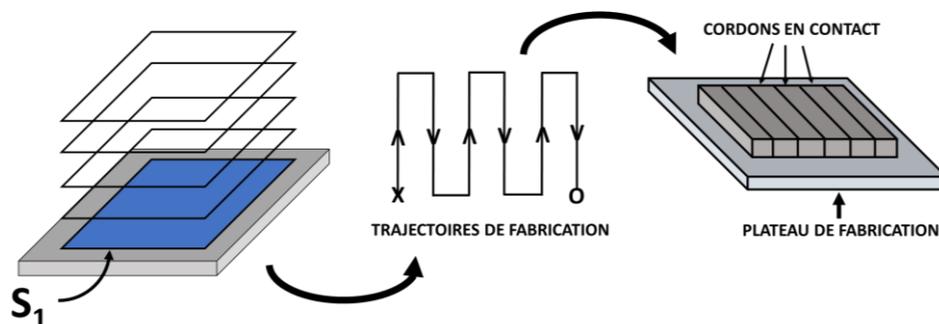


Figure 93 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, trajectoires générées sur la première section

Dans le cas d'un composant simple ou de la première entité d'un composant complexe, le matériau déposé suivant la première section sera en contact avec le plateau de fabrication : la problématique de gauchissement et de décollement, présentée au sein de la partie 2.4.1, devra alors être prise en compte dans le cadre de la génération des trajectoires de fabrication.

Les moments créés par le gradient thermique au sein du matériau polymère thermoplastique déposé créent des concentrations de contraintes au niveau des trajectoires formant des angles vifs, chaque cordon déposé ayant tendance à se contracter dans le sens de sa longueur (Figure 94A). Plus l'angle est vif, plus la concentration de contraintes est importante. La superposition de couches ayant des angles vifs, les unes sur les autres, provoque à terme le gauchissement du composant. Ainsi, lorsque le pourtour extérieur de la première section d'un composant (ou de la première entité d'un composant complexe) présentera des angles vifs, des trajectoires concentriques ne contenant pas d'angles vifs seront implémentées, ces dernières n'étant que peu sujettes à la problématique de décollement (Figure 94B). De plus, il n'y aura pas de couche de matière déposée au-dessus des trajectoires concentriques pendant le cycle de fabrication : les forces de rétraction liées à l'empilement de couches successives ne s'accumuleront pas. Cela permet également d'augmenter la surface de contact et donc d'augmenter l'adhésion avec le plateau de fabrication. En procédant ainsi, les effets du gauchissement n'auront pas d'impact sur le composant.

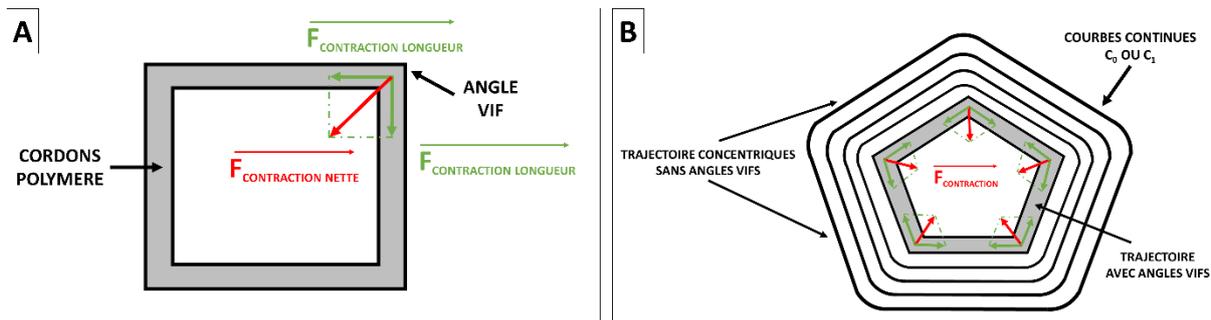


Figure 94 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, force de contraction au sein d'un cordon de polymère sous l'effet du moment créé par un gradient thermique

La problématique de déformation est mise en évidence par la réalisation d'un composant rectangulaire, sujet à la contraction des cordons de matière suivant leurs directions de dépôt (Figure 95A). Sans la mise en place de trajectoires concentriques, l'apparition de contraintes résiduelles lors du refroidissement déforme le composant et oblige à arrêter prématurément le cycle de fabrication (Figure 95B). Avec l'implémentation de trajectoires concentriques sur le pourtour extérieur de la première section du composant, les déformations sont totalement absentes. Les cordons déposés sur le pourtour du composant pallient la problématique créée par le gradient thermique au sein du matériau polymère thermoplastique déposé (Figure 95C).

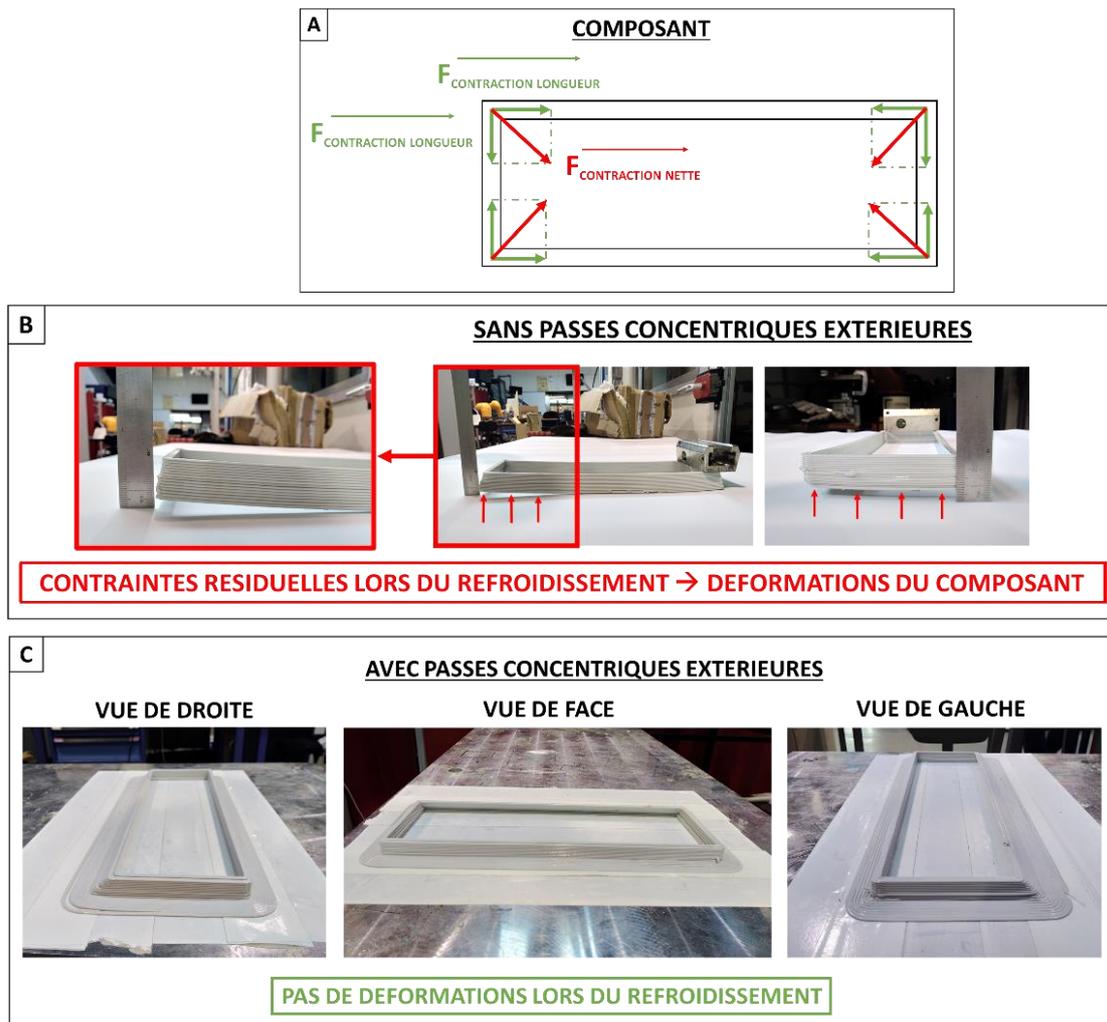


Figure 95 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, mise en évidence et résolution de la problématique de déformations lors du refroidissement

A l'opposé, un composant de grandes dimensions réalisé à partir de sections sur lesquelles s'empilent des trajectoires circulaires ne sera pas sujet à la problématique de déformation sous l'effet des gradients thermiques. Cet état de fait a été mis en évidence dans le cadre de la réalisation d'un composant de révolution, d'un diamètre égal à 460 mm et d'une hauteur égale à 500 mm (Figure 96A) tranché par des plans parallèles et horizontaux sur lesquels seules des trajectoires de contour ont été générées (Figure 96B). Il apparaît clairement, après analyse du résultat post fabrication mais également après la reconstruction numérique du composant que la problématique de déformations a été absente du processus de fabrication (Figure 96C).

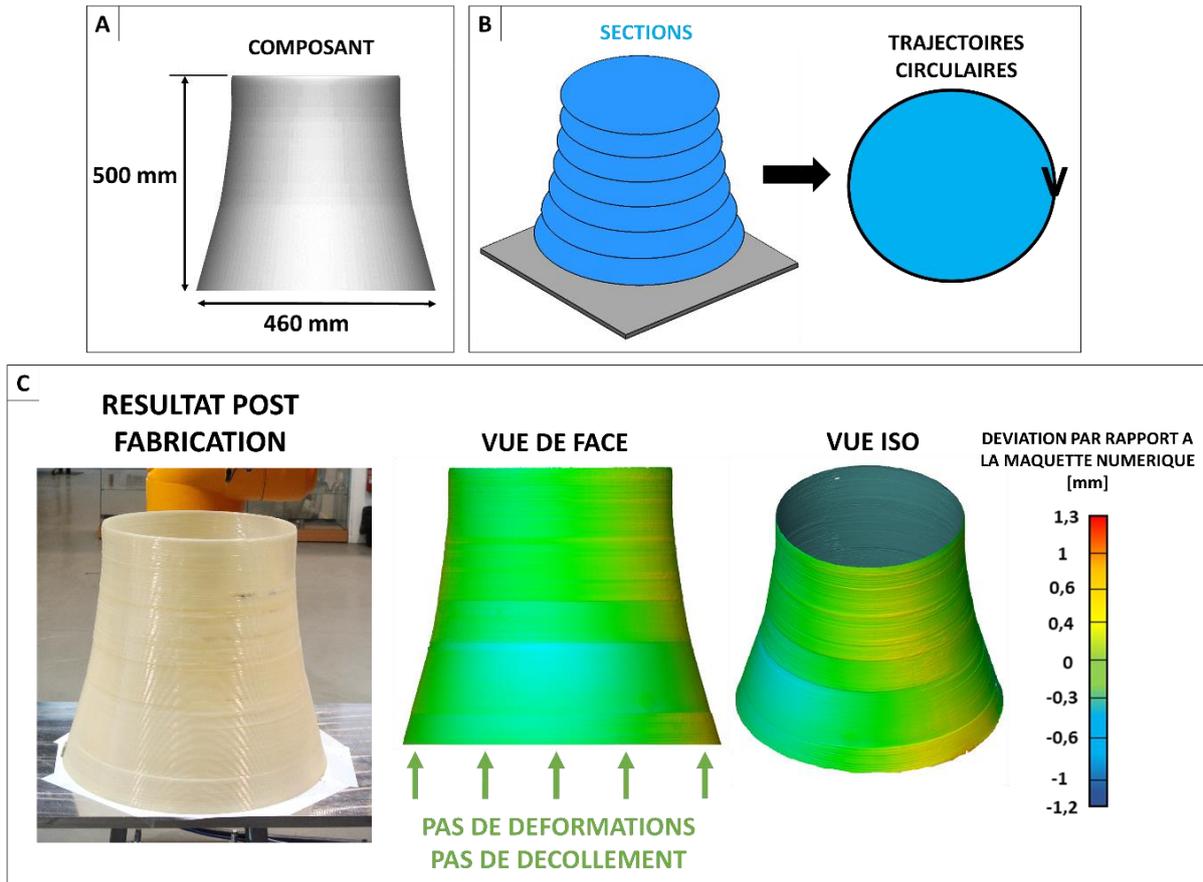


Figure 96 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, réalisation d'un composant non sujet aux déformations dues aux gradients thermiques

Il est utile de noter qu'au sein de la littérature scientifique, il est mentionné de la prise en charge de la problématique de gauchissement via l'utilisation d'un plateau de fabrication chauffant [89], ayant pour effet de limiter l'apparition de gradients thermiques au sein du composant en cours de fabrication et donc de minimiser le gauchissement : cette solution sera évoquée dans la suite du manuscrit au sein de l'étape A3 relative au choix et au paramétrage des équipements (le plateau de fabrication est lié à l'équipement utilisé).

B. GENERATION DES TRAJECTOIRES DES SECTIONS INTERMEDIAIRES

Les trajectoires des sections intermédiaires (S_i pour $1 < i \leq n$) ont deux objectifs :

- générer les trajectoires de remplissage, ayant pour objectif de garantir la tenue mécanique du composant ou de l'entité face aux sollicitations suivant la direction considérée comme mécaniquement forte
- générer les trajectoires en lien avec les surépaisseurs nécessaires au parachèvement.

Les trajectoires de remplissage seront réalisées en utilisant un motif de type carré (Figure 97A) ou un motif de type triangle isocèle (Figure 97B). La littérature scientifique ayant montré qu'il n'existe pas de consensus concernant une figure géométrique supérieure aux autres, il a été choisi de se concentrer sur des figures géométriques simples présentant un nombre de paramètres réduit.

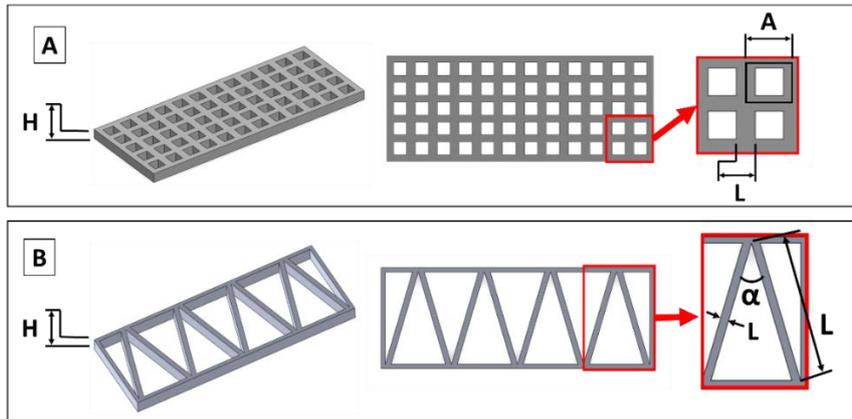


Figure 97 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, couche de matière déposée dans le cadre d'une stratégie de remplissage

Une stratégie de remplissage est paramétrée par l'intermédiaire d'une étape de modélisation et de simulation par éléments finis dont les étapes à respecter sont les suivantes :

- le modèle par éléments finis est d'abord mis en place, en renseignant les propriétés du matériau utilisé, les géométries de la maquette numérique et les conditions aux limites de l'étude (Figure 98A) ;
- un paramétrage initial de la stratégie de remplissage est réalisé (figure géométrique et largeur de cordons) (Figure 98B) ;
- les sollicitations suivant la direction mécaniquement forte sont appliquées au composant (ou à l'entité) et la simulation est réalisée (Figure 98C) ;
- les résultats de la simulation par éléments finis sont récupérés et analysés (Figure 98D) ;
- lorsque la tenue mécanique du composant (ou de l'entité) est validée, la stratégie de remplissage est validée (Figure 98E) ;
- lorsque la tenue mécanique du composant (ou de l'entité) n'est pas validée, les paramètres de la stratégie de remplissage sont modifiés (Figure 98F). Le processus application de la charge – calcul et l'analyse des résultats sont recommencés.

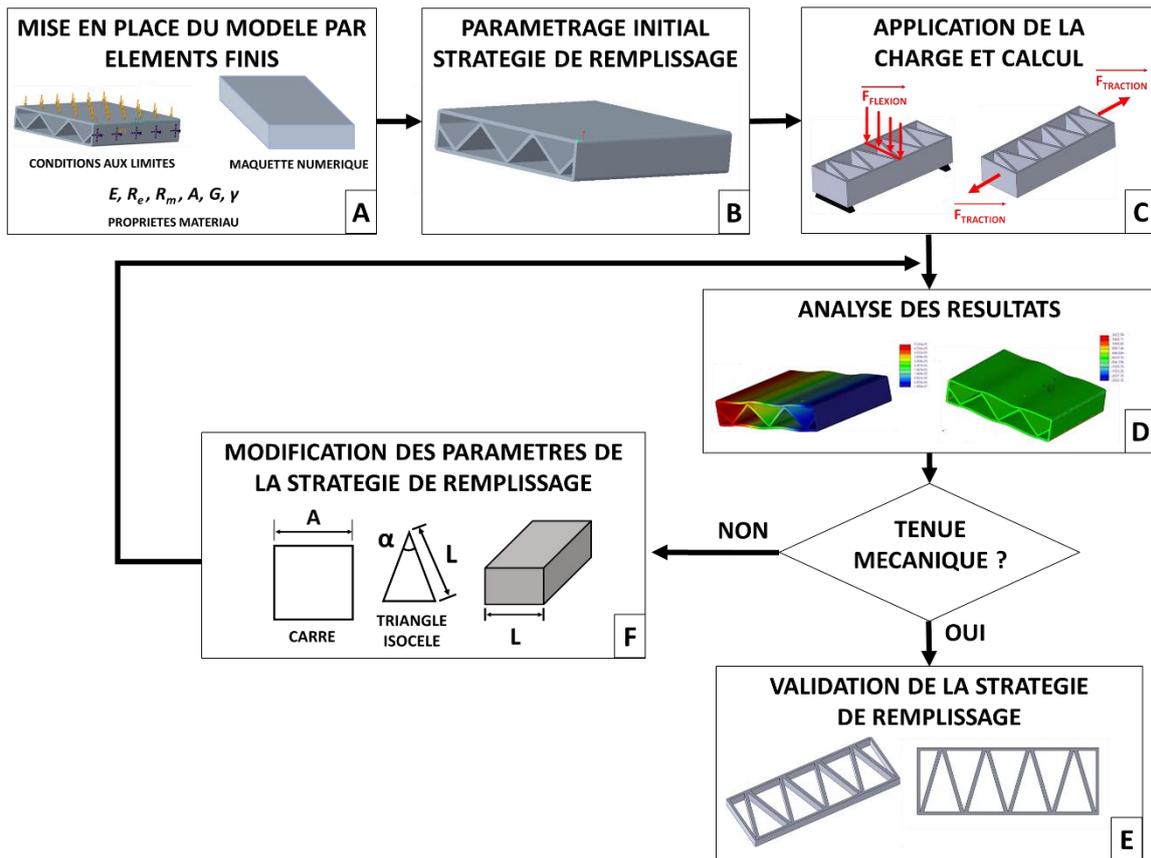


Figure 98 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, mise en place et paramétrage d'une stratégie de remplissage

Au sortir du paramétrage de la stratégie de remplissage, le composant ou l'entité sont capables de tenir face aux sollicitations suivant les directions considérées comme mécaniquement fortes.

Les surépaisseurs doivent également être prises en considération. Les trajectoires de fabrication relatives aux surépaisseurs partielles seront générées de manière à obtenir des structures pleines (brut homogène pour une opération de parachèvement, Figure 99). Les surépaisseurs n'ayant pas de fonctions mécaniques à assurer, l'orientation des trajectoires ne sera pas paramétrée.

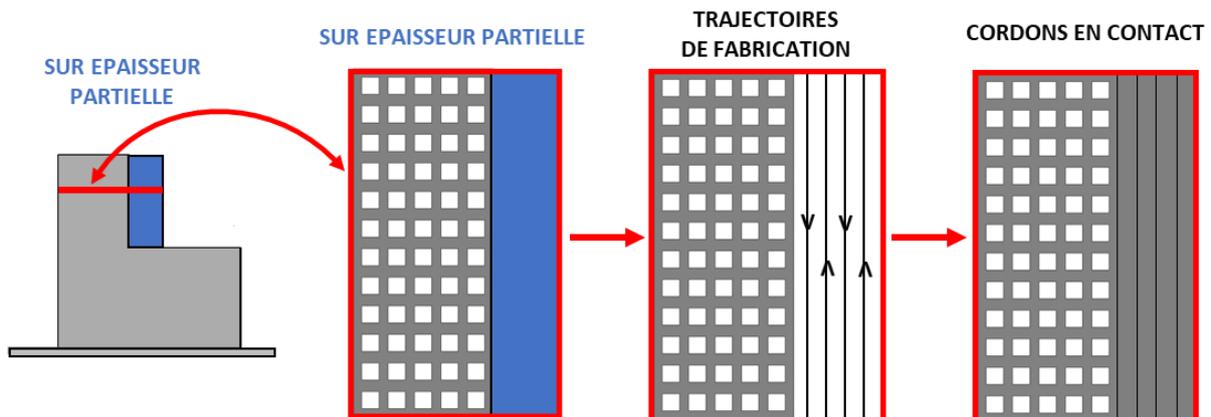


Figure 99 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, génération des trajectoires liées aux surépaisseurs partielles

C. GENERATION DES TRAJECTOIRES DE LA DERNIERE SECTION

Les trajectoires de la dernière section S_n ayant pour objectif de refermer le composant (ou l'entité), elles seront générées de manière à ce que les cordons de matière déposés soient en contact les uns avec les autres (Figure 100).

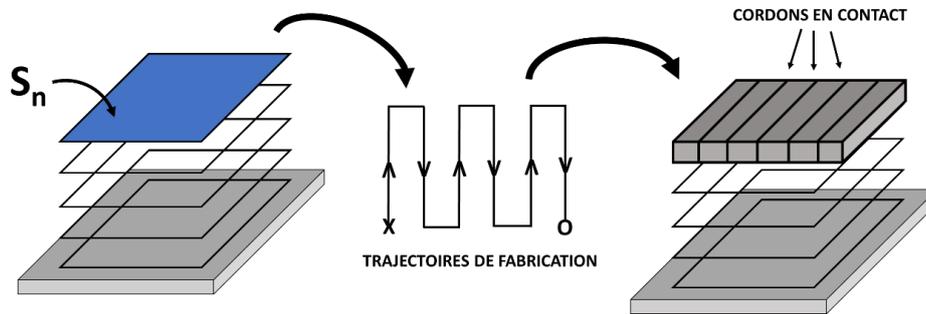


Figure 100 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, génération des trajectoires de la dernière section d'un composant

Une surépaisseur peut également être présente au sommet d'un composant sur une ou plusieurs sections. Les trajectoires de fabrication relatives à ces dernières seront générées de manière à ce que les cordons de matière déposés soient en contact les uns aux autres, ce qui permet de réaliser une stratégie de parachèvement à partir d'un brut homogène. Les surépaisseurs n'ayant pas de fonctions mécaniques à assurer, l'orientation des trajectoires ne sera pas paramétrée.

3.1.3. CONCLUSION SUR LA MISE EN PLACE DES STRATEGIES VOLUMIQUES

Dans cette partie, une étude et une analyse de la littérature scientifique ont permis de déterminer le positionnement de la méthodologie relative à la mise en place des stratégies volumiques. Cette dernière se veut générique, orientée vers la réalisation de composants de grandes dimensions, permettant de prendre en compte leurs problématiques mécaniques et de gauchissement. La méthodologie a ensuite été déroulée de manière chronologique, de la première à la dernière section et les règles développées dans ces travaux de recherche ont été illustrées. La partie suivante est dédiée au développement des stratégies de renforcement, ayant pour objectif de palier la problématique d'anisotropie des propriétés mécaniques inhérentes au procédé.

3.2 MISE EN PLACE DES STRATEGIES DE RENFORCEMENT

Cette partie est dédiée à la mise en place des stratégies de renforcement, créées et développées dans le cadre de cette thèse. Elles ont pour objectif de pallier la problématique d'anisotropie des propriétés mécaniques d'un composant (ou d'une entité) réalisé de manière additive à partir d'un matériau polymère thermoplastique (partie 1.1.1) et de contribuer à sa tenue face aux sollicitations mécaniques appliquées le long de directions considérées comme mécaniquement faibles, lorsque ces dernières excèdent la force d'adhésion des interfaces entre les couches de matière.

Le principe d'une opération de renforcement est le suivant : la totalité ou une partie des parois extérieures d'un volume bâti par une stratégie volumique est recouvert de couches minces de matière. La nécessité de mettre en place une stratégie de renforcement ayant été anticipée lors de l'étape de mise en position du composant (chapitre 1), une épaisseur a été retirée de manière uniforme des parois extérieures dans les cas où le renforcement serait nécessaire. Cette sous épaisseur sera comblée par le dépôt des couches de renforcement.

Les trajectoires d'une couche de renforcement sont orientées dans la même direction (Figure 101A), rendant ces dernières anisotropes (Figure 101B) : la résistance mécanique en traction suivant la direction Y, basée sur les propriétés mécaniques des cordons le long de leur direction de dépôt (Figure 101C), est supérieure à la résistance mécanique en traction suivant la direction X basée sur la force d'adhésion liée à l'enchevêtrement macromoléculaire (Figure 101D).

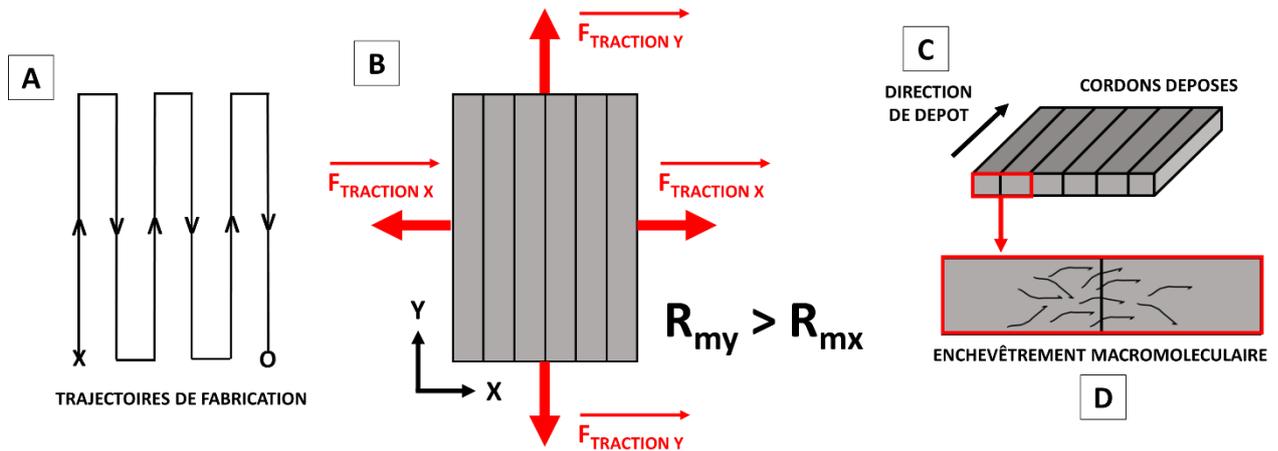


Figure 101 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, orientation des trajectoires d'une couche de renforcement

L'anisotropie des couches de renforcement est utilisée afin de pallier l'anisotropie du composant bâti via une stratégie volumique (Figure 102). En fonction des sollicitations mécaniques, plusieurs couches de matière, ayant des orientations différentes, peuvent être superposées.

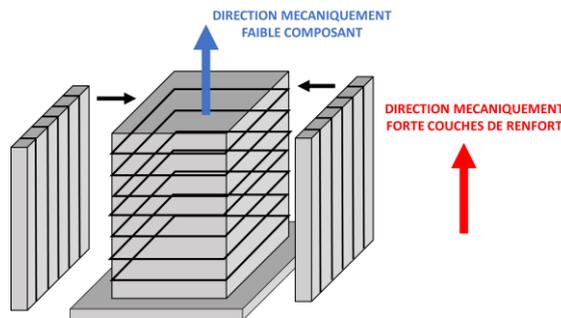


Figure 102 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, combinaison de l'anisotropie d'une stratégie volumique avec l'anisotropie d'une stratégie de renforcement

Au sein de cette partie, une étude de la littérature scientifique sera réalisée et le positionnement scientifique choisi dans le cadre de ces travaux de thèse présenté. Ensuite, une méthodologie générique permettant la mise en place d'opérations de renforcement sera développée. Puis, la pertinence des stratégies de renforcement sera illustrée à travers la réalisation de cas d'applications, avec et sans renforcement, soumis à des sollicitations mécaniques. Ensuite, sera également développé un axe de recherche concernant la mise en place de stratégies de renforcement à partir de matériaux renforcés de fibres continues. Pour finir, une synthèse sur les éléments présentés au sein de cette partie sera proposée.

3.2.1. RESOLUTION DU VERROU SCIENTIFIQUE LIE A L'ANISOTROPIE AU SEIN DE LA LITTERATURE ET POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE

Au sein de la littérature scientifique, la résolution de la problématique d'anisotropie des propriétés mécaniques des composants réalisés de manière additive à partir de polymères thermoplastiques fondus est étudiée à de multiples reprises, ce qui en souligne l'importance [113]. Plusieurs solutions afin de résoudre ce verrou ont été mises en place :

- Duty et al. [123] ont mis en place une solution appelée « Z-pinning » qui consiste à injecter un matériau polymère thermoplastique à l'état fondu le long de la direction de sollicitation mécaniquement faible afin de réduire l'anisotropie inhérente au procédé. Des éprouvettes de traction ont été réalisées avec et sans « Z-pinning » (Figure 103A). Les résultats obtenus montrent une augmentation de 40% des propriétés mécaniques en traction avec l'implémentation de la solution « Z-pinning » ;

- Hinchcliffe et al. [124] ont développé une technique appelée « post tensionning » consistant à pré contraindre en compression suivant leur direction mécaniquement faible des poutres réalisées en PLA via l'ajout de fibres naturelles (Figure 103B). L'impact des géométries des poutres réalisées et du niveau de précontrainte initiale des fibres a été investigué. Les résultats montrent une nette amélioration de la résistance en traction des composants précontraints ;
- Liaw et al. [125] ont soumis des éprouvettes de flexion en PEEK réalisées suivant la direction mécaniquement faible à un recuit (traitement thermique) qui, même s'il a permis d'augmenter les propriétés mécaniques (contrainte maximale de flexion à la rupture, module de flexion), n'a pas permis aux éprouvettes d'obtenir des résultats aussi forts que lorsqu'elles sont fabriquées le long d'une direction mécaniquement forte (Figure 103C) ;
- Shaffer et al. [113] ont induit des réactions de réticulation au sein d'éprouvettes de traction en copolymère en les exposant à des radiations ionisantes post-fabrication afin d'augmenter l'adhésion entre leurs couches de matière et ainsi réduire l'anisotropie (Figure 103D). Des essais de traction ont été réalisés sur des éprouvettes avec et sans irradiation. Celle-ci a un impact lorsqu'elle est réalisée à une température supérieure à la température de transition vitreuse du copolymère utilisé : par ce procédé, les propriétés mécaniques en traction sont améliorées.

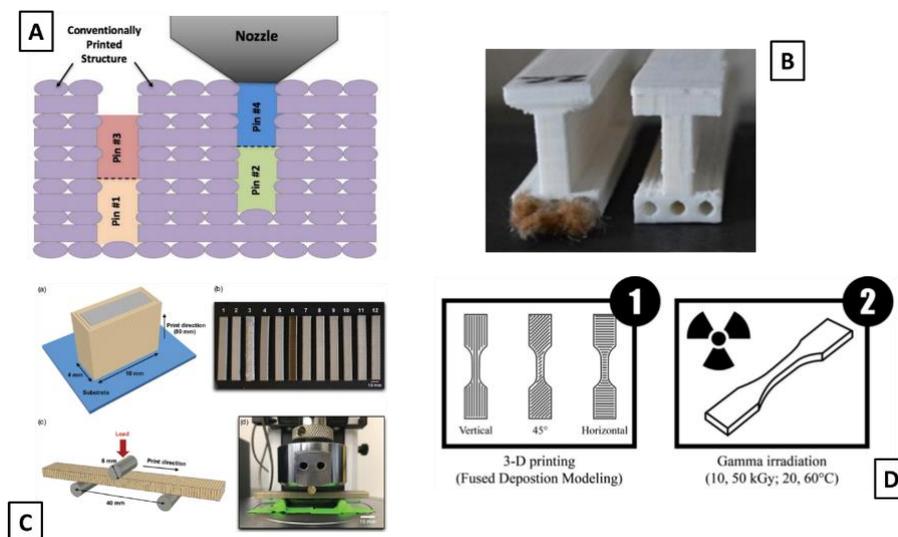


Figure 103 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, solutions mise en place au sein de la littérature afin de lever le verrou scientifique concernant l'anisotropie des propriétés mécaniques

Ce travail de recherche a été choisi de résoudre la problématique d'anisotropie des propriétés mécaniques via une approche de type « génération de trajectoires », consistant à mettre en place des stratégies de renforcement telles que précédemment présentées. Ces dernières sont incluses dans un ensemble de stratégies de fabrication ordonnancées les unes par rapport aux autres et plus généralement au sein de la méthodologie de préparation à la fabrication de composants de grandes dimensions.

Dans cet axe de recherche, une méthodologie de mise en place des stratégies de renforcement prenant en compte l'orientation optimale des trajectoires de fabrication et incorporant des outils de modélisation et de simulation numérique a été développée. Des cas d'application, permettant de mettre en lumière l'apport du renforcement et la pertinence de la méthodologie, ont également été réalisés et seront présentés.

3.2.2. MISE EN PLACE D'UNE STRATEGIE DE RENFORCEMENT

La résistance de la structure volumique aux sollicitations suivant la direction mécaniquement faible est d'abord validée ou non. Pour ce faire, la maquette numérique du composant est incorporée ; les propriétés matériau de la structure bâtie via une stratégie volumique tenant compte du matériau utilisé

et de l'anisotropie entre les couches de matière déposées sont définies, les conditions aux limites renseignées et les sollicitations suivant la direction mécaniquement faible appliquées. Lorsque la structure valide la tenue mécanique, une stratégie de renforcement n'est pas nécessaire. Dans le cas contraire, une stratégie de renforcement doit être mise en place (Figure 104).

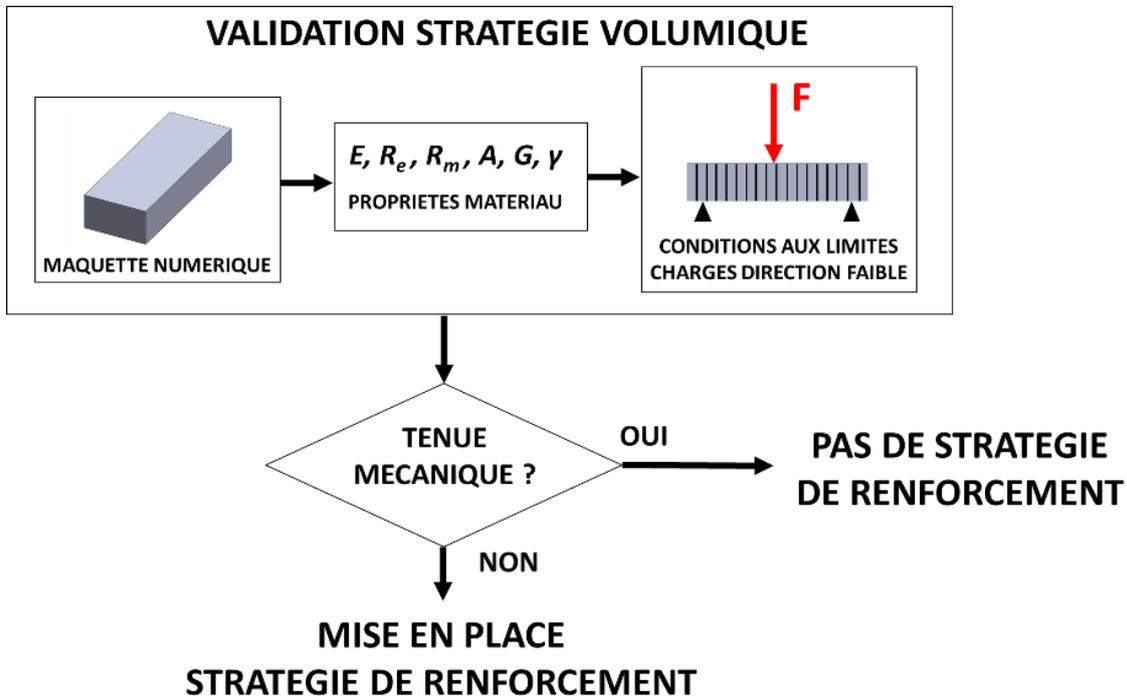


Figure 104: fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, validation de la tenue mécanique d'une structure bâtie par un stratégie volumique aux sollicitations suivant la direction mécaniquement faible

Une stratégie de renforcement est mise en place suivant plusieurs étapes. Un paramétrage initial de la stratégie de renforcement est d'abord réalisé (Figure 105A) :

- épaisseur de renforcement (E), qui cherchera à être minimisée afin de limiter le retrait d'épaisseur au niveau de la maquette numérique ;
- nombre (β) et orientations (α) des couches de renforcement, qui seront paramétrés en fonction des sollicitations mécaniques suivant la direction mécaniquement faible : l'anisotropie des couches de renforcement pallie l'anisotropie du composant bâti par une stratégie volumique.
- propriétés du matériau utilisé qui doivent être fortes suivant la direction de dépôt. La compatibilité chimique avec le matériau utilisé dans le cadre de la stratégie volumique doit être également être validée. Il a été choisi, dans le cadre de ces travaux, d'utiliser un matériau de renfort ayant la même nature chimique.

Puis, les conditions aux limites de l'étude sont appliquées et les résultats analysés (Figure 105B). Lorsque la tenue mécanique est confirmée, la stratégie de renforcement est validée et le retrait de l'épaisseur nécessaire au renforcement est réalisé (Figure 105C). Pour ce faire, un retour à l'étape de mise en position doit être réalisé (étape A1). Lorsque la tenue mécanique n'est pas validée, la modification des paramètres de la stratégie de renforcement est nécessaire (Figure 105D).

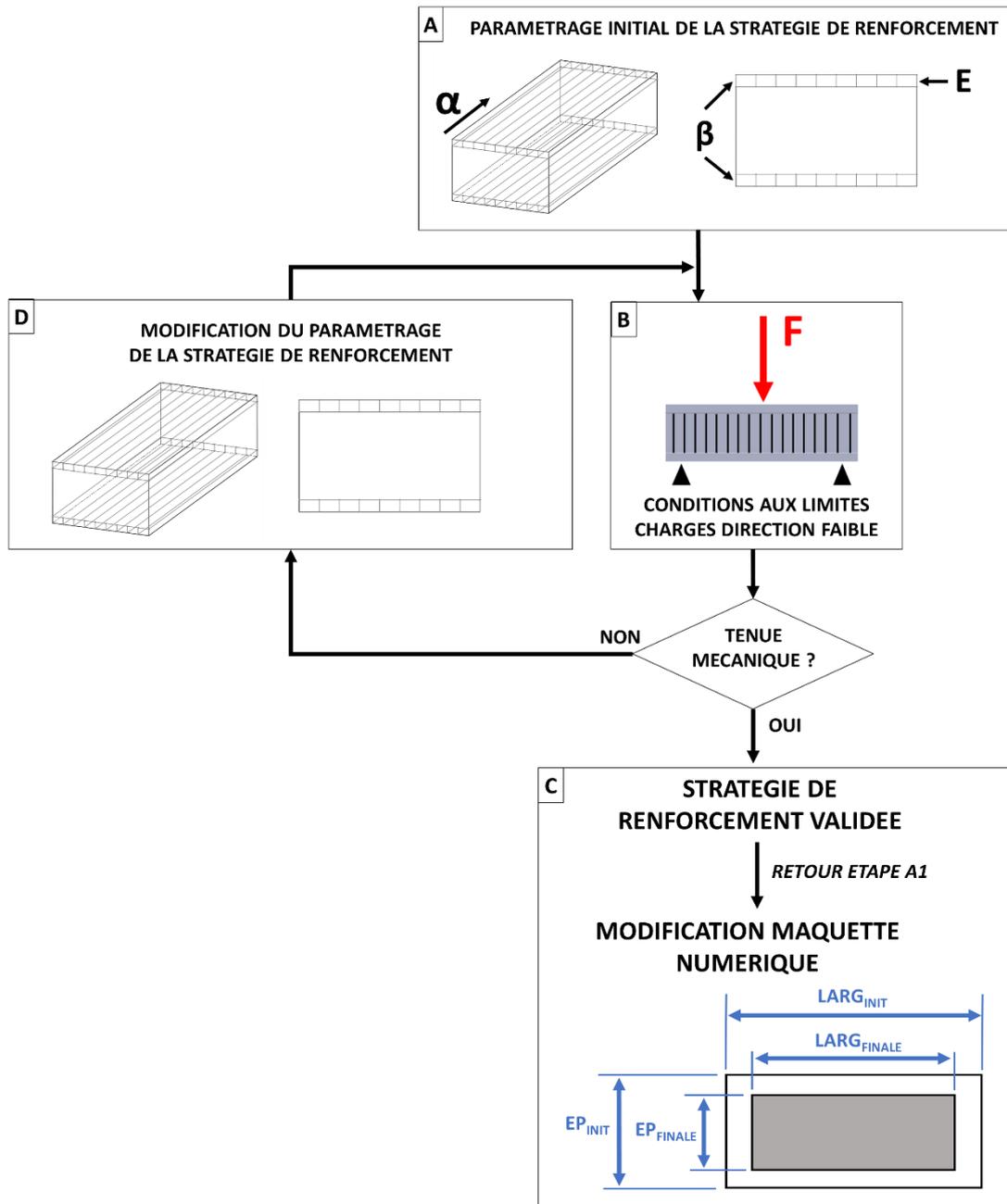


Figure 105 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, méthodologie de mise en place de stratégie de renforcement

En fin de chapitre, un cas d'application de stratégie de renforcement mettant en place les éléments sera réalisé et présenté (réalisation d'un hyperboloïde avec stratégie de renforcement).

3.2.3. STRATEGIES DE RENFORCEMENT - CAS D'APPLICATION

Des stratégies de renforcement ont été mises en place sur trois composants différents afin de mettre en lumière leur utilité : des éprouvettes de traction (norme ASTM D638 TYPE4 [126]) (Figure 106A), une poutre creuse à section carrée (Figure 106B), une pale extraite de l'hélice réalisée dans le cadre des cas d'application de la méthodologie de préparation à la fabrication (Figure 106C).

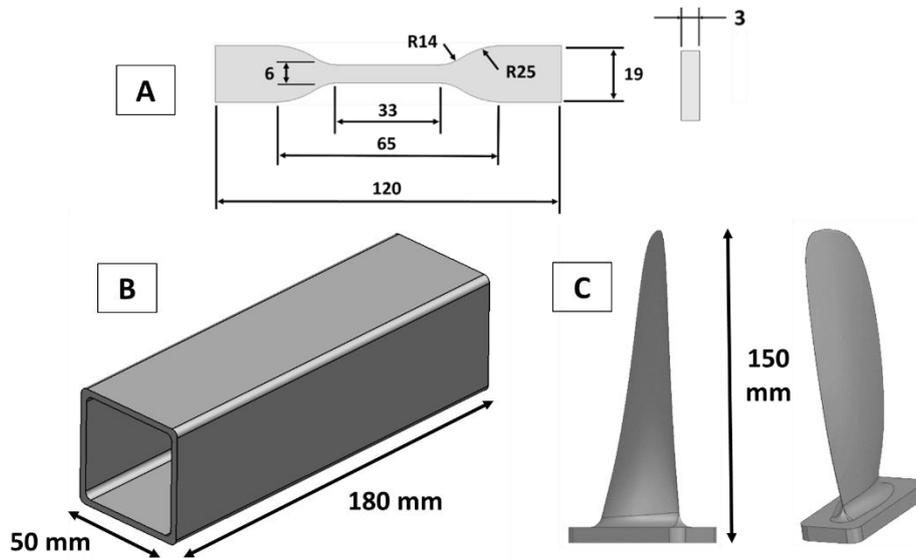


Figure 106 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, composants ayant été l'objet de stratégies de renforcement

Dans la suite de cette partie, les stratégies de renforcement des éprouvettes de traction, de la poutre creuse et de la pale seront tour à tour développées. Le processus expérimental est le suivant :

- les composants ont été réalisés avec et sans renforcement. Lorsqu'une stratégie de renforcement doit être implémentée, une sous épaisseur a été volontairement retirée de la maquette numérique de manière à ce que les dimensions obtenues avec et sans renforcement soient les mêmes ;
- les trajectoires de renforcement ont été déterminées afin de répondre ainsi aux sollicitations suivant la direction mécaniquement faible : les éprouvettes de traction ont été soumises à des efforts de traction, les poutres à des efforts de flexion 3-points et les pales à des efforts de flexion encastrée ;
- les stratégies de renforcement ont été paramétrées. Dans chacun des cas, elles sont constituées de cordons de matière en contact les uns avec les autres ;
- dans certains cas, les composants avec et sans renforcement ont été soumis aux sollicitations précédemment mentionnées ;
- les résultats obtenus ont été traités et analysés. Ils permettront de statuer sur la pertinence des stratégies de renforcement afin de répondre aux sollicitations mécaniques suivant des directions considérées comme mécaniquement faibles.

Les stratégies de renforcement ont été réalisées à partir de matériaux polymères purs et renforcés de fibres courtes. Ce faisant, seul l'impact des trajectoires de renforcement pourra être pris en considération dans l'analyse des résultats obtenus. L'apport d'un matériau renforcé de fibres continues sera développé au sein de la partie suivante du chapitre. Pour finir, une synthèse sera faite sur les éléments obtenus dans cette partie.

3.2.3.1. RENFORCEMENT D'ÉPROUVETTE DE TRACTION

Des éprouvettes de traction de norme ASTM D638 TYPE4 [126] (Figure 106A) ont été réalisées à partir de PLA suivant trois orientations différentes : à plat (3 éprouvettes réalisées, Figure 107A), sur le côté (3 éprouvettes réalisées, Figure 107B) et à la verticale (9 éprouvettes réalisées, Figure 107C).

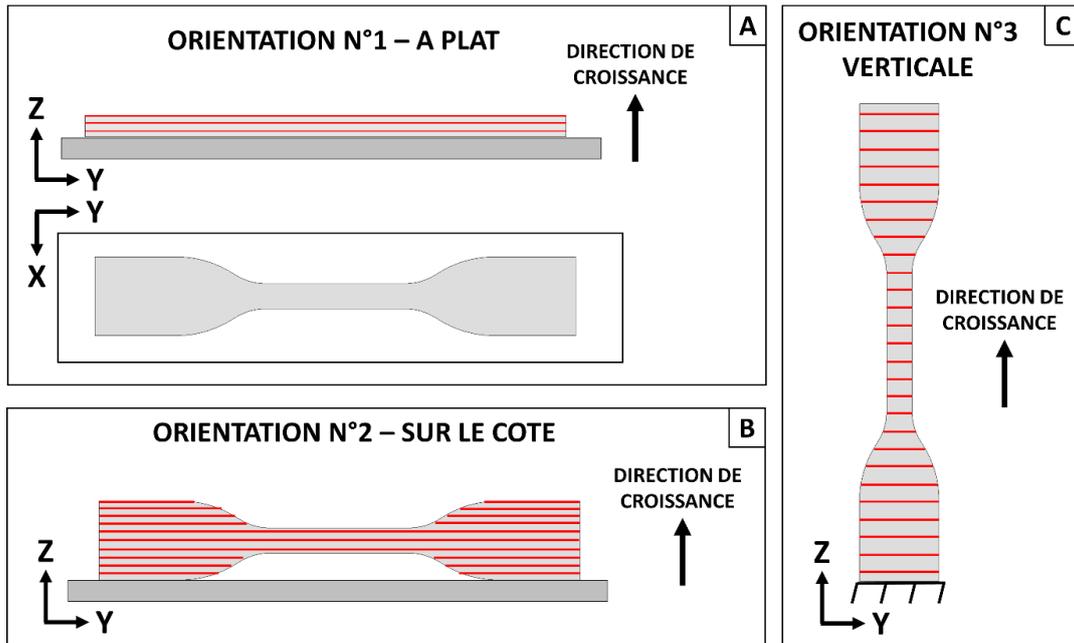


Figure 107 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, orientations des éprouvettes sur le plateau de fabrication

Les paramètres suivants ont été utilisés : épaisseur de couche égale à 0,2 mm et densité de remplissage égale à 100%. Six des neuf éprouvettes réalisées à la verticale se sont vu appliquer une sous épaisseur égale à 0,2 mm sur leurs faces principales afin de mettre en place une stratégie de renforcement. Lorsqu'elles seront soumises à un effort de traction uni axiale, les éprouvettes fabriquées à plat et sur le côté seront sollicitées suivant une direction mécaniquement favorable vis-à-vis de la stratégie de sectionnement tandis que les éprouvettes fabriquées à la verticale le seront suivant une direction mécaniquement défavorable vis-à-vis de la stratégie de sectionnement (des vecteurs de forces orthogonaux aux sections).

Suite à la réalisation des éprouvettes de traction, les éprouvettes réalisées à la verticale avec une sous épaisseur ont été recouvertes d'une couche de renforcement de part et d'autre, d'épaisseur égale à la sous épaisseur retirée (0,2 mm) (Figure 108). L'épaisseur totale du renforcement est égale à 0,4 mm, ce qui représente de 13% de l'épaisseur totale de l'éprouvette.

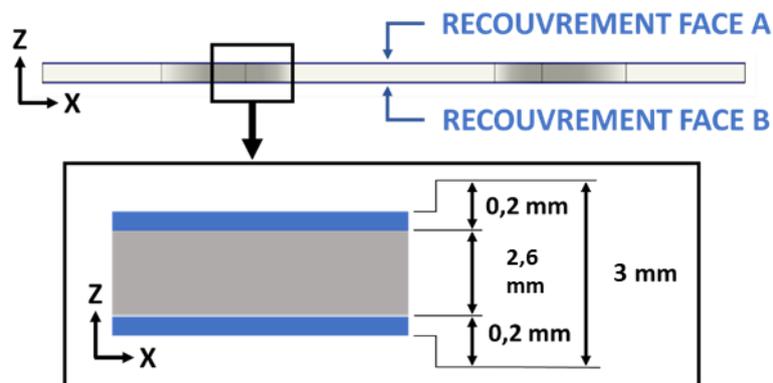


Figure 108 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, réalisation du renforcement des éprouvettes réalisées suivant la direction mécaniquement faible

Sur les 6 éprouvettes recouvertes, la première moitié l'a été avec un matériau PLA sans renforts tandis que la seconde moitié l'a été avec un matériau PLA avec renforts de type fibres courtes. Les trajectoires de la renforcement (Figure 109A) ont été générées de manière à être colinéaires à la sollicitation de traction. Les cordons des couches de renforcement seront sollicités suivant leur direction de dépôt et l'anisotropie de ces couches sera utilisée de manière pertinente. Les cordons de matière déposés seront

en contact les uns avec les autres, de manière à obtenir des couches de renforcement lisses et homogènes (Figure 109B).

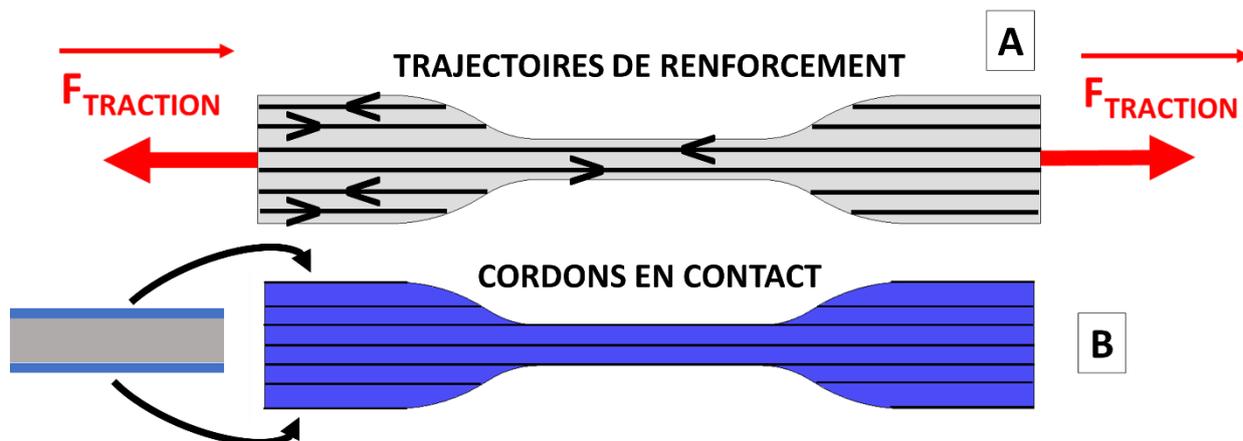


Figure 109 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, trajectoires de renforcement réalisées sur les éprouvettes de traction

Les résultats obtenus après le renforcement des éprouvettes sont mis en avant par la Figure 110.

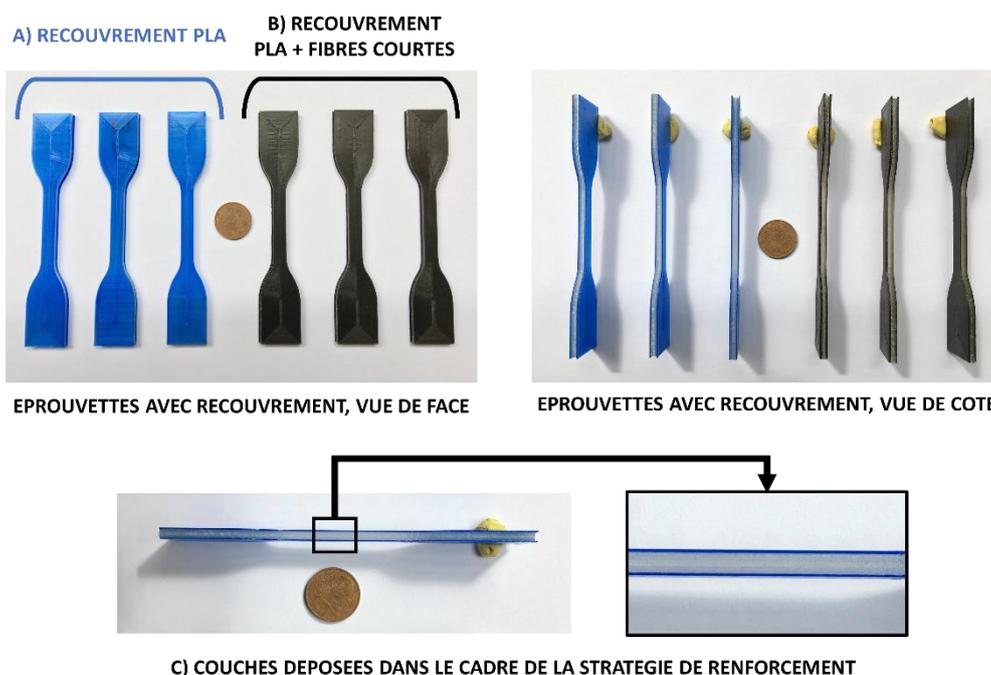


Figure 110 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, résultats obtenus après renforcement des éprouvettes

Suite au renforcement des éprouvettes, des essais de traction réalisés avec et sans renforcement ont été menés. Les paramètres utilisés lors de ces derniers sont les suivants : une machine INSTRON 5584 a été utilisée, les essais ont été réalisés avec une vitesse de déformation constante (1 mm/s), température extérieure égale à 22,7°C et taux d'humidité relatif égal à 56,2% pendant les essais.

Le tableau 1 présente les valeurs moyennes de la résistance maximale en traction, de l'écart type des valeurs moyennes de résistance maximale en traction et du module de Young pour chaque type d'éprouvettes. Les résultats obtenus concernant les éprouvettes renforcées prennent en compte la surépaisseur due aux couches de renforcement.

ORIENTATION	SUR LE COTE		VERTICALE			(REFERENCE) MOULAGE PAR INJECTION
	A PLAT		N°3			
	N°1	N°2	SANS RENFORCEMENT	RENFORCEMENT PLA	RECOUVREMENT PLA + FCC	
$\bar{\sigma}_M$ [MPa]	53,08	52,52	37,50	42,33	41,31	47,00
$\bar{\sigma}_M \pm \sigma$ [MPa]	2,20	1,16	2,05	3,88	3,22	
\bar{E} [MPa]	2,50	2,73	2,90	2,85	2,83	1,45

Tableau 2 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, résultats des essais de traction relatifs aux éprouvettes avec et sans stratégie de renforcement

Les courbes relatives aux essais de traction des éprouvettes fabriquées suivant l'orientation N°3 avec et sans renforcement sont présentées dans de la Figure 111.

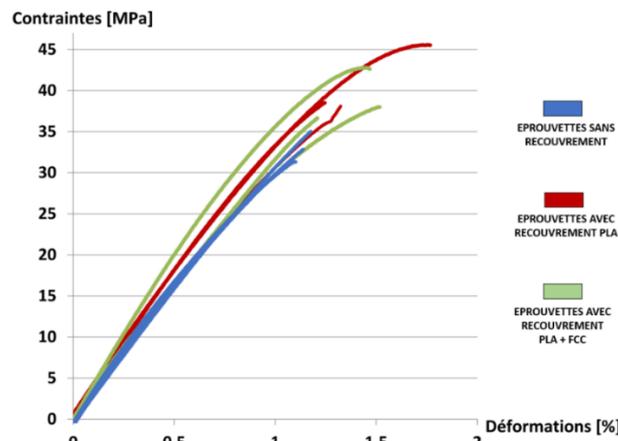


Figure 111 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, résultats des essais de tractions relatifs aux éprouvettes réalisées suivant la direction mécaniquement faible

Les courbes relatives aux essais de traction de l'ensemble des éprouvettes fabriquées sont, quant à elles, présentées dans la Figure 112.

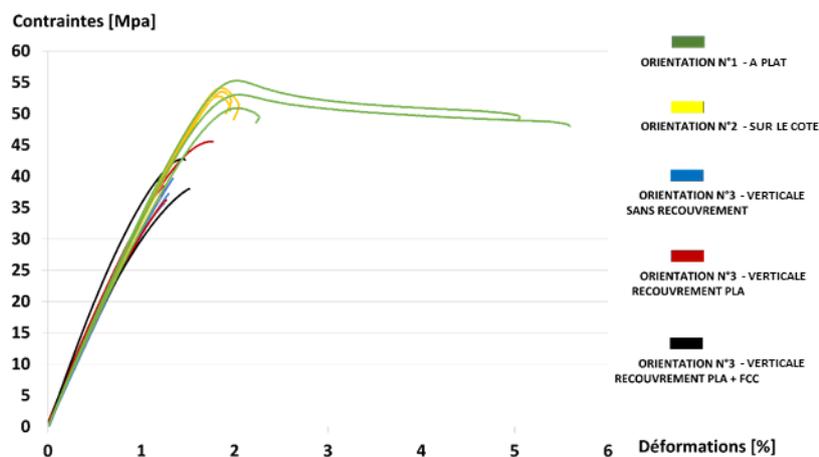


Figure 112 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, résultats des essais de tractions relatifs à chacune des éprouvettes réalisées

Les résultats présentés dans le Tableau 2 montrent que les éprouvettes réalisées suivant les directions N°1 (à plat) et N°2 (sur le côté) obtiennent les résultats les plus élevés lors des essais de traction. Leurs valeurs moyennes de résistance maximale à la traction sont respectivement de 41,5 et 40% supérieures

à la valeur de résistance maximale à la traction des éprouvettes réalisées suivant l'orientation N°3. Ces résultats mènent à la première conclusion : l'anisotropie des propriétés mécaniques inhérente au procédé est bien présente car les éprouvettes réalisées suivant l'orientation N°3 ont obtenu les résultats les plus faibles. La baisse des propriétés mécaniques de 40% suivant la direction mécaniquement faible est conforme aux valeurs reportées au sein de la littérature scientifique.

Les courbes relatives aux essais de traction des éprouvettes réalisées suivant l'orientation N°3 et présentées par la Figure 111 mènent à une seconde conclusion : la stratégie de renforcement a permis aux éprouvettes de mieux résister lors des essais mécaniques. Ainsi, la valeur moyenne de résistance en traction des éprouvettes avec stratégie de renforcement a été respectivement augmentée de 12,3% avec renforcement en PLA et de 10% avec renforcement en PLA renforcé de fibres courtes.

La hausse des propriétés mécaniques en traction apportée par la stratégie de renforcement ne permet pas d'obtenir des valeurs de résistance en traction similaires suivant les trois directions : en effet, la valeur moyenne de résistance à la traction des éprouvettes avec stratégie de renforcement à base de PLA reste respectivement de 26% inférieure à celle des éprouvettes réalisées suivant la direction N°1 et de 24,7% inférieure à celle des éprouvettes réalisées suivant la direction N°2. Elle permet cependant de valider la pertinence des trajectoires générées. Néanmoins, ces résultats amènent à une troisième et dernière conclusion : lorsqu'un renforcement en matériau polymère thermoplastique sans renforts et avec renforts de type fibres courtes est réalisé, l'apport généré par ces dernières ne suffit pas à pallier la problématique d'anisotropie inhérente au procédé. L'utilisation d'un matériau aux propriétés mécaniques en traction intrinsèquement fortes semble être une nécessité. La partie suivante développera le renforcement de composant à partir de matériau polymère thermoplastique renforcé de fibres longues et continues.

3.2.3.2. RENFORCEMENT D'UNE POUTRE SOUMISE A UN EFFORT DE FLEXION 3-POINTS

3.2.2.4.1. REALISATION DES POUTRES

Deux poutres aux dimensions différentes ont été réalisées via des stratégies volumiques (Figure 113A) :

- les sections de la première structure sont constituées de deux trajectoires concentriques suivant lesquelles seront déposés des cordons de largeur égale à 3 mm. L'épaisseur totale de la structure est de 6 mm (Figure 113B) ;
- les sections de la seconde structure sont constituées d'une trajectoire suivant laquelle seront déposés des cordons de 3 mm d'épaisseur. On réalisera par la suite des couches de renforcement d'épaisseur égale à 3 mm (Figure 113C).

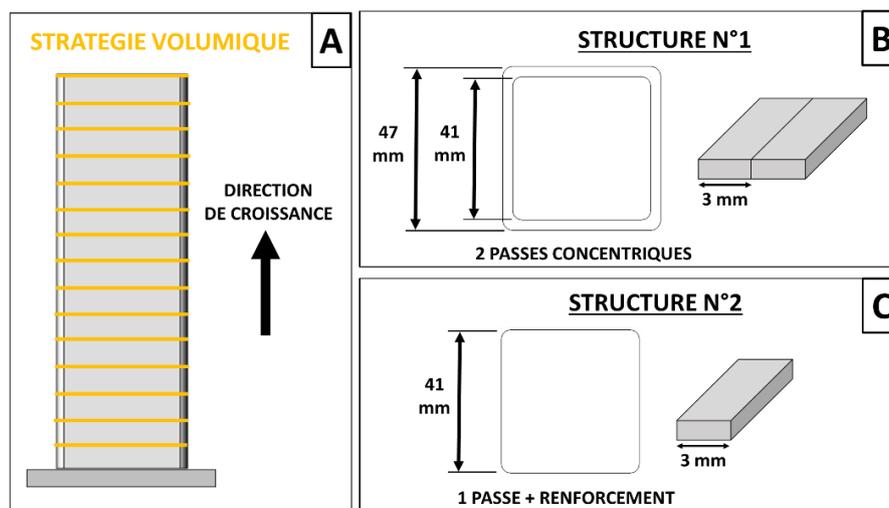


Figure 113 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, poutres réalisées via des stratégies volumiques

3.2.2.1.1. REALISATION DE LA STRATEGIE DE RENFORCEMENT

La stratégie de renforcement a pour objectif d'optimiser les propriétés de la structure lorsque cette dernière est sollicitée en flexion 3-points suivant une direction considérée comme mécaniquement faible (Figure 114A). La résistance en flexion, basée sur la force d'adhésion entre les couches de matière, est donc limitée. Lorsque la sollicitation de flexion dépasse une valeur critique (fonction de l'adhésion entre les couches), il y a rupture du composant (Figure 114B).

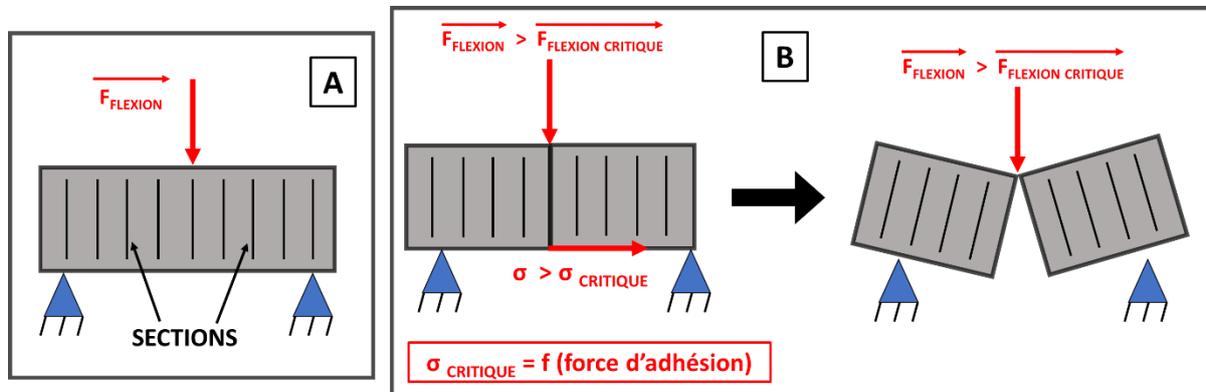


Figure 114 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, direction de sollicitation mécaniquement faible en flexion

Pour remédier à ce problème, les trajectoires des couches de renforcement seront orientées de manière à être colinéaires aux contraintes σ_{xx} engendrées par le moment de flexion M_{fz} (Figure 115). En procédant ainsi, l'anisotropie des couches de renforcement sera utilisée de manière pertinente et les propriétés mécaniques du composant résideront non seulement sur l'adhésion entre les couches mais aussi sur les propriétés des couches de renforcement.

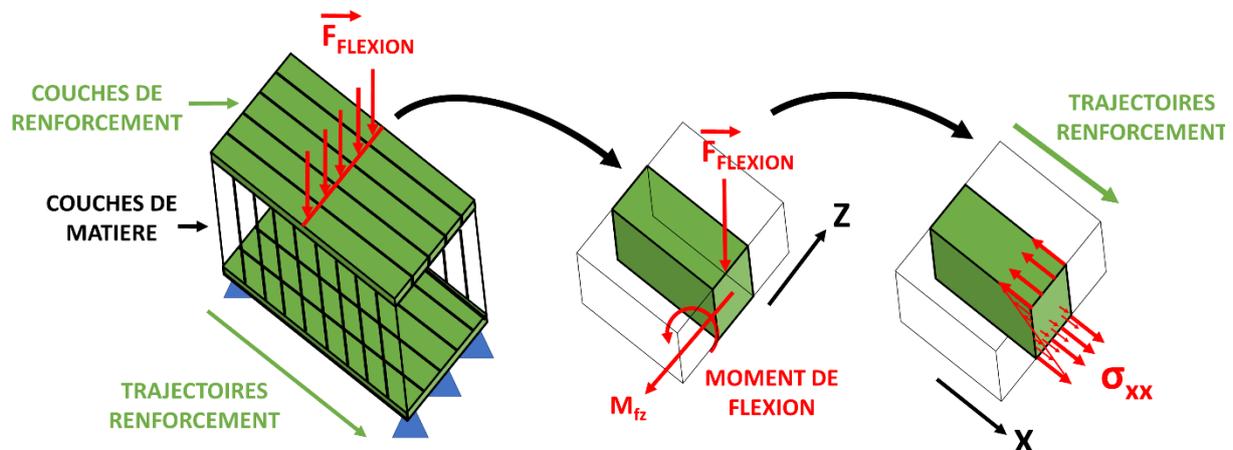


Figure 115 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, trajectoires de renforcement de la poutre soumise à un effort de flexion

Deux couches de renforcement, d'épaisseur égale à 1,5 mm, seront déposées de manière à combler la sous épaisseur retirée de la maquette numérique lors de la réalisation des stratégies volumiques (Figure 116A) : l'épaisseur totale de la structure, avec le renforcement, sera de 6 mm. Les poutres avec et sans renforcement auront alors les mêmes dimensions. Les cordons de matière déposés seront en contact les

uns avec les autres, de manière à optimiser les propriétés mécaniques des couches de renforcement (Figure 116B).

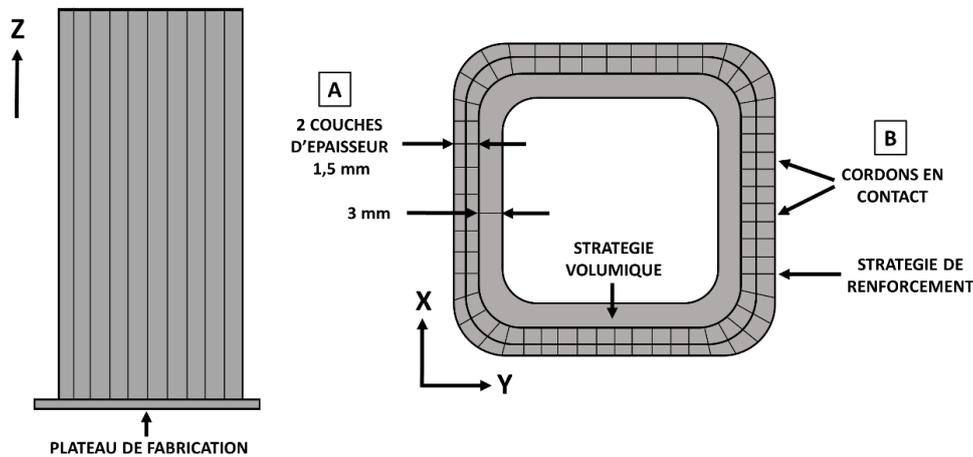


Figure 116 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, couches de renforcement sur la poutre

La structure a été réalisée et est illustrée au sein de la Figure 117.

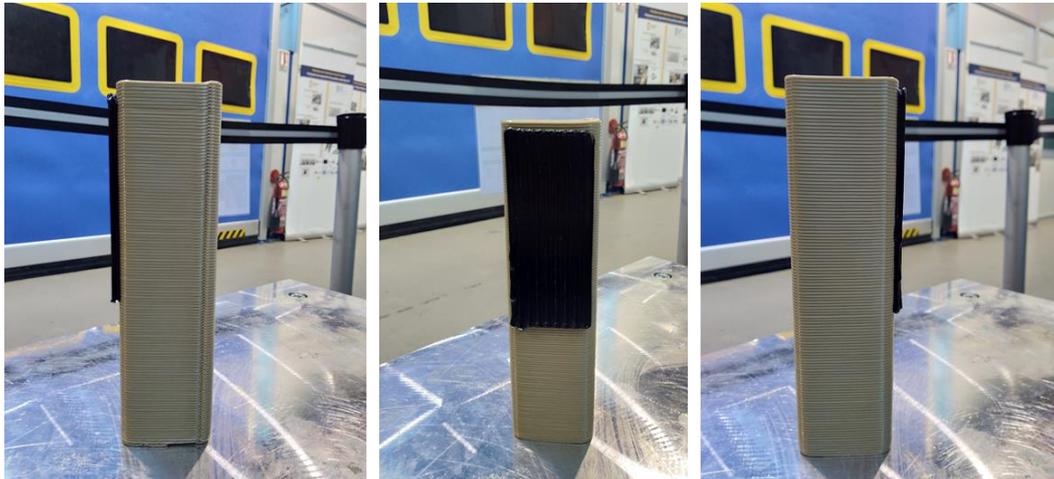


Figure 117 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, poutre avec renforcement

L'étape suivante sera de réaliser des essais de flexion 3-points afin de valider l'apport de la stratégie de renforcement.

3.2.2.2. RENFORCEMENT D'UNE PALE ENCASTREE SOUMISE A UN EFFORT DE FLEXION

Deux pales bâties sur un socle ont été réalisées via des stratégies volumiques (Figure 118). Ces dernières ont été :

- positionnées à la verticale, la face inférieure du socle en contact avec le plateau de fabrication (Figure 118A) ;
- sectionnées via un sectionnement plan et horizontal (épaisseur de couche égale à 0,4 mm pour le socle, égale à 0,2 mm pour la pale) (Figure 118B) ;
- les trajectoires générées sont concentriques pour le socle, la figure géométrique est de type carré pour la pale (Figure 118C).

Une épaisseur uniforme suivant la normale entrant aux surfaces de la pale, égale à 0,4mm, a été retirée de la maquette numérique sujette à un futur renforcement. L'épaisseur a été choisie arbitrairement afin de mettre en lumière le processus de génération de trajectoires de renforcement.

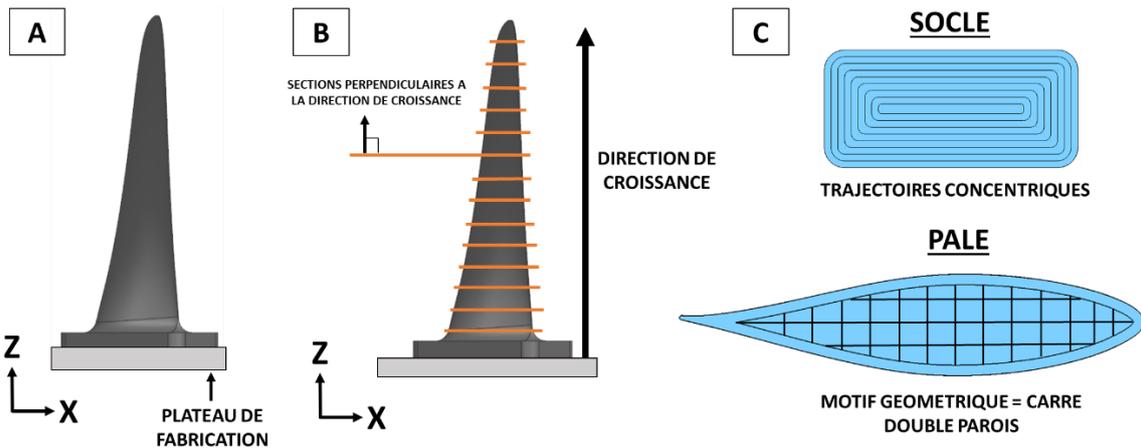


Figure 118 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, fabrication des pales via des stratégies volumiques

Les pales, bâties suivant les paramètres mentionnés plus haut, sont montrées par la Figure 119.



Figure 119 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, pales bâties par la stratégie volumique

Les trajectoires de la stratégie de renforcement ont été générées en fonction des paramètres suivants :

- les cordons de matière déposés doivent prendre appui sur les parois extérieures de la pale (Figure 120A) ;
- les cordons de matière déposés doivent être orientés de manière à ce qu'ils soient sollicités suivant leur direction de dépôt lorsque la pale est soumise à une sollicitation de flexion (Figure 120B).

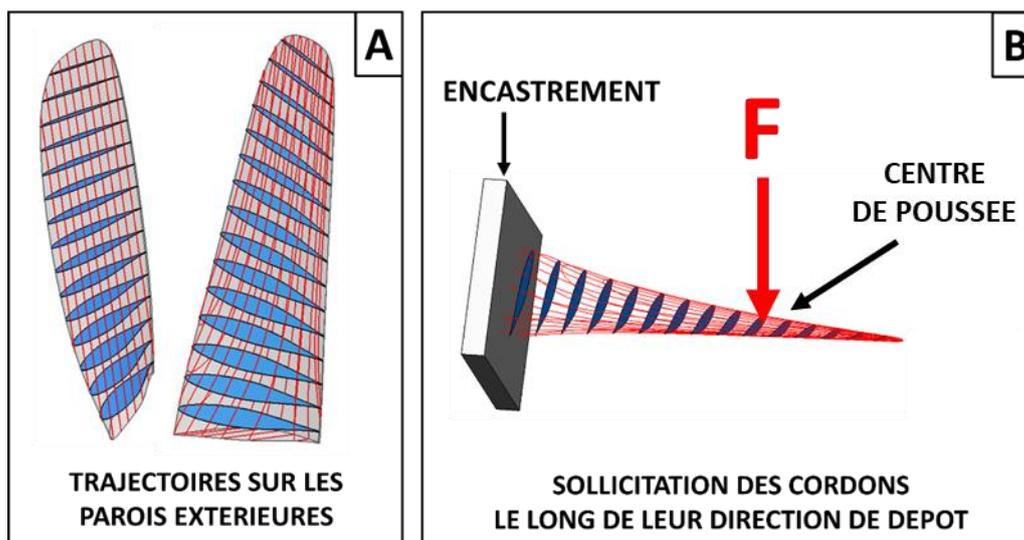


Figure 120 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, trajectoires de recouvrement de la pale

La couche de renforcement prenant appui sur les parois extérieures du composant a une épaisseur égale à 0,4 mm (épaisseur égale à la sous épaisseur retirée de la maquette numérique). Les cordons sont en contact les uns avec les autres car le composant a une visée hydrodynamique et la surface extérieure devra être lisse. Une opération de parachèvement manuelle sera réalisée suite à la stratégie de renforcement. Sur la Figure 42A, une stratégie de renforcement a été réalisée, les parois extérieures recouvertes ont été polies et enrobées d'une résine thermodurcissable (Figure 121B).

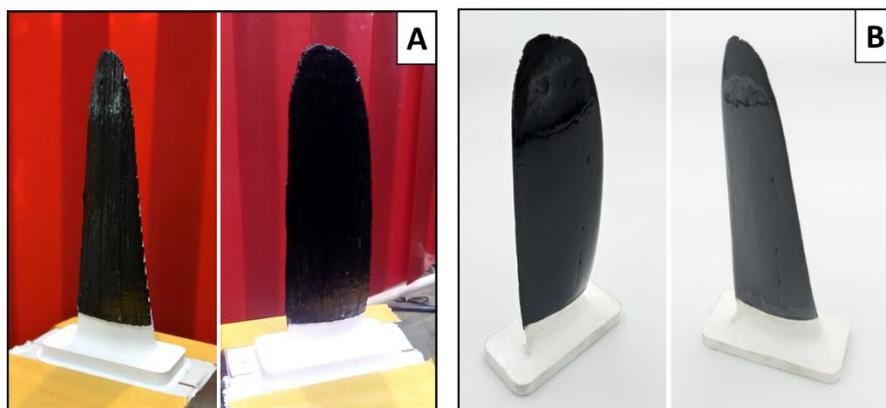


Figure 121 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, recouvrement de la pale

L'étape suivante sera de réaliser un essai de flexion encastree afin de valider l'apport de la stratégie de renforcement.

3.2.3. RENFORCEMENT AVEC DES MATERIAUX RENFORCES DE FIBRES CONTINUES

La partie précédente a mis en avant la nécessité d'utiliser des matériaux aux propriétés mécaniques intrinsèques en traction supérieures à celles des matériaux polymères thermoplastiques sans renforts et renforcés de fibres courtes. Nous avons donc décidé de développer un axe de recherche sur la mise en place de stratégies de renforcement à partir de matériaux polymères thermoplastiques renforcés de fibres continues. Par la suite nous réaliserons une étude de la littérature scientifique sur cette catégorie de matériaux et nous expliciterons le positionnement scientifique choisi dans le cadre de ces travaux de thèse. Ensuite, nous mettrons en avant les propriétés intrinsèques du matériau utilisé. Puis nous illustrerons la caractérisation et l'utilisation du matériau dans le cadre de stratégies de renforcement. Pour finir nous ferons une synthèse des éléments obtenus au sein de cette partie.

3.2.3.1. ETUDE DE LA LITTERATURE ET POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE

La littérature scientifique fait plusieurs fois mention de matériaux à matrice polymère thermoplastique et renforcés de fibres continues :

- l'entreprise Markforged [35] a développé un matériau polymère thermoplastique à matrice polyamide renforcé de fibres de carbone continues (fraction volumique de fibres égales à 50%), stocké sur bobines sous la forme d'un filament [127]. Néanmoins, il existe des restrictions relatives à l'approvisionnement de ce dernier à des fins de recherche et de développement ;
- le laboratoire de recherche d'AREVO a développé un matériau à matrice PEEK renforcé de fibres de carbone continues, non disponible commercialement, ayant une fraction volumique de fibres égale à 50% et un taux de porosité inférieur à 2% [128]. Ce matériau, conforme aux standards relatifs aux matériaux composites utilisés dans l'aéronautique, sera considéré comme la référence permettant la comparaison avec le matériau utilisé dans ces travaux de recherche ;
- un procédé additif permettant d'obtenir un matériau polymère thermoplastique renforcé de fibres longues ou continues, appelé « In-nozzle impregnation », consiste à mélanger un matériau polymère thermoplastique sans renforts à des fibres continues au sein de la partie terminale d'un outil de dépose de matière (buse d'injection) [30], [129]–[133]. Les résultats présents au sein de la littérature scientifique montrent que ce procédé a des limites en termes d'imprégnation entre les fibres et la matrice, ce qui provoque des ruptures prématurées lors de sollicitations mécaniques ;
- Eichenhofer et al. [134]–[136] ont adapté le procédé de pultrusion en utilisant comme matériau d'apport un produit semi fini constitué d'un mélange de fibres de carbone longues et de fils de polyamide 12 ayant une fraction volumique de fibres égale à 50% ;
- De Backer et al. [137] ont utilisé un matériau à matrice PEI renforcé de fibres de carbone continues développé par un laboratoire de recherche en matériau.

Dans le cadre de ces travaux de recherche, nous avons choisi d'utiliser un matériau à matrice polyamide renforcé de fibres continues, développé dans le cadre d'une collaboration avec l'Université de Pau et le docteur Anaïs Barasinski. Le matériau a été livré sous forme de filament stocké sur une bobine. Ce choix est justifié par deux raisons : le développement d'un matériau composite requiert des compétences spécifiques et permet de centrer les travaux de recherche sur la partie préparation à la fabrication.

A la réception du lot de matière, seule la nature chimique de la matrice (polyamide) a été communiquée. Par conséquent, les différentes caractéristiques du matériau renforcé devront être d'abord être recueillies (fraction volumique de matrice, nature exacte de la matrice, nature et fraction massique de fibres, porosité, masse volumique, analyse des pourtours du jonc), ce qui sera l'objet de la prochaine partie.

3.2.3.2. ANALYSE DU FILAMENT RENFORCE

Dans cette partie nous analyserons les caractéristiques du filament à matrice polyamide renforcé de fibres continues utilisé dans le cadre de ces travaux de recherche : fraction volumique de matrice, nature exacte de la matrice, nature et fraction massique de fibres, porosité, masse volumique, géométries des sections. Cela permettra d'avoir une estimation qualitative et quantitative du filament, de pouvoir l'associer à un substrat dans le cadre de la mise en place d'opérations de renforcement et de déterminer des données relatives à son futur paramétrage dans le cadre de la mise en place de stratégies de renforcement. Le filament utilisé lors de ces travaux étant un prototype, il conviendra de prendre ce facteur en considération lorsque les données seront analysées. Le filament à matrice PEEK renforcé de fibres de carbone continues développé par l'entreprise Arevo, ayant une maturité importante en termes de développement, sera utilisé afin de comparer les résultats obtenus [128].

3.2.3.3. GEOMETRIE DES SECTIONS

Connaître le diamètre et les géométries des sections du filament utilisé permet d'obtenir des informations qui serviront lors de la mise en place de stratégies de renforcement. Pour ce faire, cinq sections ont été

coupées, prélevées et analysées via l'utilisation d'un microscope électronique et d'un logiciel de traitement d'images. La section du filament reçu n'est pas circulaire mais de forme ovale et irrégulière, de longueur moyenne égale à 1,64 mm et de largeur moyenne égale à 1,46 mm (Figure 122).

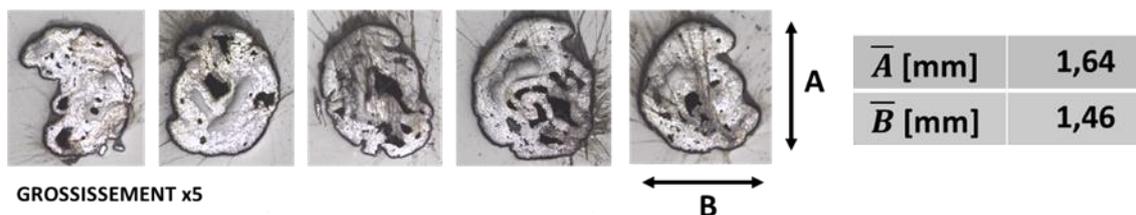


Figure 122 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, sections du filament prototype utilisé dans le cadre de ces travaux de recherche

Il est à noter des irrégularités au niveau du pourtour extérieur de chacune des sections (Figure 123). Dans le cadre de l'utilisation de filaments en tant que matériau d'apport, les deux critères liés à la qualité du processus de fabrication sont la tolérance du diamètre ($\pm 0,05$ mm dans le cadre de la production de filaments industriels) et la circularité du filament ($\geq 95\%$). Ces critères n'étant pas respectés, des irrégularités en termes de débit massique sont à prévoir lors de l'extrusion du filament renforcé [138], [139]. A titre de comparaison, le filament développé par Arevo a un pourtour sans irrégularités.

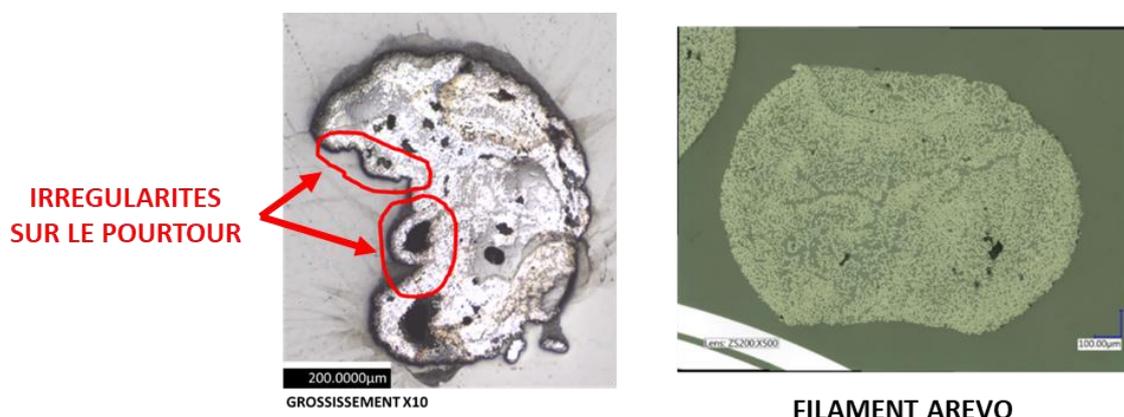


Figure 123 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, comparaison de la section du filament prototype avec la section du filament développé par l'entreprise Arevo

3.2.3.4. POROSITE

La porosité moyenne du filament prototype a été calculée et est à égale à 11,56%, ce qui est élevé comparé aux valeurs présentes au sein de la littérature scientifique [35], [140]. A titre de comparaison, le filament développé par l'entreprise AREVO comporte moins de 2% de porosités [128]. De plus, les microscopies laissent apparaître un filament fortement hétérogène : il y a présence de zones de porosité (Figure 124A), de zones riches en matrice (Figure 124B) et de zones riches en fibres (Figure 124C). La comparaison de la section du filament développé par l'entreprise AREVO (Figure 124D) avec le filament prototype utilisé dans le cadre de ces travaux de recherche permet de mettre en avant les éléments suivants :

- la répartition fibres – matrice est homogène à travers la section du filament AREVO tandis qu'elle est hétérogène au sein du filament prototype utilisé ;
- le pourtour du filament AREVO est exempt d'irrégularités géométriques tandis que le pourtour du filament utilisé est marqué par des irrégularités.

Ces éléments laissent à penser que le filament prototype pourrait être constitué de bandes de polymère thermoplastique renforcé de fibres continues repliées les unes sur les autres et extrudées à travers une filière cylindrique.

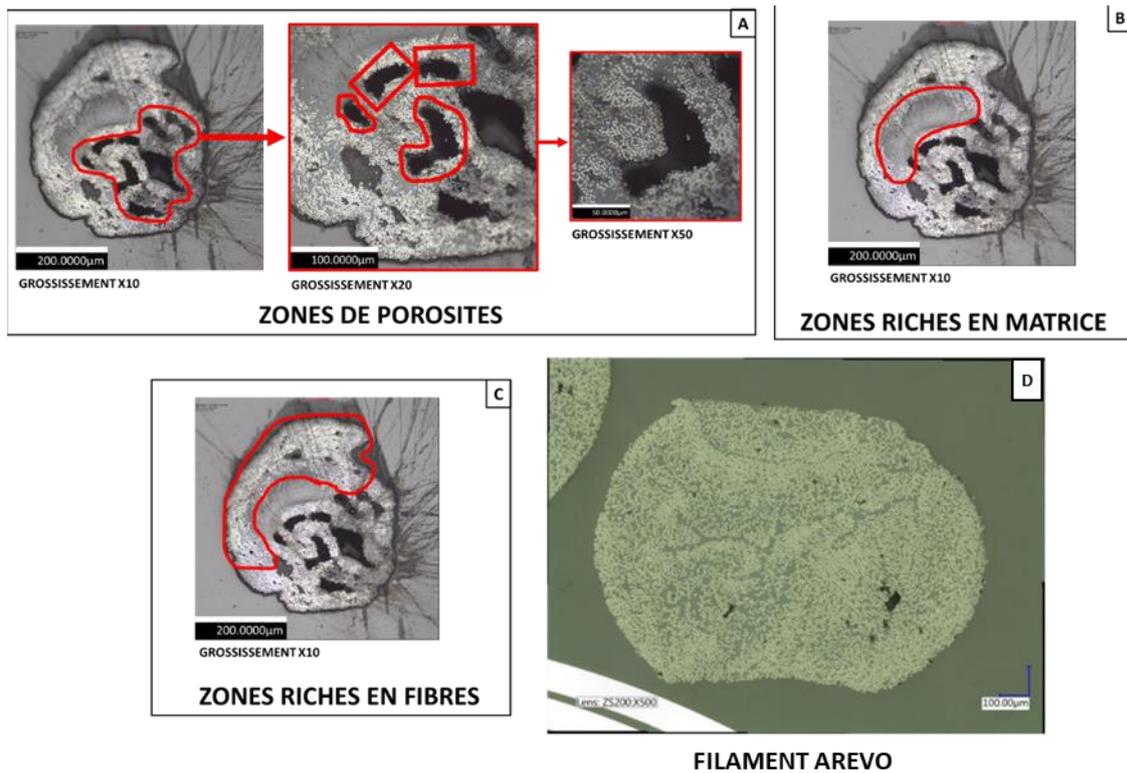


Figure 124 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, analyse des porosités au sein du filament prototype utilisé dans le cadre de ces travaux de recherche et comparaison avec le filament développé par l'entreprise Arevo

3.2.3.5. NATURE CHIMIQUE DE LA MATRICE

Une analyse calorimétrique, réalisée via l'utilisation d'une machine Netzsch DSC200 F3, a permis de précisément déterminer la famille de la matrice en polyamide. Les paramètres suivants ont été utilisés :

- la masse de l'échantillon analysé a été de 10 milligrammes ;
- le cycle thermique, répété deux fois afin d'effacer l'histoire thermique du matériau, a consisté en une chauffe de l'échantillon à 250°C pendant 5 minutes suivant des rampes de $\pm 10^\circ\text{C}/\text{min}$.

Les résultats de l'analyse calorimétrique sont présentés au sein de la Figure 125. Les enthalpies de fusion et de cristallisation sont respectivement de 34,23 et 32,9 J/g (la présence de fibres continues à l'intérieur de la matrice n'impacte pas les valeurs enthalpiques). La température de transition vitreuse est de 32,7°C, la température de fusion égale à 188,3°C et la température de cristallisation est de 161,4°C (la présence de fibres continues à l'intérieur de la matrice ne modifie pas les différentes températures de changements d'états). Ces résultats ont permis de déterminer avec certitude que la nature chimique de la matrice du filament renforcé était de type PA11 [141].

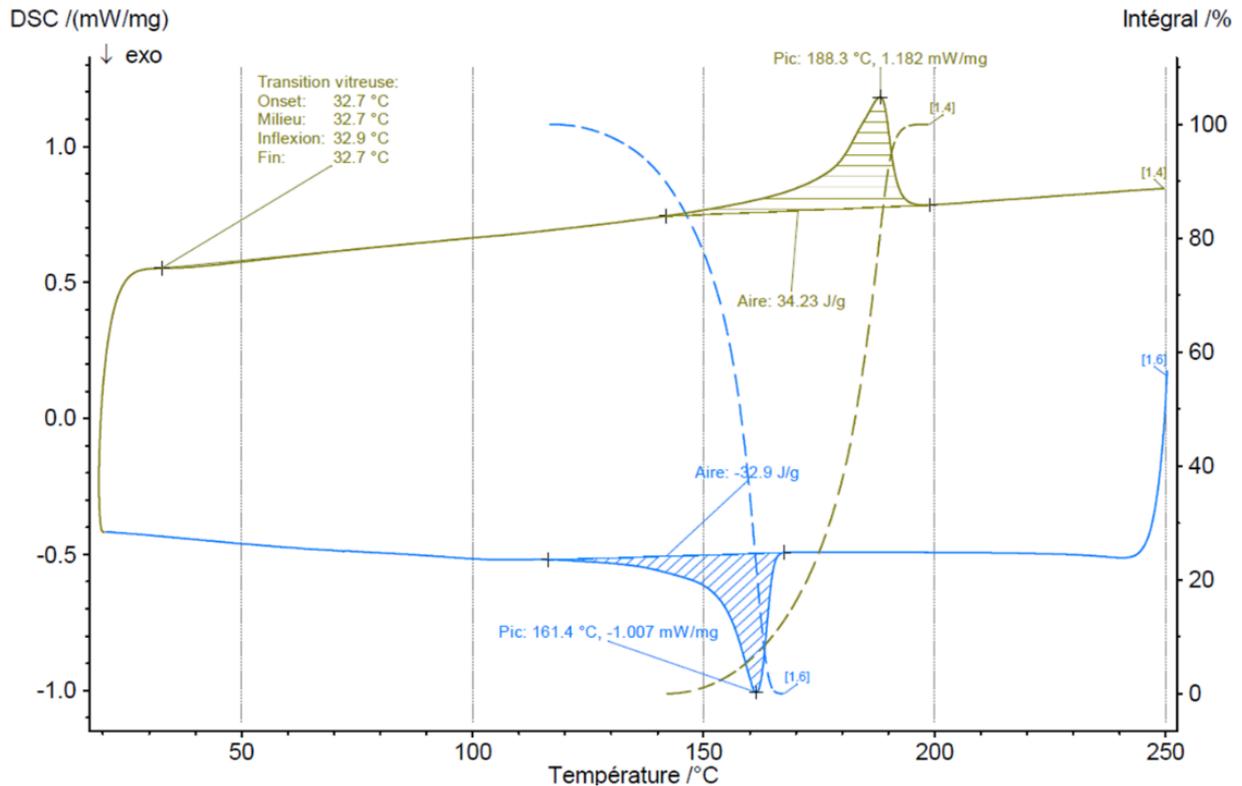


Figure 125 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, résultats de l'analyse calorimétrique concernant le filament prototype utilisé dans le cadre de ces travaux de recherche

3.2.3.6. FRACTION VOLUMIQUE DE FIBRES

Afin de calculer la fraction massique de fibres, un essai de calcination comportant plusieurs échantillons de filaments aléatoirement découpés a été réalisé. Deux résultats importants apparaissent alors : les fibres contenues au sein du filament prototype sont des fibres de carbone, comme la majorité des filaments renforcés mentionnés dans la littérature [35] ; la fraction volumique de fibres est de 71,44%. A titre de comparaison, le filament développé par l'entreprise AREVO a une fraction volumique de fibres égale à 50%. Le filament utilisé dans le cadre de ces travaux de recherche a donc une teneur en fibres de carbone élevée.

3.2.3.7. MASSE VOLUMIQUE

La masse volumique du filament a été calculée via la découpe de trois sections et l'utilisation de la méthode de la double pesée, présentée au sein de l'Equation 1, en utilisant les données présentées au sein du Tableau 3. La masse volumique moyenne du filament renforcé est de 1,286 g/cm³. A titre de comparaison, la masse volumique du filament développé par l'entreprise Markforged est de 1,2 g/cm³ [127]. La masse volumique du filament prototype est donc supérieure à la masse volumique du filament développé par Markforged, ce qui s'explique par une valeur en fibres de carbone supérieure (la masse volumique des fibres est supérieure à la masse volumique de la matrice).

$$\begin{aligned}
 &A = \text{Poids de l'échantillon dans l'air} \\
 &B = \text{Poids de l'échantillon dans le liquide auxiliaire} \\
 \rho &= \frac{A}{A - B} (\rho_0 - \rho_L) + \rho_L \quad \rho_0 = \text{Masse volumique du liquide auxiliaire} = 0,78874 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \text{ à } 20,7^\circ\text{C} \\
 &\rho_L = \text{Masse volumique de l'air} = 0,0012 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}
 \end{aligned}$$

Equation 1 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, calcul de la masse volumique du filament via la méthode de la double pesée

ECHANTILLON	A	B	ρ [g/cm ³]
1	0,4363	0,1686	1,285
2	0,4368	0,1697	1,289
3	0,4280	0,1663	1,289

Tableau 3 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, calcul de la masse volumique pour chaque échantillon de filament prototype utilisé dans le cadre de ces travaux de recherche

3.2.3.8. SYNTHÈSE SUR LES PROPRIÉTÉS DU FILAMENT RENFORCÉ

Le filament renforcé est composé d'une matrice en polyamide (PA11) et de renforts en fibres de carbone continues, la fraction volumique de fibres étant égale à 71,44%. Les différents filaments mentionnés au sein de la littérature scientifique ayant une fraction volumique de fibres autour de 50% [35], cette valeur est élevée. Cette forte quantité de renforts permettra de considérablement renforcer les structures recouvertes mais à l'opposé, une proportion de matrice minimale est nécessaire afin d'assurer l'adhésion entre la couche de renforcement et les parois extérieures de l'entité visée par l'opération de renforcement ; les essais de renforcement à base de filament renforcé de fibres continues, présentés dans la partie suivante, nous permettront de statuer sur ce point.

Le pourtour des sections du filament renforcé n'est pas cylindrique et présente de fortes irrégularités. En comparaison, le filament Arevo présente des pourtours circulaires. Ces irrégularités risquent d'entraîner une extrusion de matière à débit non constant. La répartition fibres / matrice est inhomogène à travers les sections étudiées par microscopie et la porosité est importante (11,56%). A titre de comparaison, le filament développé par l'entreprise AREVO a une répartition fibres / matrice homogène à travers sa section et une porosité moyenne inférieure à 2%. La masse volumique du filament est de 1,286 g/cm³, ce qui est légèrement plus élevé que le filament développé par l'entreprise Markforged. Cela s'explique par une fraction volumique de fibres plus élevée (71,44% contre 50%). Le Tableau 4 résume les données précédemment présentées.

	GEOMETRIE DES SECTIONS	POROSITE (%)	NATURE DE LA MATRICE	FRACTION VOLUMIQUE DE FIBRES (%)	NATURE DES FIBRES	REPARTITION FIBRES / MATRICE	MASSE VOLUMIQUE (g/cm ³)	
FILAMENT PROTOTYPE	Ovales, irrégulières	11,56	PA11	71,44	Carbone	Hétérogène	1,286	(DONNEES MESUREES)
FILAMENT AREVO	Cylindriques, régulières	2	PEEK	50	Carbone	Homogène	Non communiqué	(DONNEES FOURNIES)

Tableau 4 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, synthèse des propriétés du filament renforcé utilisé dans le cadre de ces travaux et du filament développé par Arevo

Pour conclure, le filament renforcé ne possède pas pour le moment de caractéristiques permettant d'affirmer que son processus de fabrication est fiable et maîtrisé. Ce résultat s'explique par l'aspect « prototype » du matériau. Il est important de noter que ce dernier est le résultat d'un premier essai de développement et qu'il sera, par la suite, amélioré suite aux retours liés à son utilisation. Dans les parties suivantes, la caractérisation mécanique du filament renforcé sera développée et des stratégies de renforcement à partir du filament renforcé prototypes seront mises en avant.

3.2.3.9. CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DU FILAMENT RENFORCÉ

Le matériau polymère thermoplastique à matrice de type PA11 renforcé de fibres de carbone continues a été précédemment analysé. Dans cette partie, nous évaluerons ses caractéristiques mécaniques le long de sa direction de dépôt. Ces éléments sont nécessaires afin de paramétrer par la suite les opérations de renforcement via la réalisation d'études de simulation mécanique. Afin de réaliser la caractérisation, on cherche à réaliser des éprouvettes de traction de norme EN ISO 527-5 (Figure 126A). Les trajectoires de fabrication seront réalisées de manière à ce que les fibres continues de carbone soient colinéaires à la direction de sollicitation mécanique (Figure 126B).

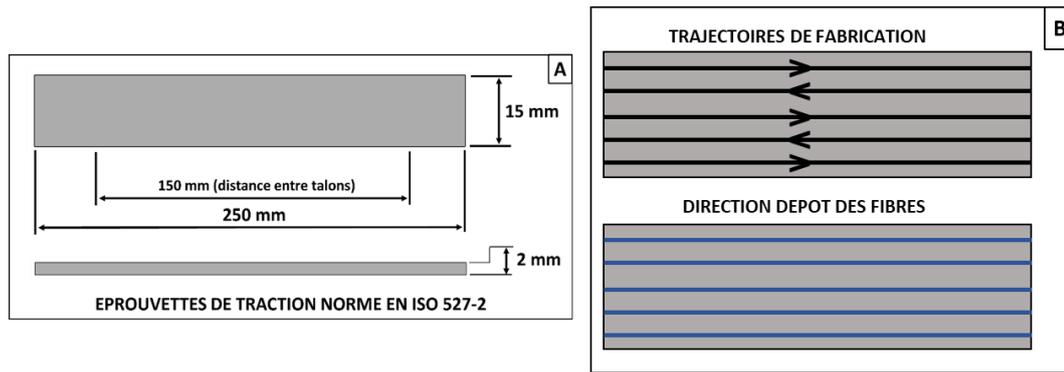


Figure 126 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, éprouvettes de norme EN ISO 527-5, dimensions et trajectoires de fabrication

Malheureusement, la fabrication des éprouvettes n'a pas pu être achevée et ce malgré de multiples tentatives de réalisation (Figure 127). L'extrusion de matériau a été stoppée par le gonflement et la décohésion du filament renforcé de fibres continues au sein de la buse d'injection de la tête de dépose.

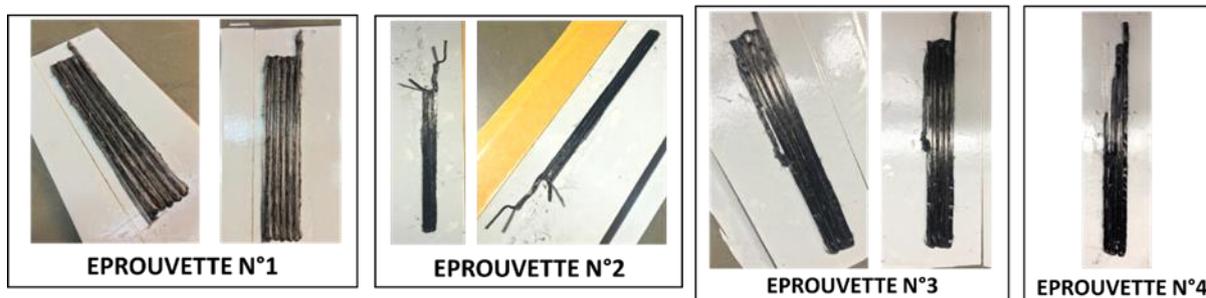


Figure 127 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, caractérisation du matériau non abouti

Au sein de la littérature scientifique, la question du gonflement des filaments chargés n'est pas traitée. L'hypothèse pour expliquer ce comportement est la suivante :

- dû à l'existence d'un fort taux de porosité, la rigidité du filament stocké à l'état solide est faible, ce qui empêche ce dernier d'exercer une pression suffisante afin d'extruder le filament qui se trouve au sein de la buse d'injection. En effet, c'est le filament solide qui, entraîné par le mécanisme, fait office de piston continu permettant au filament fondu qui se trouve en sortie de buse d'injection d'être extrudé ;
- ensuite, la cohésion globale du filament est faible. Ce dernier ne semble pas se comporter comme un élément homogène mais comme une somme d'éléments faiblement maintenus entre eux, se délitant sous l'effet de la chaleur et la pression présentes dans la buse d'injection.

Par conséquent, les essais de caractérisation du filament renforcé n'ont pas pu être achevés mais des opérations de renforcement, présentées dans la partie qui suit, vont malgré tout être réalisées pour valider l'approche du renforcement à partir d'un matériau polymère thermoplastique renforcé de fibres continues.

3.2.3.10. REALISATION DES STRATEGIES DE RENFORCEMENT

Le protocole utilisé afin de réaliser la stratégie de renforcement à partir d'un filament renforcé de fibres continues est le même que celui présenté au sein de la partie précédente (renforcement à base de polymère sans renforts et renforcés de fibres courtes). Le matériau utilisé afin de réaliser l'opération volumique est de type PA11, ce qui garantit la compatibilité chimique entre les éprouvettes et les couches de renforcement. Malheureusement, les stratégies de renforcement n'ont pas pu être menées à terme : l'adhésion entre les faces des éprouvettes et les couches de renforcement n'a pas été possible.

En comparant ces résultats avec ceux obtenus lors du renforcement à base de polymère sans renforts et renforcé de fibres courtes et en se basant sur la littérature scientifique, nous faisons l'hypothèse suivante : la part de matrice au sein du filament renforcé étant faible au niveau des pourtours du filament, il n'y a pas d'interpénétration des macromolécules de la couche de renforcement vers leur substrat (faces des éprouvettes) et inversement.

Afin de pallier le manque de matrice au sein du filament, il a été décidé de mettre en place un montage expérimental permettant de mélanger le filament prototype, renforcé de fibres continues, à un ou plusieurs filaments de PA11. Ce faisant, la proportion de matrice ayant augmenté, il deviendrait possible de réaliser un renforcement à partir d'un filament renforcé de fibres continues. Nous pourrions également faire varier le taux de fibres en fonction des filaments utilisés. Pour ce faire, une buse d'injection pouvant chauffer et extruder jusqu'à cinq filaments de polymère thermoplastique en même temps (Figure 128), a été conçue dans le cadre d'un projet en lien avec la fabrication multi-matériaux et reliée à un ensemble de cinq extrudeuses permettant d'entraîner les filaments.

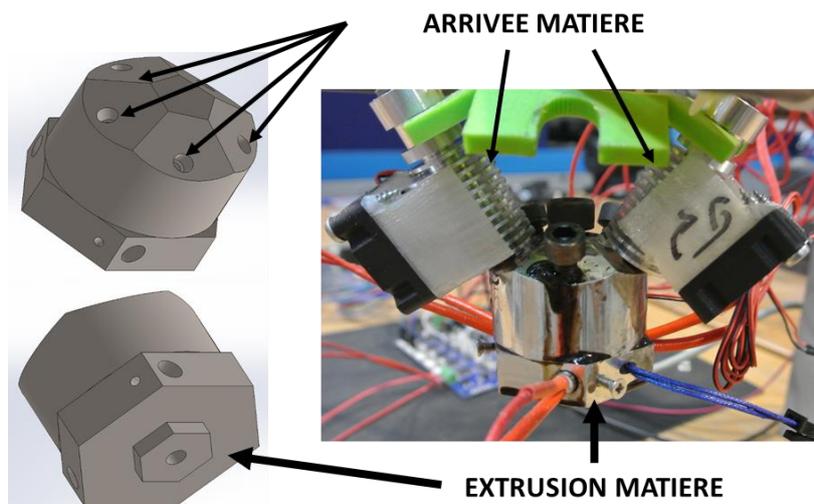


Figure 128 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, buse d'injection permettant l'extrusion de plusieurs filaments simultanément

Dans un premier temps, deux filaments de polymère sans renforts chauffés et extrudés simultanément ont permis de valider le fonctionnement du montage expérimental. Dans un second temps, le filament prototype et un filament de PA11 sans renforts ont été extrudés simultanément : encore une fois, les problématiques de décohésion du filament au sein de la buse d'injection sont apparues et le filament n'a pas pu être extrudé. De plus, la faible rigidité du filament limite son entraînement par des extrudeuse, ce dernier étant sujet à du flambement. L'impact d'un accroissement de la quantité de matrice sur l'adhésion entre la couche de renforcement et son substrat n'a pas pu être évalué.

3.2.3.11. CONCLUSION SUR LE RENFORCEMENT A PARTIR DE MATERIAUX RENFORCE DE FIBRES CONTINUES

Comme les propriétés mécaniques intrinsèques en traction des matériaux polymères thermoplastiques sans renforts et renforcés de fibres courtes sont faibles, nous avons décidé de développer un axe de recherche concernant la mise en place de stratégies de renforcement à partir de matériaux polymères thermoplastiques renforcés de fibres continues. Dans le cadre de ces travaux de recherche, nous avons choisi d'utiliser un matériau prototype à matrice polyamide renforcé de fibres continues qui a été développé dans le cadre d'une collaboration avec l'Université de Pau et le docteur Anaïs Barasinski, livré sous forme de filament et stocké sur une bobine. L'analyse des caractéristiques du filament prototype a mis en lumière sa forte porosité, une faible hétérogénéité de la répartition entre les fibres et la matrice à travers ses sections et le manque de matrice sur ses pourtours extérieurs. Par la suite nous avons tenté sans succès des essais de caractérisation et la mise en place de stratégies de renforcement avec le matériau.

Les analyses et essais réalisés ont permis de mettre en avant les éléments suivants, essentiels au bon déroulement du procédé de fabrication :

- le filament doit avoir une porosité faible. En effet, la présence de macroporosités à l'intérieur du filament pousse ce dernier à se déliter au sein de la buse d'injection sous l'effet de la chaleur. Les macroporosités diminuent également la rigidité du filament, qui devient sensible au flambement, ce qui empêche le processus d'extrusion (Figure 129A). Par ailleurs, une faible porosité est nécessaire afin de conférer de fortes propriétés mécaniques aux couches de renforcement déposées ;
- le filament doit avoir un diamètre constant. Lorsque ce n'est pas le cas, le débit de masse varie et les dimensions des cordons déposés ne respectent pas les dimensions paramétrées ;
- le pourtour du filament doit être enrobé de matrice afin de permettre l'adhésion avec les cordons adjacents (Figure 129B).

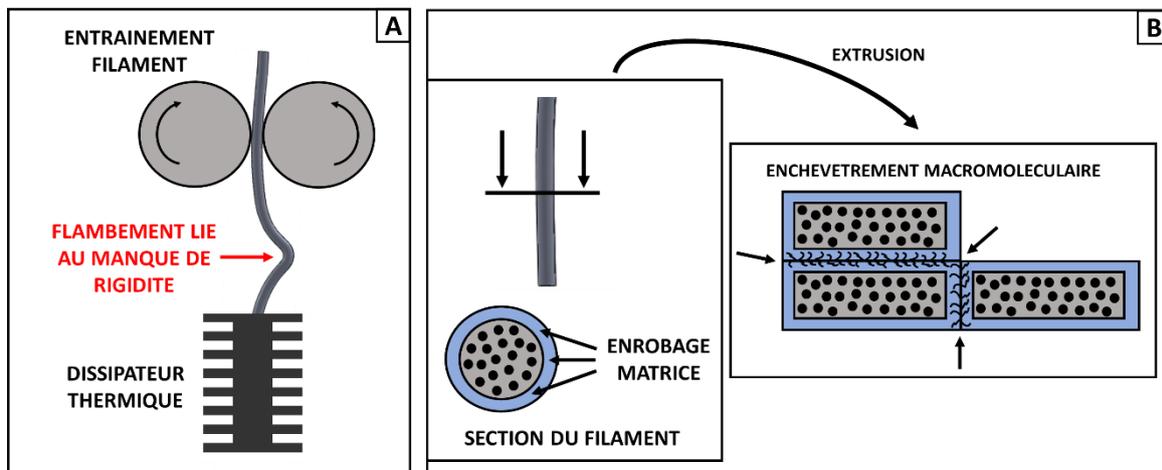


Figure 129 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions,

Le processus de fabrication du filament sera dans le futur optimisé en se basant sur les éléments précédemment mentionnés.

3.3.3. CONCLUSION SUR LES STRATEGIES DE RENFORCEMENT

Les stratégies de renforcement ont pour objectif de pallier la problématique d'anisotropie des propriétés mécaniques d'un composant ou d'une entité inhérente au procédé en recouvrant tout ou partie des parois extérieures d'un volume bâti par une stratégie volumique de couches minces de matière. Les trajectoires des couches de matière déposées sont orientées de manière à ce que l'anisotropie des couches de renforcement pallie l'anisotropie du composant bâti par une stratégie volumique.

Dans cette partie, nous avons d'abord réalisé une étude de la littérature scientifique. Plusieurs solutions y ont été mises en place afin d'outrepasser la problématique d'anisotropie liée au procédé : « Z-pinning » [2], « post-tensionning » [124], recuit [125] ou encore radiations ionisantes. L'approche choisie est de type « génération de trajectoires » et met en place des stratégies de renforcement telles que précédemment présentées. Ces dernières représentent un axe de recherche novateur qui n'est pas évoqué au sein de la littérature scientifique.

Nous avons ensuite présenté une méthodologie de mise en place des stratégies de renforcement intégrant l'utilisation de la simulation par éléments finis. En fin de chapitre, un cas d'application de cette dernière sera réalisé et présenté (hyperboloïde avec stratégie de renforcement).

Puis nous avons mis en place des stratégies de renforcement sur trois composants différents : des éprouvettes de traction (norme ASTM D638 TYPE4), une poutre creuse à section carrée, une pale extraite de l'hélice réalisée dans le cadre des cas d'application de la méthodologie de préparation à la

fabrication. Ces derniers ont été bâtis avec et sans stratégies de renforcement (en prenant soin de conserver des dimensions similaires). Les éprouvettes de traction ont été soumises à des sollicitations de traction et les résultats obtenus dans le cadre des éprouvettes sollicitées en traction ont permis de valider l'apport de la stratégie de renforcement.

Après, nous avons développé un axe de recherche concernant la réalisation de stratégies de renforcement à partir de matériau polymère thermoplastique renforcé de fibres continues. Ce sujet étant un domaine de recherche récent et novateur, il n'est pas possible d'utiliser un matériau disponible à la vente. Par conséquent, nous avons choisi d'utiliser un matériau prototype à matrice polyamide renforcé de fibres continues développé dans le cadre d'une collaboration avec l'Université de Pau. Ce dernier a été analysé, caractérisé et des stratégies de renforcement ont été essayées. Malheureusement, les essais de caractérisation et de renforcement n'ont pas pu être réalisés car le filament se délite au sein de la buse d'injection ce qui empêche son extrusion. Le processus de fabrication du filament prototype devra être optimisé et de nouveaux essais seront réalisés dans le cadre de futurs travaux. Par ailleurs, les stratégies de renforcement représentent un axe de recherche qui doit être développé à l'avenir afin de gagner en maturité. Dans la perspective de ces travaux de recherche il faudra développer la mise en place de modèles de simulation par éléments finis qui permettent de paramétrer l'orientation des trajectoires de fabrication sur chacune des couches de renforcement en fonction de sollicitations simples ou composées. La partie suivante est dédiée au développement des stratégies de parachèvement ayant pour but l'obtention de surfaces conformes à des contraintes dimensionnelles, géométriques ou d'état de surface.

3.4. STRATEGIES DE PARACHEVEMENT

Les stratégies de parachèvement ont pour but l'obtention de surfaces conformes à des contraintes dimensionnelles, géométriques ou d'état de surface. Elles consistent à retirer, via l'utilisation d'un outil coupant, le surplus de matière volontairement ajouté à certaines surfaces extérieures de la maquette numérique lors de l'étape de mise en position du composant (Figure 130). Les trajectoires générées dans le cadre des stratégies de parachèvement sont de type soustractives.

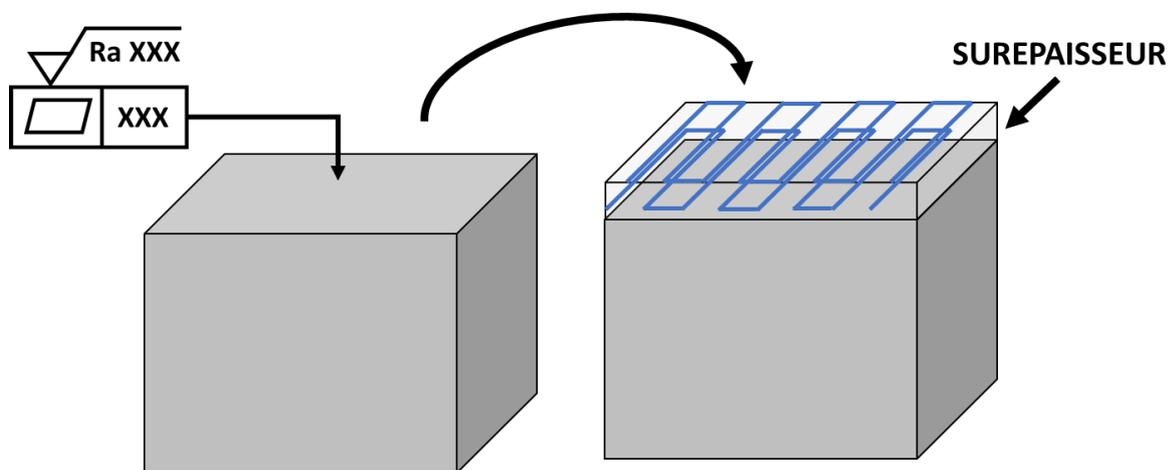


Figure 130 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, opération de parachèvement

Lorsqu'une stratégie de parachèvement est combinée à une stratégie volumique, le processus de fabrication est appelé hybride, car mélangeant un procédé additif avec un procédé soustractif. Au sein de la littérature scientifique, les stratégies de parachèvement ont été plusieurs fois évoquées :

- Chesser et al. [142] ont utilisé des opérations de parachèvement, afin de réaliser des empreintes de moules de grandes dimensions destinés à réaliser des pièces en matériaux composites (Figure 131A) ;
- Li et al. [103] ont développé une plateforme de fabrication hybride afin de réaliser des composants à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus permettant de réduire le

temps de cycle de fabrication et de fabriquer des pièces avec une meilleure qualité de surface en éliminant les défauts engendrés par l'effet escalier (Figure 131B) ;

- L'entreprise Thermwood a utilisé une opération de parachèvement afin d'obtenir l'empreinte d'un moule destiné à la production de coques de bateaux (Figure 131C).

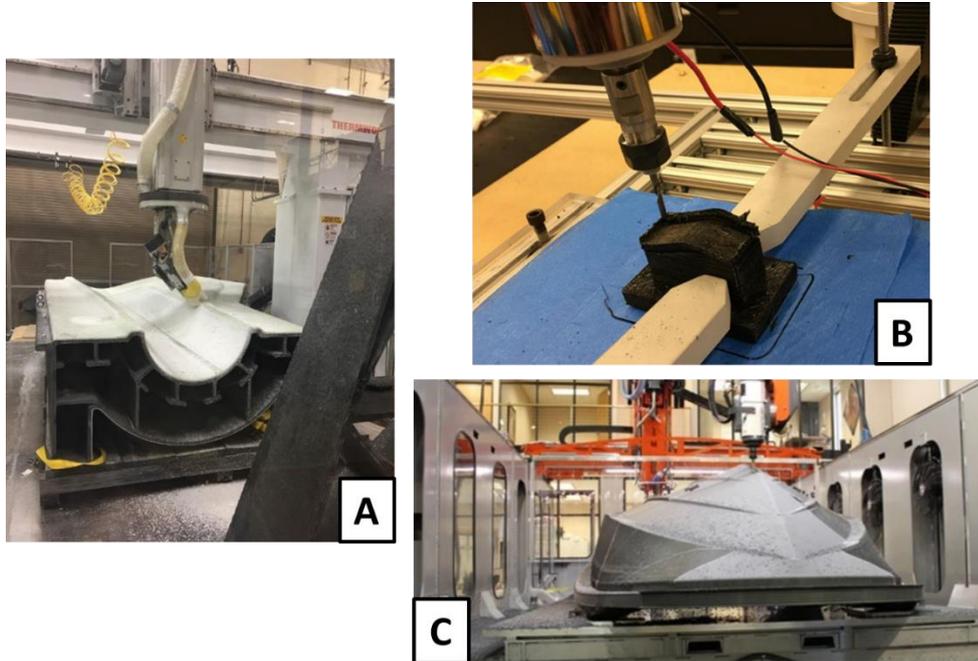


Figure 131 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, opérations de parachèvement mentionnées au sein de la littérature scientifique

Les stratégies de parachèvement, bien qu'intégrées à la méthodologie de préparation à la fabrication, n'ont pas été développées dans le cadre de ces travaux de recherche. Elles représentent un axe de développement qui sera investigué dans le cadre de futurs travaux et aura pour objectif d'utiliser et d'adapter les éléments existants dans la littérature concernant l'usinage de pièces métalliques [143]–[145].

4. DEVELOPPEMENT DES CAS D'APPLICATION

Dans cette partie, les cas d'applications présentés au sein du chapitre 1 et mis en position et sectionnés au sein du chapitre 2 (fémur, chaise, lame de sabre, pale d'éolienne, hyperboloïde, hélice) se verront appliquer les stratégies de fabrication présentées au sein de ce chapitre. Les stratégies volumiques et de renforcement seront déroulées suivant les méthodologies développées dans le cadre de ces travaux et paramétrées en fonction du cahier des charges de chacun des composants.

4.1. MISE EN PLACE DES STRATEGIES VOLUMIQUES

4.1.1. STRATEGIES VOLUMIQUES UTILISEES AFIN DE REALISER L'HYPERBOLOIDE, LA PALE D'EOLIENNE ET LE FEMUR

L'hyperboloïde est un composant de type coque, réalisée afin de paramétrer une stratégie de renforcement. Les trajectoires générées sur chacune de ses sections sont de type concentriques (une seule passe) et les cordons déposés sont d'une largeur égale à 3 mm (Figure 132A). La pale d'éolienne a été réalisée afin de devenir un démonstrateur visuel. Aussi cette dernière n'a-t-elle pas fait l'objet d'une stratégie de remplissage. Les trajectoires générées sur chacune des sections sont de type concentrique et les cordons déposés sont d'une largeur égale à 3 mm (Figure 132B). La stratégie de remplissage du fémur a été paramétrée de manière à ce que ce dernier ait une masse égale à la masse moyenne d'un fémur féminin (290 grammes). La figure géométrique choisie est un carré de côté 3 mm et la largeur des cordons déposés est égale à 0,3 mm (Figure 132C).

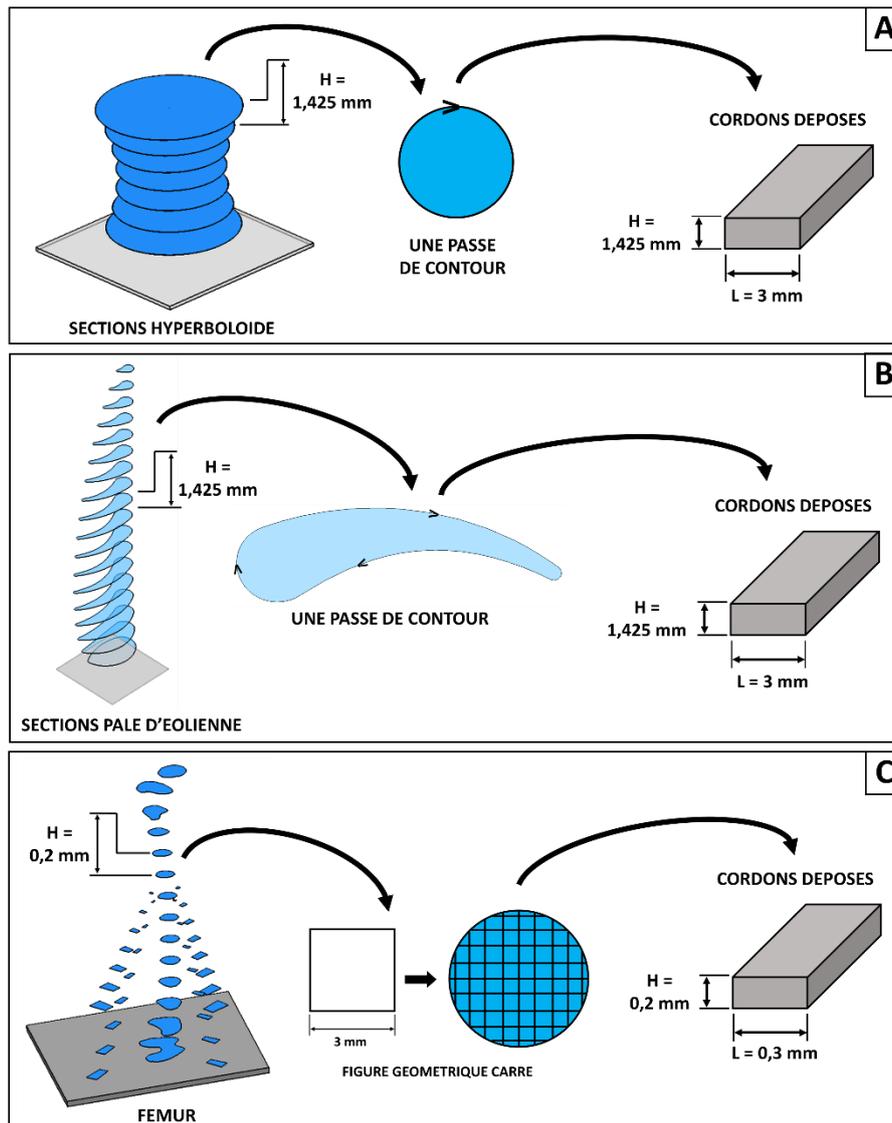


Figure 132 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, stratégies volumiques réalisées pour l'hyperboloïde et la pale d'éolienne

4.1.2. STRATEGIE VOLUMIQUE MISE EN PLACE AFIN DE REALISER L'HELICE

Deux stratégies de fabrication volumiques ont été mises en place afin de réaliser l'hélice :

- une 1^{ère} stratégie de fabrication afin de réaliser le moyeu (entité V_1) (Figure 133A) ; des trajectoires concentriques et des cordons de largeur égale à 0,3 mm ont été déposés ;
- une seconde stratégie de fabrication afin de réaliser les pales de l'hélice (entités V_2 , V_3 et V_4) (Figure 133B).

Le composant étant destiné à devenir un démonstrateur visuel, ce dernier n'est pas contraint par un cahier des charges mécanique. La paramétrisation de la stratégie de remplissage n'a pas été réalisée.

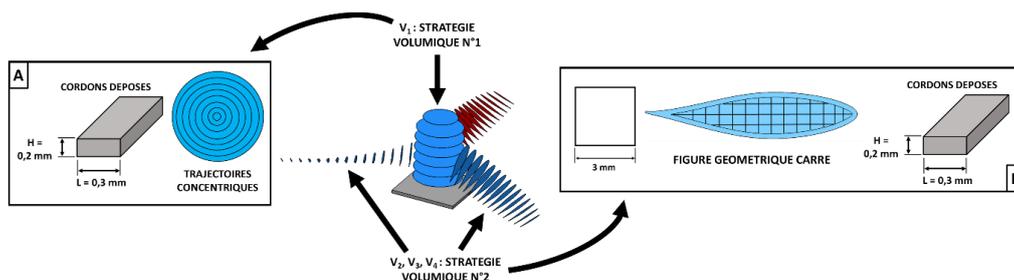


Figure 133 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, stratégies volumiques réalisées pour l'hélice

4.1.3. STRATEGIE VOLUMIQUE MISE EN PLACE AFIN DE REALISER LA CHAISE

En ce qui concerne la chaise, nous avons choisi pour des raisons esthétiques de ne pas générer les trajectoires des premières et dernières sections du composant afin de laisser la stratégie de remplissage apparente. Seules les trajectoires des sections intermédiaires seront réalisées. Le composant étant soumis à un cahier des charges mécanique, une stratégie de remplissage a été paramétrée via la réalisation d'une étude par éléments finis.

A. MISE EN PLACE DU MODELE PAR ELEMENTS FINIS

Le modèle par éléments finis utilisé dans le cadre de l'étude a d'abord été mis en place (Figure 134A). Afin de simplifier le problème, le composant a été réduit à une couche d'épaisseur unitaire (1 mm suivant l'axe Z). Ainsi, les déformations suivant l'axe Z sont négligées et un état de contraintes homogène dans la direction Z est supposé (non calculé). Le matériau utilisé dans le cadre de la réalisation du composant étant le PLA, les propriétés matériau utilisées dans le cadre de l'étude sont les suivantes : le matériau est considéré comme homogène et isotrope, le module d'élasticité est de 3250 MPa et le coefficient de Poisson égal à 0,36. Les conditions aux limites et de chargement sont les suivantes : la partie inférieure de la chaise, en contact avec le sol, a été bloquée suivant les axes X et Y.

B. PARAMETRAGE INITIAL DE LA STRATEGIE DE REMPLISSAGE

Ensuite, un paramétrage initial de la stratégie de remplissage a été réalisé (Figure 134B). Afin de faciliter la paramétrisation du problème, la largeur des cordons déposés a été fixée à 3 mm. La figure géométrique choisie est de type triangles isocèles, une valeur initiale de l'angle α égale à 120° a été renseignée.

C. CONDITIONS DE CHARGEMENT

Les conditions de chargement sont les suivantes (Figure 134C) : la chaise devra être capable de résister à une charge de 80 kilogrammes suivant la direction opposée à l'axe Y à laquelle est ajouté un facteur de sécurité égal à 50% de la charge. La charge totale supportée par la chaise sera donc égale à 120 kilogrammes (1200N). L'assise de la chaise ayant des dimensions égales à 410 par 395 mm, la pression appliquée par unité de surface est égale à $0,7 \text{ N/mm}^2$ sur l'assise du modèle étudié (Équation 2).

$$q = \frac{1200 \text{ N}}{410 \text{ mm} \times 395 \text{ mm}} = 0,007 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Équation 2 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondu, charge appliquée sur l'assise de la chaise

Les résultats ont été calculés (Figure 134D) et analysés suivant les contraintes présentes à l'intérieur du matériau suivant le critère de Von Mises (Équation 3). Les contraintes doivent être inférieures à la limite d'élasticité du matériau utilisé afin de réaliser le composant (PLA, 60Mpa).

$$\sigma_{\text{éq.VM}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{13}^2)}$$

Équation 3: critère de Von Mises

D. VALIDATION DE LA STRATEGIE DE REMPLISSAGE

Plusieurs itérations sur la valeur de l'angle α ont été réalisées (Figure 134E). Finalement, la valeur de l'angle α pour laquelle la charge est supportée par la chaise est égale à 80° (Figure 134F). Avec ce paramétrage, les contraintes internes au sein de la structure sont comprises entre -25 et 20 MPa, ce qui est inférieur à la limite d'élasticité du matériau utilisé (PLA, 60 MPa). Le paramétrage de la stratégie de remplissage est achevé.

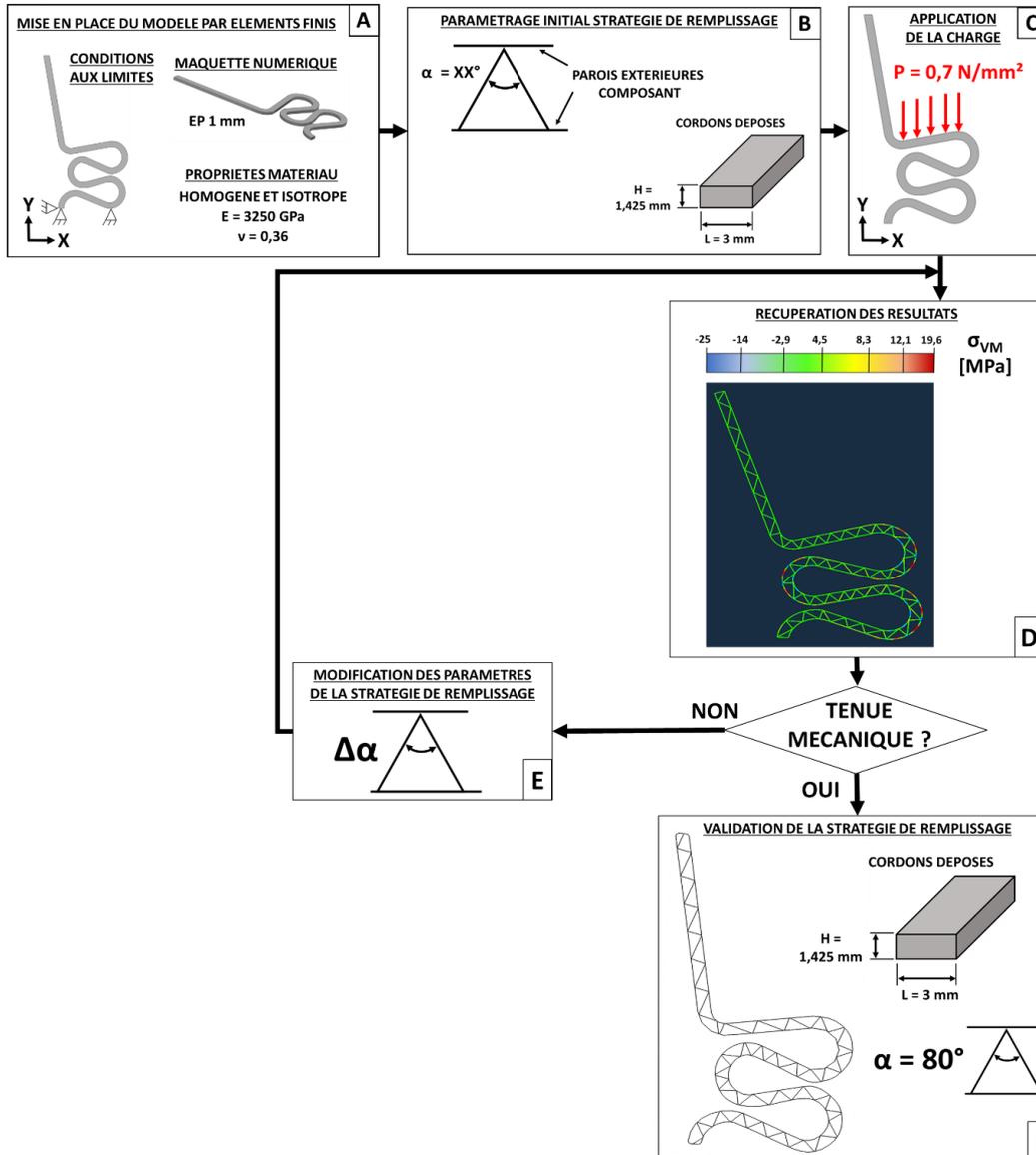


Figure 134 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondu, mise en place de la stratégie de remplissage de la chaise

Cette étude nous a permis de réaliser une première application de paramétrage d'une stratégie de remplissage afin de réaliser un composant de grandes dimensions : les trajectoires générées permettront à la chaise de supporter une charge de 120 kilos sur son assise. Afin de réaliser l'étude, le composant a été réduit à une section d'épaisseur égale à 1 mm. Le matériau utilisé est un PLA homogène et isotrope, le motif de remplissage déterminé est de type triangles isocèles.

Une étude avec un paramétrage initial de l'angle α égal à 120° a d'abord été réalisée et les résultats obtenus ont mis en évidence le besoin de paramétrer une valeur angulaire plus faible. Par la suite, plusieurs itérations sur la valeur de l'angle α ont été réalisées. Pour une valeur de l'angle α inférieure ou égale à 80° , les contraintes internes au composant restent en deçà de la limite d'élasticité du matériau suivant le critère de Von Mises. Par conséquent, une stratégie de remplissage avec une valeur de l'angle

α égale à 80° a été choisie. Dans le chapitre suivant, la chaise sera réalisée suivant la stratégie volumique décrite ici.

4.1.4. STRATEGIE VOLUMIQUE MISE EN PLACE AFIN DE REALISER LA LAME DE SABRE

Comme le composant, réplique d'un modèle historique, est destiné à être exposé dans un musée, il ne sera pas soumis à des sollicitations mécaniques pendant son service. Néanmoins, sa géométrie longue et élancée le rend sensible aux sollicitations en flexion suivant la direction Y (Figure 135A). Il apparaît alors nécessaire de mettre en place une stratégie de remplissage permettant d'améliorer la résistance en flexion du composant (Figure 135B).

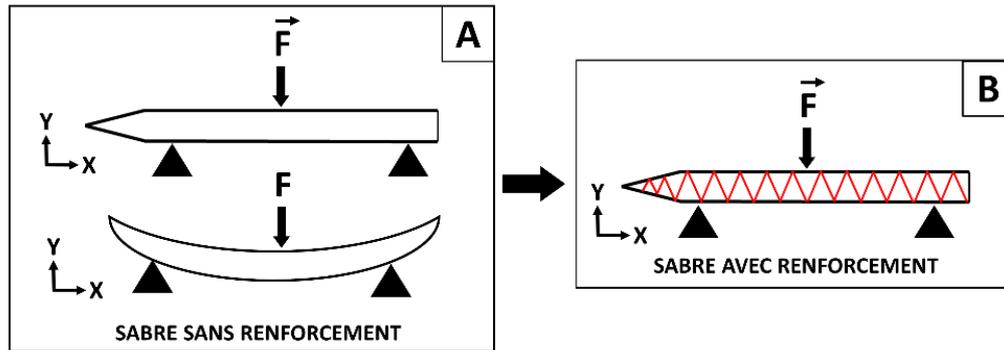


Figure 135 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondu, déformations du sabre sous une charge de flexion avec et sans stratégie de renforcement

Afin de paramétrer la stratégie de remplissage du sabre, nous utiliserons la méthodologie développée au sein de la partie 3.1.

A. MISE EN PLACE DU MODELE PAR ELEMENTS FINIS

Afin de paramétrer la stratégie de remplissage du sabre, un élément représentatif d'une longueur de 90 mm a été extraite de la maquette numérique (Figure 136A).

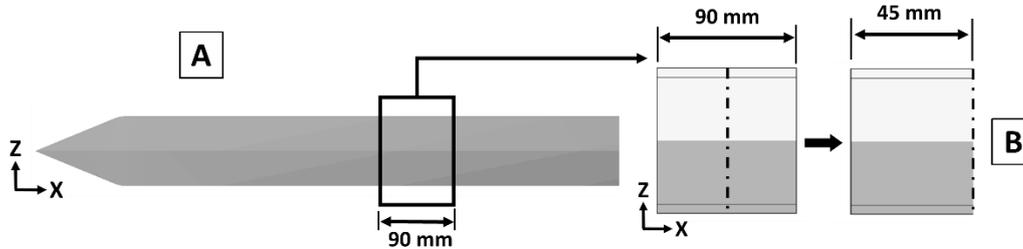


Figure 136 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondu, élément représentatif du composant utilisée afin de réaliser l'étude par éléments finis

Le matériau utilisé afin de réaliser le composant étant le PLA, ses propriétés sont les suivantes : le matériau est considéré comme homogène et isotrope, le module d'élasticité est de 3250 MPa et le coefficient de Poisson égal à 0,36. La section du composant a été symétrisée suivant un plan YZ passant par le centre de l'élément suivant l'axe X, ce qui permet ainsi de réduire sa longueur de moitié (section d'une longueur de 45 mm, Figure 136B).

Les conditions aux limites du problème sont les suivantes :

- blocage du point d'appui de l'essai de flexion suivant l'axe Y (Figure 137A) ;
- blocage de la surface de symétrie suivant le plan YZ (Figure 137B) ;
- blocage de la ligne inférieure suivant l'axe Z (Figure 137C).

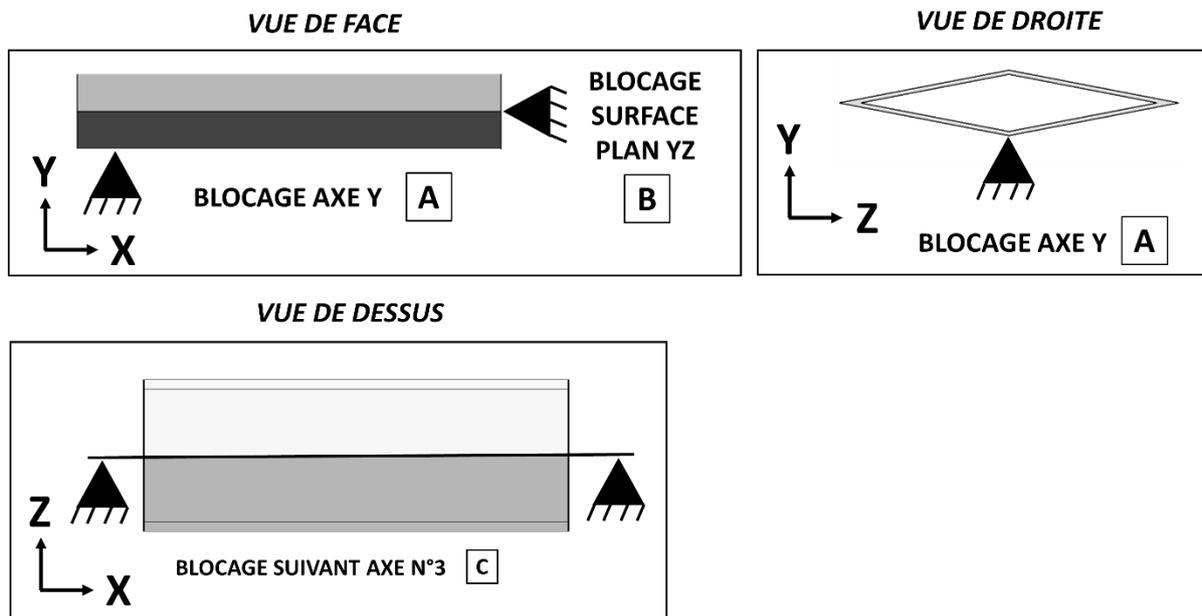


Figure 137 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondu, conditions aux limites et conditions de l'étude

B. PARAMETRAGE INITIAL DE LA STRATEGIE DE REMPLISSAGE

Afin de faciliter la paramétrisation, la dimension des cordons de polymères déposés a été fixée à 0,6 mm de large (Figure 138A). L'épaisseur des cordons déposés sera, quant à elle, égale à 0,3 mm, ce qui correspond à la distance entre les sections. La figure géométrique choisie afin de réaliser le renforcement est de type « triangle isocèle » et des itérations sur la valeur de l'angle α égal seront réalisées (Figure 138B).

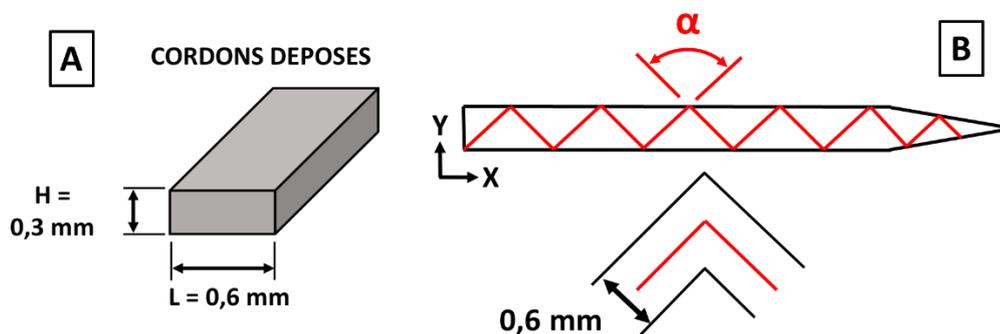


Figure 138 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondu, paramétrage initial de la stratégie de remplissage de la lame de sabre

Afin de mettre en évidence le besoin d'ajouter des trajectoires de remplissage, un paramétrage initial sans remplissage a été fait.

C. CONDITIONS DE CHARGEMENT

Une charge de 16 Mpa, représentative d'un effort subi par le composant lors de sa manipulation, a été appliquée au point d'application de la force.

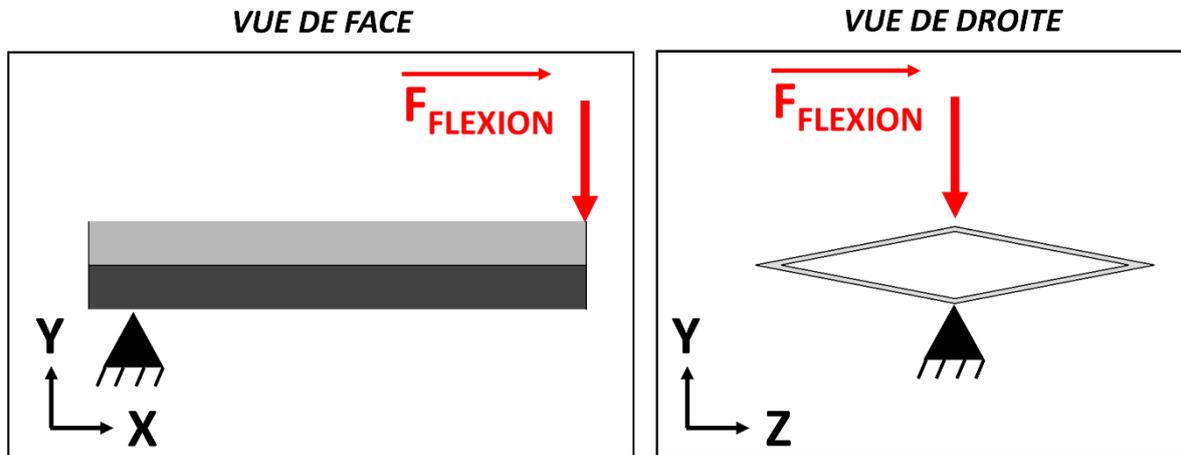


Figure 139 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondu, chargement appliqué lors de l'étude

Les résultats ont été calculés (Figure 134D) et analysés suivant les contraintes présentes à l'intérieur du matériau suivant le critère de Von Mises (Équation 3). Afin de valider une stratégie de remplissage, il faudra que les contraintes internes à l'élément représentatif restent inférieures à la limite d'élasticité du matériau utilisé afin de réaliser le composant (PLA, 60Mpa).

D. ANALYSE DES RESULTATS ET PARAMETRAGE DE LA STRATEGIE DE REMPLISSAGE

Sans stratégie de remplissage, le composant s'écrase et les contraintes internes excèdent la limite d'élasticité du matériau suivant le critère de Von Mises (PLA, 60Mpa) (Figure 140).

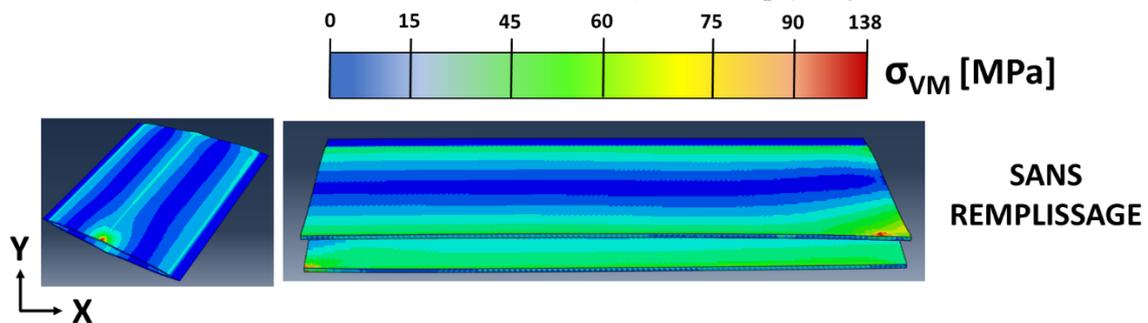


Figure 140 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondu, contraintes au sein de l'élément représentatif du sabre soumis à une sollicitation de flexion suivant le critère de Von Mises et α égal à 60 degrés

Il paraît donc nécessaire de mettre en place une stratégie de remplissage. Plusieurs itérations sur la valeur de l'angle α ont été réalisées : α égal à 15, 30, 45 et 60°. Lorsque l'angle α est égal à 60°, les contraintes internes excèdent la limite d'élasticité du matériau suivant le critère de Von Mises (PLA, 60Mpa). Lorsque l'angle α est inférieur ou égal à 45°, les contraintes dans l'élément représentatif sont en deçà de la limite d'élasticité suivant le critère de Von Mises (Figure 141). La valeur d'un angle α égal à 45° a donc été choisie : cela permet de minimiser la quantité de matière déposée, de diminuer les coûts et le temps nécessaire à la fabrication du composant.

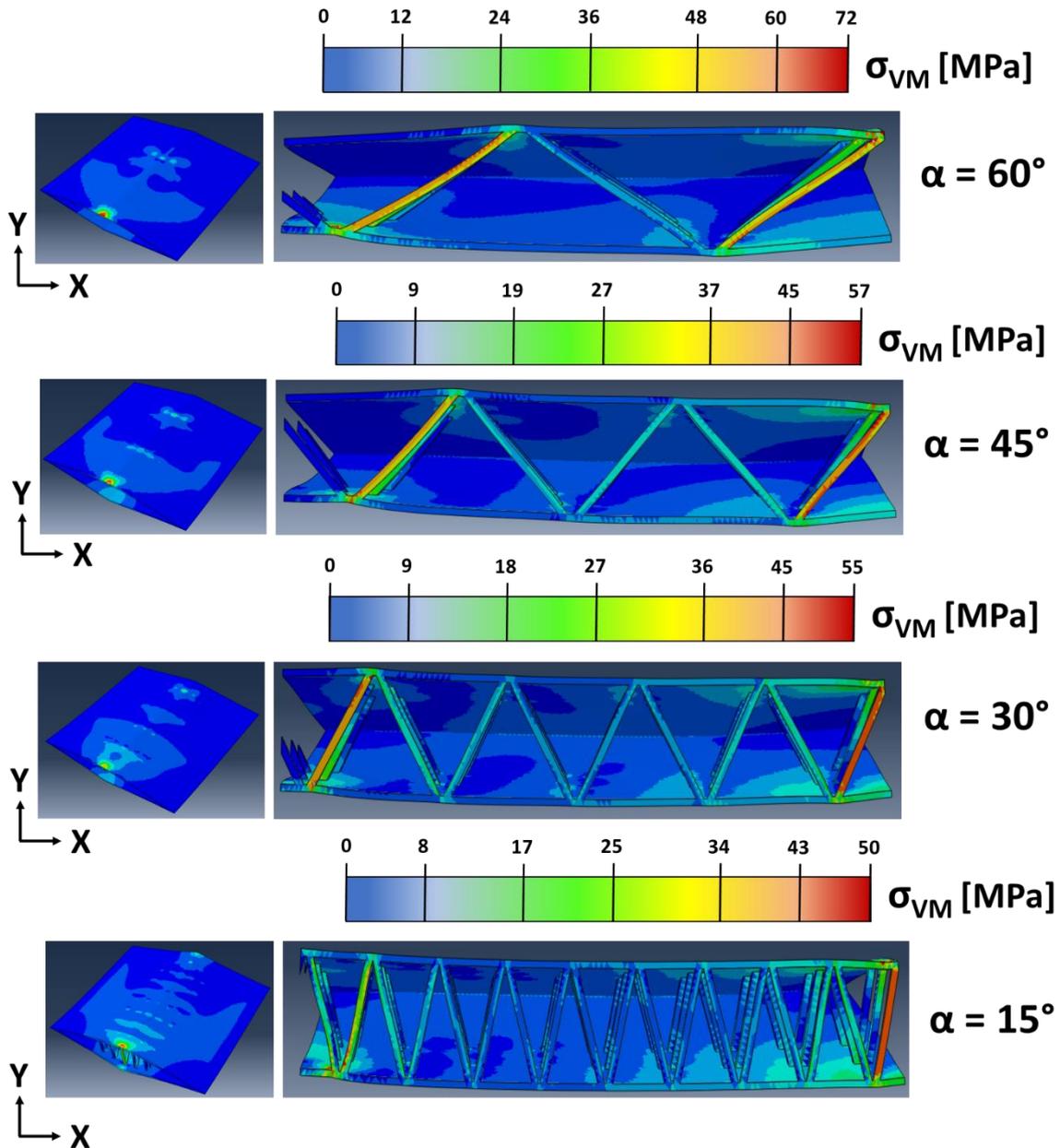


Figure 141 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondu, contraintes au sein de l'élément représentatif du sabre soumis à une sollicitation de flexion suivant le critère de Von Mises pour α égal à 15, 30 et 45 degrés

Pour conclure, nous avons mis en place un paramétrage de la stratégie de remplissage de la lame de sabre qui a pour objectif d'améliorer sa résistance en flexion suivant la direction Y afin de le rendre manipulable.

Un élément représentatif de la lame, de longueur égale à 90 mm, a d'abord été extrait de la maquette numérique du composant afin de servir de modèle pour l'étude. Ensuite, les conditions aux limites (essai de flexion 3 points), les propriétés matériau (PLA homogène et isotrope), le motif de remplissage (triangles isocèles) et la largeur des cordons déposés (0,6 mm) ont été déterminés.

Puis, un paramétrage initial sans remplissage a été simulé : les résultats obtenus ont mis en évidence le besoin de mettre en place une stratégie de remplissage. Nous avons donc réalisé plusieurs simulations faisant varier la valeur de l'angle α localisé au sommet des triangles isocèles, afin de paramétrer une stratégie de remplissage optimale. Lorsque l'angle α est inférieur ou égal à 45°, les contraintes dans

l'élément représentatif sont en deçà de la limite d'élasticité suivant le critère de Von Mises lorsque la charge est appliquée. La valeur d'un angle α égal à 45° a donc été choisie afin de minimiser la quantité de matière déposée, ce qui allège le composant et diminue les coûts et les temps de fabrication. La Figure 142 récapitule les différentes étapes réalisées lors de la mise en place de cette stratégie. Dans le chapitre suivant, la lame de sabre sera réalisée suivant la stratégie volumique décrite ici.

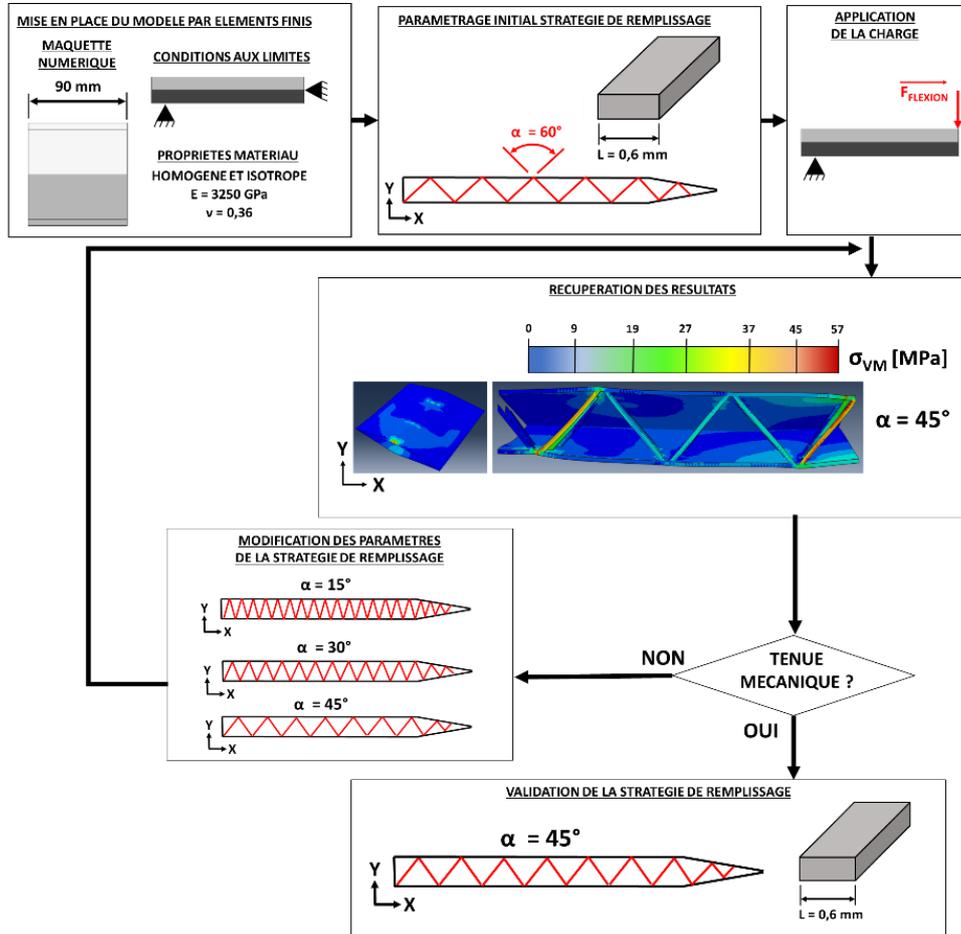


Figure 142 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondus, étapes réalisées afin de paramétrer la stratégie de remplissage de la lame de sabre

4.2. RENFORCEMENT DE L'HYPERBOLOÏDE

Nous avons réalisé la stratégie de renforcement de l'hyperboloïde (Figure 132A) pour mettre en application les éléments présentés dans le cadre de la méthodologie de mise en place des stratégies de renforcement.

Le composant se verra appliquer une sollicitation de traction suivant son axe de révolution, qui correspond également à une direction considérée comme mécaniquement faible : sa résistance mécanique réside dans la force d'adhésion entre les couches de matière. Une stratégie de renforcement, consistant en l'ajout de raidisseurs sur le pourtour extérieur de la structure, sera alors paramétrée par l'intermédiaire d'un outil de simulation par éléments finis.

A. MISE EN PLACE DU MODELE PAR ELEMENTS FINIS

Afin de simplifier l'étude, l'hyperboloïde a été divisée suivant ses trois plans de symétrie : plan XY (Figure 143A), plan YZ (Figure 143B), plan XZ (Figure 143C). Les conditions aux limites de l'étude sont les suivantes : le composant est bloqué suivant l'axe Z, suivant l'axe X et l'axe Y (Figure 143D).

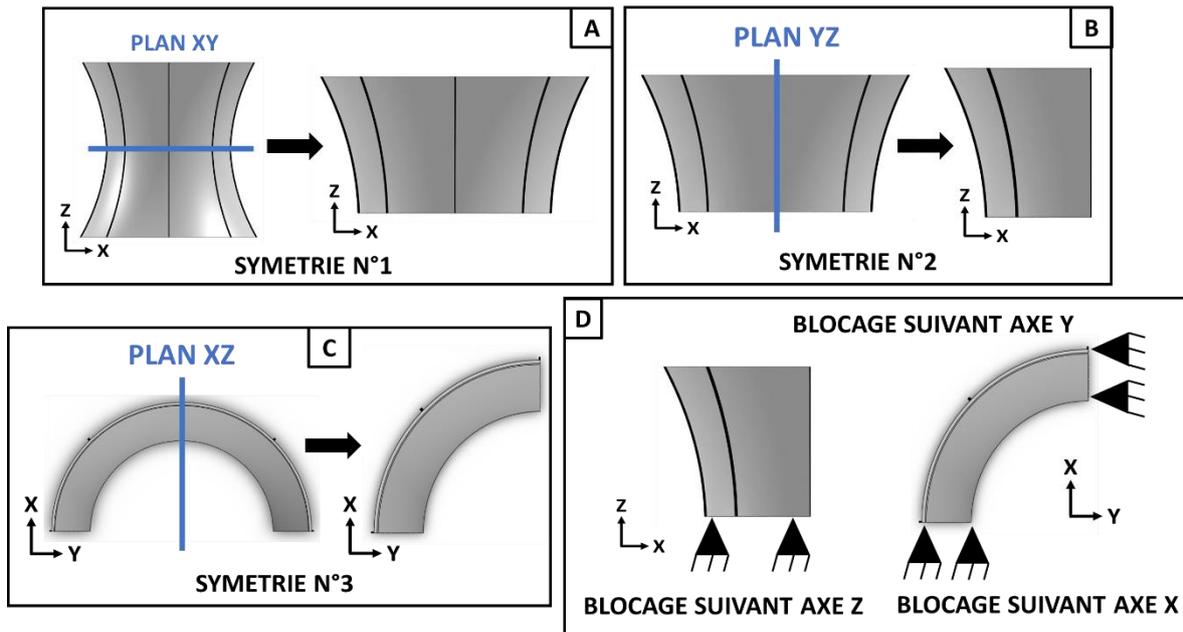


Figure 143 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, symétrisation de l'étude

Le matériau utilisé dans le cadre de la fabrication de l'hyperboloïde est un copolymère (PA6 – PA6,6) de module d'Young égal à 2223 Mpa et de limite élastique égale à 66 Mpa. La structure bâtie par la stratégie volumique est considérée comme homogène et isotrope.

Le matériau utilisé dans le cadre de la stratégie de renforcement est un filament renforcé de fibres de carbone continues, considéré comme isotrope transverse. Son comportement élastique est décrit par 6 constantes, illustrées au sein du Tableau 5, qui ont été renseignées en se basant sur des valeurs trouvées dans la littérature, la caractérisation du filament prototype n'ayant pu aboutir [146].

E1 [GPa]	E2 [GPa]	E3 [GPa]	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G12 [GPa]	G13 [GPa]	G23 [GPa]
138	9,5	9,5	0,28	0,28	0,4	5,2	5,2	1,45

Tableau 5 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, caractéristiques du matériau utilisé dans le cadre de la stratégie de renforcement

B. ORIENTATION DES TRAJECTOIRES DE RENFORCEMENT

Les trajectoires de renforcement sont définies comme des courbes résultant de l'intersection entre un plan de tranchage passant par l'axe de révolution et la paroi extérieure du composant (Figure 144A et B). En procédant ainsi, les trajectoires de renforcement seront au maximum alignées avec la sollicitation de traction (Figure 144C).

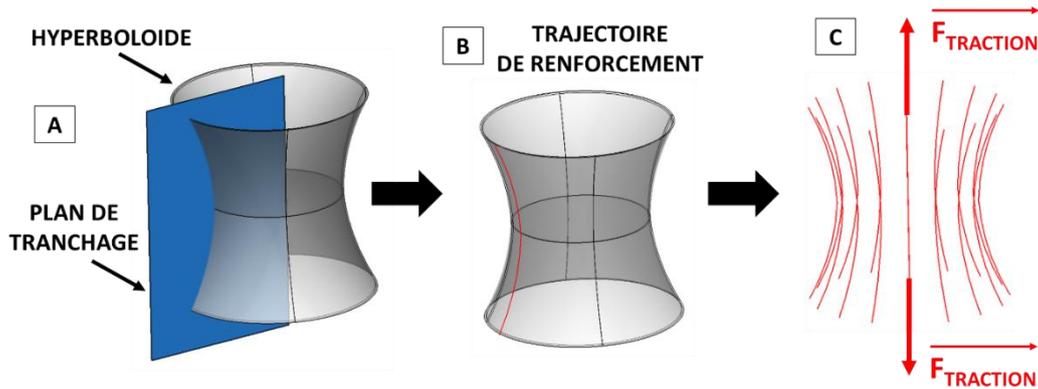


Figure 144 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, génération des trajectoires de renforcement

C & D. PARAMETRAGE INITIAL, APPLICATION DE LA CHARGE ET RECUPERATION DES RESULTATS

Le composant a d'abord été soumis à une sollicitation de traction égale à 6N suivant l'axe Z sans stratégie de renforcement afin de décider ou non de la nécessité d'un renforcement. La charge a été arbitrairement fixée, l'objectif étant de mettre en avant l'apport et le paramétrage d'une stratégie de renforcement. Les résultats obtenus via le paramétrage initial sans stratégie de renforcement (Figure 145A) ont été calculés (Figure 145B) et analysés suivant les contraintes suivant la direction Z présentes à l'intérieur du matériau (critère de Von Mises). Ces dernières doivent être inférieures à la limite d'élasticité du matériau utilisé afin de réaliser le composant (PLA, 66 Mpa). Sans stratégie de renforcement, elles dépassent la limite élastique du matériau utilisé ($\sigma_{ZZ \text{ MAX}} = 166 \text{ Mpa}$), une stratégie de renforcement doit donc être mise en place.

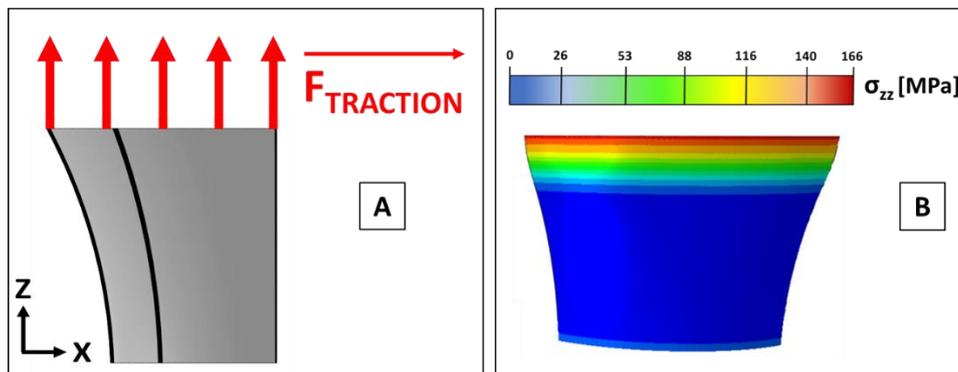


Figure 145 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, conditions de chargement de l'étude

E. MODIFICATION DES PARAMETRES DE LA STRATEGIE DE RENFORCEMENT

Afin de faciliter l'étape de paramétrisation de la stratégie de renforcement, le nombre de trajectoires de renforcement se trouvant sur la paroi extérieure du composant a été utilisé comme seule et unique variable de paramétrage. L'épaisseur des cordons déposés a été fixée à 1,425 mm et la largeur des cordons fixée à 3 mm. Trois cas de figures ont été modélisés et simulés : 8 renforts (Figure 146A), 16 renforts (Figure 146B), 32 renforts (Figure 146C).

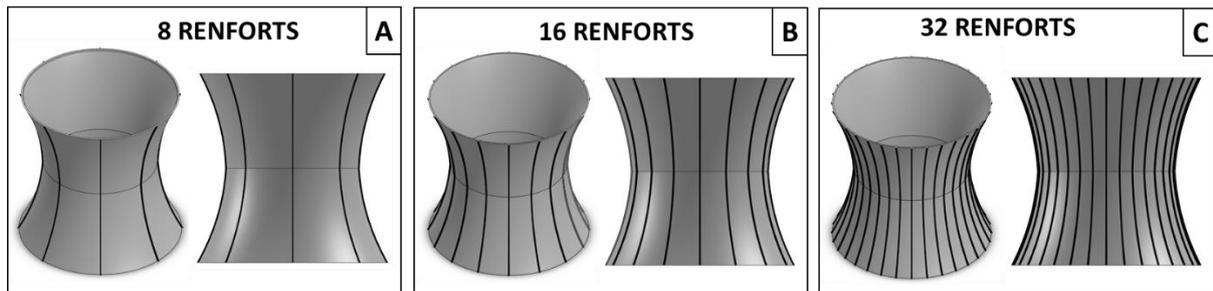


Figure 146 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, cas de figures modélisés concernant le renforcement de l'hyperboloïde

F. VALIDATION DE LA STRATEGIE DE RENFORCEMENT

Les résultats obtenus avec la stratégie de renforcement sont montrés au sein de la Figure 147 : il apparaît que les renforts, constitués d'un matériau renforcé de fibres continues, reprennent bien les efforts de traction et jouent leur rôle de raidisseurs au sein de la structure. Quelle que soit le nombre de raidisseurs, les contraintes maximales ne dépassent pas la limite d'élasticité du renfort (5,2GPa). Avec 8 trajectoires de renforcement autour de l'hyperboloïde, la contrainte maximale suivant l'axe Z au sein de la structure en polyamide est de 36 Mpa, ce qui est inférieur à la limite élastique de 60 Mpa du matériau. Lors de la mise en place de 16 et 32 trajectoires de renforcement, les contraintes maximales suivant Z au sein de la structure restent dans le même ordre de grandeur (respectivement 35 et 37 Mpa). On peut donc conclure que l'ajout de 8 raidisseurs sur le pourtour extérieur de la structure est suffisant afin de prendre en charge la sollicitation en traction suivant l'axe Z.

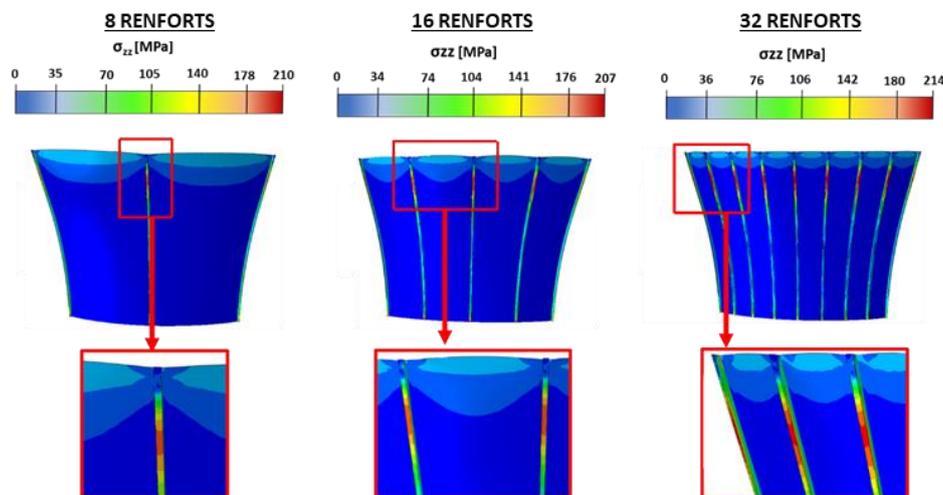


Figure 147 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, résultat en contraintes suivant l'axe Z avec trajectoires de renforcement

Pour conclure, cette étude constitue une première application de mise en place d'une stratégie de renforcement. Dans le futur, nous devons développer le modèle utilisé pour l'étude de simulation par éléments finis afin de prendre en compte l'anisotropie inhérente au procédé dans la structure réalisée via la stratégie volumique et les caractéristiques du matériau utilisé pour le renforts, lorsqu'il aura été caractérisé. La Figure 148 récapitule les différentes étapes réalisées lors de la mise en place de la stratégie de renforcement.

Nous présenterons les résultats de la fabrication du composant et de la stratégie de renforcement dans le chapitre suivant qui porte sur le choix et le paramétrage des équipements.

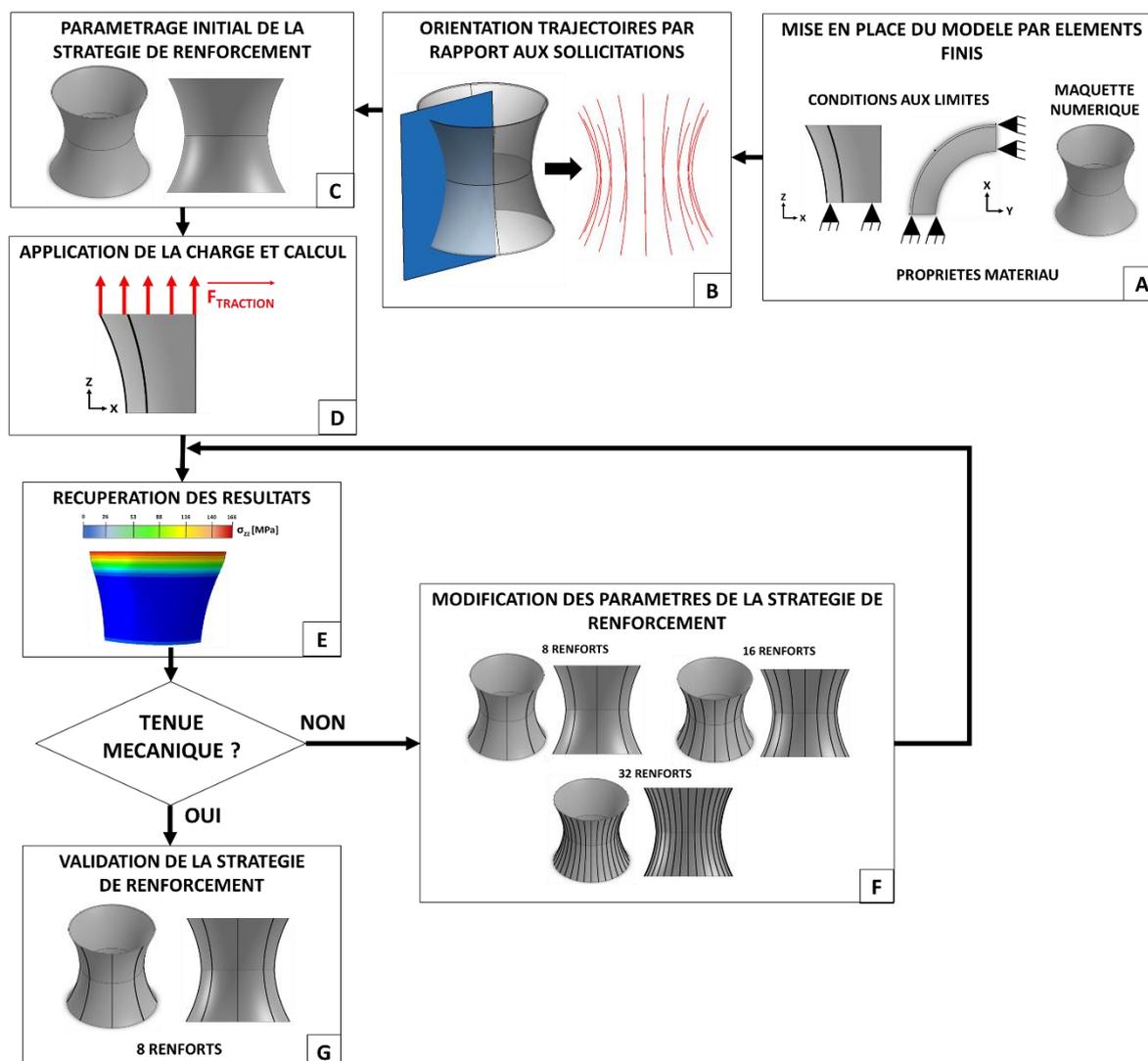


Figure 148 : fabrication additive de pièces de grandes dimensions en polymères fondus, mise en place de la stratégie de renforcement de l'hyperboloïde

4.3. CONCLUSION SUR LA MISE EN PLACE DES STRATEGIES DE FABRICATION DANS LE CADRE DES CAS D'APPLICATION

Dans cette partie, nous avons traité les cas d'applications présentés dans le chapitre 1 et mis en position et sectionnés au sein du chapitre 2 : fémur, chaise, lame de sabre, pale d'éolienne, hyperboloïde, hélice se sont vu appliquer les stratégies de fabrication présentées dans ce chapitre. En ce qui concerne la mise en place des stratégies volumiques de la chaise et de la lame de sabre, nous avons appliqué la méthodologie de paramétrage des stratégies de remplissage et utilisé des outils de simulation par éléments finis. Une stratégie de renforcement paramétrée via la mise en place d'une étude de simulation par éléments finis a également été appliquée à l'hyperboloïde : bien que l'étude ait été menée à titre d'exemple et que la valeur de la sollicitation mécanique suivant la direction mécaniquement faible ait été choisie arbitrairement, elle démontre la pertinence de cette approche numérique. Au sein du prochain chapitre, nous effectuerons le choix et le paramétrage d'un moyen de fabrication capable de réaliser les composants avec les stratégies de fabrication déterminées dans ce chapitre. Finalement, nous réaliserons les cas d'application et nous conclurons sur ces derniers.

5. CONCLUSION DU CHAPITRE

Ce chapitre a porté sur la deuxième étape de la méthodologie de préparation à la fabrication consistant à mettre en place les stratégies de fabrication du composant à fabriquer.

Dans un premier temps nous avons développé les notions relatives à la mise en place de stratégies de fabrication : trajectoires de fabrication, type et ordonnancement des stratégies de fabrication. Nous avons ensuite traité les problématiques scientifiques en lien avec la fabrication additive de composants de grandes dimensions (mécaniques, thermiques, géométriques, chimiques) et leur résolution par la mise en place de stratégies de fabrication. Puis nous avons présenté les différentes stratégies de fabrication développées au sein de la méthodologie :

- stratégies volumiques, ayant pour objectif la construction du volume global d'un composant (ou d'une entité) et la réponse aux sollicitations mécaniques « dans le plan » ;
- stratégies de renforcement, ayant pour objectif de pallier la problématique d'anisotropie des propriétés mécaniques inhérente au procédé. En effet, nous avons choisi de résoudre la problématique d'anisotropie des propriétés mécaniques via une approche de type « génération de trajectoires », dans le cadre de ces travaux de recherche ;
- stratégies de parachèvement ayant pour objectif l'obtention de surfaces conformes à des contraintes dimensionnelles, géométriques ou d'état de surface.

Suite à une analyse de la littérature scientifique, nous avons proposé deux méthodologies de mise en place des stratégies de fabrication :

- une méthodologie de mise en place des stratégies volumiques prenant en considération les problématiques thermiques, géométriques et mécaniques liées à la fabrication de composants de grandes dimensions ;
- une méthodologie de mise en place des stratégies de renforcement, prenant en considération l'orientation optimale des trajectoires de fabrication et incorporant des outils de modélisation et de simulation numérique.

Par la suite, les cas d'applications mis en position et sectionnés lors de l'étape A1 de la méthodologie se sont vu appliquer les différentes stratégies de fabrication. En ce qui concerne la chaise et la lame de sabre, nous avons retenu la méthodologie de mise en place des stratégies volumiques et utilisé des outils de simulation par éléments finis. L'hyperboloïde a, quant à elle, été renforcée suivant la méthodologie de mise en place des stratégies de renforcement. Ces cas d'applications ont permis de démontrer la pertinence des éléments présents au sein des méthodologies.

L'apport majeur de ce chapitre se situe dans l'aspect synthétique et générique qu'il propose afin d'aborder les stratégies de fabrication permettant de réaliser des composants de grandes dimensions devant respecter un cahier des charges mécanique et géométrique. Afin de pallier la problématique d'anisotropie, un axe de recherche concernant le renforcement de composants à partir de trajectoires de fabrication multi-axes et l'emploi de matériaux innovants a été développé. Il se place de façon complémentaire aux solutions proposées dans la littérature. Par ailleurs, des méthodes numériques ont été intégrées à la mise en place des stratégies de fabrication (paramétrage de stratégies volumiques et de renforcement). Si ces travaux n'ont pas la prétention d'apporter à la communauté le développement d'un nouveau modèle numérique, il n'est pas mentionné dans la littérature de l'utilisation d'outils de simulation par éléments finis intégrés à une démarche globale de préparation à la fabrication additive de composants de grandes dimensions. Elles constituent une base de travail qui sera enrichie dans de futurs travaux.

Le prochain chapitre de ce manuscrit portera sur le choix et le paramétrage des équipements nécessaires au composant à fabriquer.

CHAPITRE 4 - CHOIX ET PARAMETRAGE DU MOYEN DE FABRICATION

Le chapitre précédent a développé la seconde étape de la méthodologie de préparation à la fabrication, qui a pour objectif la mise en place des stratégies de fabrication. Nous avons créé et présenté à cet effet, des méthodologies permettant la mise en place des stratégies volumiques et des stratégies de renforcement. Nous les avons appliquées en fin de chapitre aux cas de la méthodologie de préparation à la fabrication afin de mettre en lumière leur pertinence et leur généralité.

Ce chapitre aborde les éléments relatifs à la troisième et dernière étape de la méthodologie (étape A3 du diagramme IDEF0, Figure 149) qui consiste à choisir et à paramétrer un moyen de fabrication permettant la réalisation du composant de grandes dimensions. Nous introduirons d'abord les notions nécessaires à la compréhension de ce chapitre : moyen de fabrication, effecteurs soustractifs, effecteurs additifs, catégories de porteurs. Ensuite nous mettrons en avant les problématiques scientifiques relatives à cette étape de la méthodologie et nous proposerons leur résolution à travers deux méthodologies, choix et paramétrage des effecteurs et choix et paramétrage du porteur. Puis nous choisirons et paramètrerons les effecteurs et le porteur utilisé dans le cadre de ces travaux de recherche. Nous réaliserons également les cas d'applications de la méthodologie, présentés à travers les différents chapitres de ce manuscrit. Pour finir, une conclusion générale portera sur la dernière étape de la méthodologie.

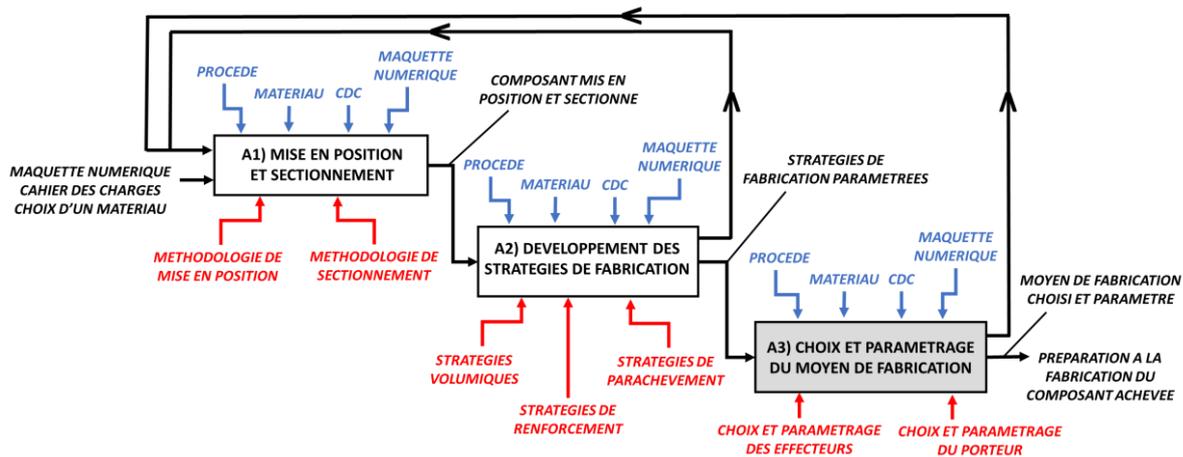


Figure 149 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, diagramme IDEF0

1. NOTIONS RELATIVES AU CHOIX ET AU PARAMETRAGE DU MOYEN DE FABRICATION

Cette partie développera les notions nécessaires à la compréhension de l'étape A3 de la méthodologie de préparation à la fabrication : moyen de fabrication, effecteurs soustractifs, effecteurs additifs, catégories de porteurs (machines 3-axes, machines 5-axes, bras robotisés 6-axes).

1.1. MOYEN DE FABRICATION

Le moyen de fabrication nécessaire à la réalisation additive d'un composant de grandes dimensions désigne l'ensemble effecteurs (additifs et soustractifs) - porteur. Le choix et le paramétrage du moyen de fabrication, en fonction du composant et des contraintes liées aux procédés basés sur l'extrusion de matériaux polymères thermoplastiques fondus, représente un problème scientifique qui entend être résolu dans le cadre de cette étape de la méthodologie de préparation à la fabrication.

1.2. EFFECTEURS ADDITIFS

Un effecteur additif dépose des cordons de matériaux polymères thermoplastique fondus suivant des trajectoires paramétrées dans le cadre de stratégies volumiques ou de renforcement. Il est divisé en deux

parties : la partie supérieure comprend les équipements liés à un procédé de fabrication (Figure 150i), la partie inférieure comprend la buse d'injection (Figure 150ii) permettant le dépôt des cordons de matière suivant les trajectoires de fabrication (Figure 150iii).

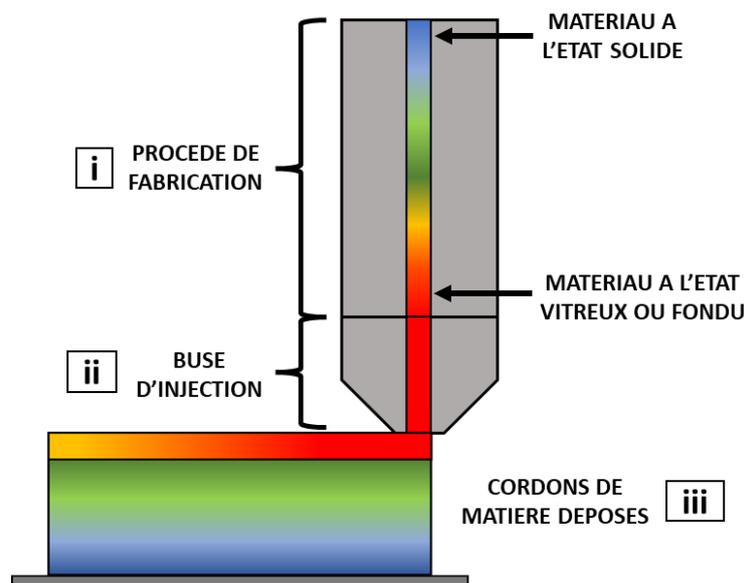


Figure 150 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, effecteurs additifs et soustractifs

1.2.1. PARTIE SUPERIEURE ET PROCÉDE DE FABRICATION

La partie supérieure d'un effecteur additif regroupe l'ensemble des équipements relatifs à un procédé de fabrication qui transforme un matériau polymère thermoplastique stocké à l'état solide en un état fondu ou vitreux, afin de permettre son extrusion à travers une buse d'injection. Les deux procédés de fabrication utilisés dans le cadre de la fabrication additive de composants de grandes dimensions à partir de matériaux polymères thermoplastiques sont fonction de la nature du matériau d'apport [147] : les matériaux stockés sur des bobines sous formes de filaments seront transformés par le procédé « Dépôt de fil fondu » tandis que ceux stockés sous forme de granulés le seront par le procédé d'extrusion de granulés thermoplastiques. Dans ces travaux de recherche, nous avons choisi de n'utiliser qu'un seul et même procédé afin de réaliser un composant de grandes dimensions.

Procédé « dépôt de fil fondu »

Le fonctionnement du procédé « Dépôt de fil fondu » est le suivant [148] : le matériau d'apport, un filament stocké à l'état solide sur des bobines (Figure 151A1), est entraîné par un mécanisme d'entraînement (Figure 151A2 et A3) vers une zone appelée « partie chaude » qui permet d'augmenter sa température jusqu'à la température d'extrusion (Figure 151A4). C'est le filament solide en amont qui, poussé par le mécanisme d'entraînement, fait office de piston continu permettant au filament fondu en aval d'être extrudé à travers une buse d'injection (Figure 151A5 et A6).

Les filaments utilisés au sein de la littérature scientifique dans le cadre du procédé « Dépôt de fil fondu » sont de deux diamètres différents : 1,75 mm et 2,85 mm [149]. La quantité de matière stockée par bobines s'est adaptée à la demande en composants de grandes dimensions et certaines bobines peuvent contenir jusqu'à 8 kilogrammes de matériau [150]. Les polymères sans renforts et renforcés de fibres courtes représentent la majorité des matériaux utilisés par les sources mentionnées dans la littérature scientifique [36]. Néanmoins, les applications utilisant des filaments renforcés de fibres longues ou continues sont nombreuses dans la bibliographie [151][152][153]. Le coût de revient en matière première est fonction de la qualité et de la nature chimique du matériau utilisé : pour un kilogramme de PLA sans renforts, les prix varient de 20 à 60 euros [154] tandis qu'un kilogramme de Nylon renforcé de fibres de carbone continues dépasse la barre des 300 euros [155]. Le débit maximal mentionné au

sein de la littérature scientifique avec le procédé « Dépôt de fil fondu » est d'un kilogramme par heure [156][157]. La résolution des composants réalisés est forte, l'épaisseur des couches de matière déposées allant jusqu'à 0,2 mm lorsqu'un état de surface élevé est nécessaire [158].

Procédé d'extrusion de granulés thermoplastiques

Le fonctionnement du procédé d'extrusion de granulés thermoplastiques est le suivant [148] : la transformation des granulés d'un état solide vers un état fondu est réalisée par l'intermédiaire d'une vis sans fin actionnée par un moteur à courant continu (Figure 151B2) qui provoque la plastification et donc la fusion du matériau (Figure 151B1). Des résistances électriques ou cartouches chauffantes peuvent être ajoutées afin d'amplifier et contrôler la chauffe du matériau. L'extrusion du polymère fondu est réalisée par le mouvement de rotation de la vis sans fin autour de son axe. En quittant l'effecteur, le matériau à l'état fondu est extrudé en passant à travers une buse d'injection (Figure 151B3).

La littérature scientifique fait mention de granulés réalisés à partir de matériaux polymères thermoplastiques sans renforts et renforcés de fibres courtes. Néanmoins, il n'existe pas de référence aux matériaux polymères thermoplastiques renforcés de fibres longues et continues. Les coûts des matières premières du procédé d'extrusion de granulés sont faibles : le prix moyen d'un kilogramme de PLA est de 4 euros [159] tandis qu'un kilogramme de Polysulfure de phénylène (PPS) renforcé de fibres courtes de carbone (fraction volumique de fibres égale à 50%) coûte approximativement 17 euros [159]. Les débits massiques obtenus avec le procédé d'extrusion de granulés sont très élevés et peuvent aller jusqu'à 260 kilogrammes par heure [40]. La résolution des composants réalisés est faible : l'épaisseur des couches de matière déposées est dans la majorité des cas de plusieurs millimètres. Par conséquent, le procédé est fréquemment associé à des opérations de parachèvement lorsqu'une surface est soumise à des tolérances dimensionnelles, géométriques ou d'état de surface [160].

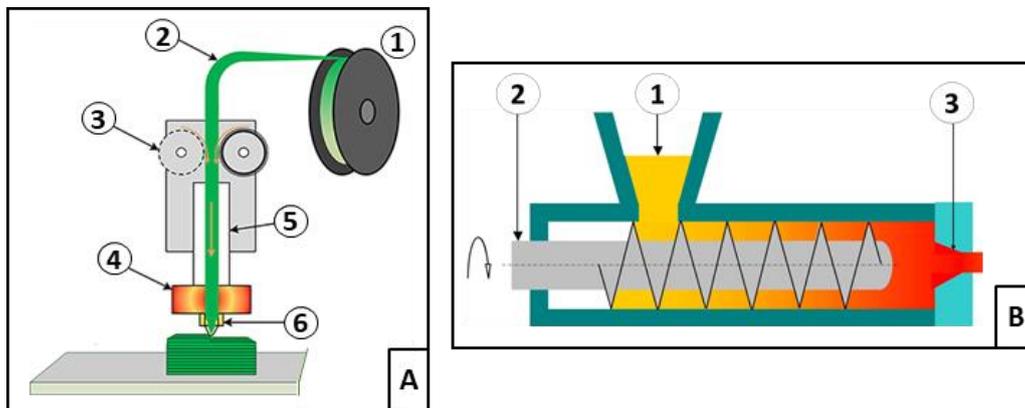


Figure 151 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, fonctionnement du procédé « Dépôt de fil fondu » [161] et du procédé d'extrusion de granulés thermoplastiques [162]

Pour conclure, le procédé de fabrication permet de transformer un matériau polymère thermoplastique stocké à l'état solide en un état fondu ou vitreux permettant son extrusion à travers une buse d'injection. Il est divisé en deux catégories (procédé « Dépôt de fil fondu » et procédé d'extrusion de granulés thermoplastiques), ont des caractéristiques spécifiques qui sont présentées au sein du Tableau 6.

PROCEDE	DEPOT DE FIL FONDU	EXTRUSION DE GRANULES THERMOPLASTIQUES
RESOLUTION	ELEVEE	MOYENNE
DEBIT MASSIQUE	≤ 1 kg / hr	Jusqu'à 260 kg / hr
COUT MATERIAU	ELEVES	FAIBLES
TYPES DE MATERIAUX	SANS RENFORTS - RENFORTS COURTS, LONG ET CONTINUS	SANS RENFORTS - RENFORTS COURTS

Tableau 6 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, comparatif des deux procédés relatifs à la fabrication additive de composants de grandes dimensions à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus

Les éléments permettant de choisir un procédé de fabrication adapté au composant à fabriquer interviendra au sein de la méthodologie de choix et de paramétrage des effecteurs additifs, présentée au sein de la partie 3 du présent chapitre.

1.2.2. PARTIE INFERIEURE ET BUSE D'INJECTION

La buse d'injection est située au niveau de la partie inférieure d'un effecteur additif, en aval des éléments relatifs au procédé de fabrication (Figure 150B). Ayant pour objectif d'extruder des cordons de matériaux suivant les trajectoires de fabrication, elle fait partie d'une des deux catégories suivantes :

- buses d'injection axisymétriques, symétriques autour de l'axe d'extrusion de polymère fondu et ayant des sections de sortie circulaires (Figure 152A) ;
- buses d'injection non axisymétriques, n'ayant pas de sections circulaires (représentées au sein de la Figure 152B par une section de sortie rectangulaire).

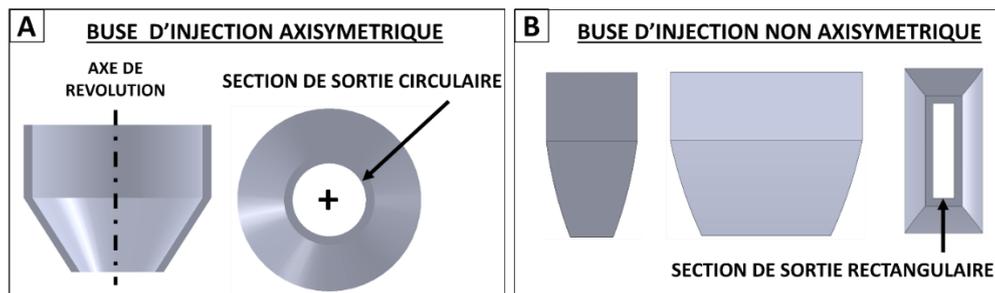


Figure 152 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, buses d'injection axisymétrique et non axisymétrique

Dans le cadre de ces travaux de recherche, nous avons choisi d'utiliser une buse d'injection pour chaque stratégie volumique ou de renforcement. La même buse pourra être utilisée afin de réaliser plusieurs stratégies de fabrication, du moment qu'elle se montre adaptée. Les buses d'injection sont définies par plusieurs paramètres (Figure 153A) : leur empreinte prenant en compte leurs dimensions et leurs géométries, la géométrie de leurs sections de sortie et les matériaux les constituant. Un repère cartésien $R_{\text{EFFECTEUR}}$, dont l'origine est appelée TCP (pour Tool Center Point), est placé au niveau du barycentre de la section de sortie d'une buse d'injection afin d'orienter l'effecteur additif en chacun des points d'une trajectoires de fabrication. Ses trois composantes sont les suivantes (Figure 153B) :

- l'axe \vec{O} , qui remonte le long de l'axe d'écoulement du polymère fondu ;
- l'axe \vec{V} et l'axe \vec{R} , positionnés dans le plan formé par la section de sortie de la buse d'injection.

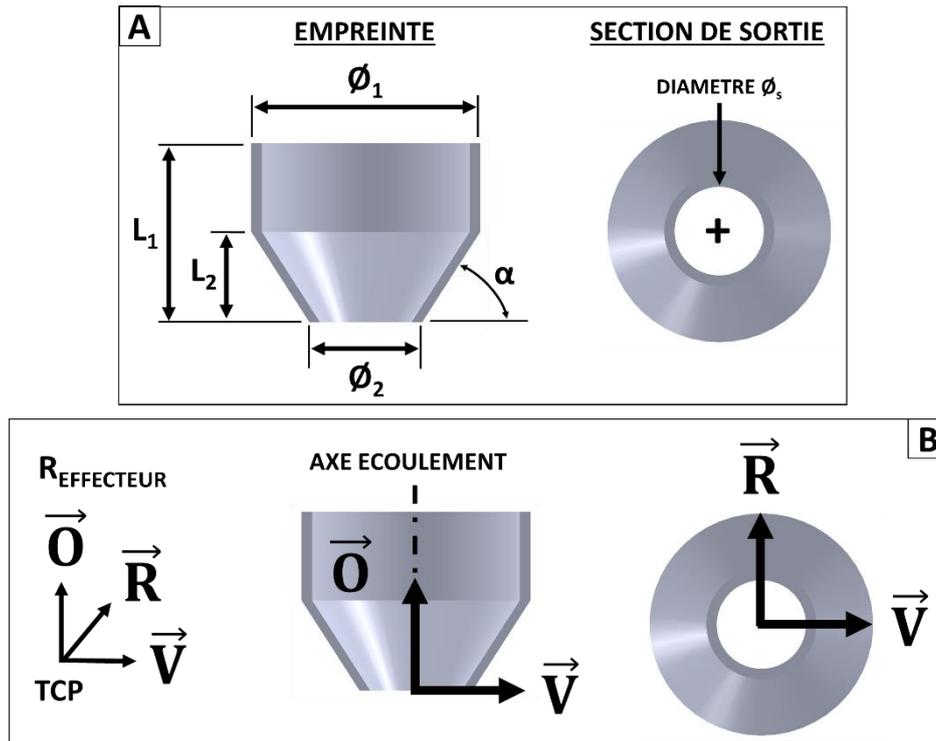


Figure 153 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, paramètres relatifs à une buse d'injection

Dans le cadre de la méthodologie de choix et de paramétrage du moyen de fabrication, nous développerons les problématiques relatives à la définition de la buse d'injection (empreinte, matériau, positionnement du repère $R_{EFFECTEUR}$) et à l'orientation d'un effecteur additif en fonction des trajectoires de fabrication.

1.2.3. CONCLUSION SUR LES EFFECTEURS

Les effecteurs utilisés dans le cadre de la fabrication de composants de grandes dimensions sont divisés en deux catégories : effecteurs additifs et effecteurs soustractifs. Les effecteurs soustractifs, constitués d'un ensemble « Outil de coupe – Porte outil » et attachés au porteur par l'intermédiaire d'une broche, ont pour objectif de retirer les surépaisseurs volontairement ajoutées à la maquette numérique du composant à fabriquer. Les effecteurs additifs ont pour objectif de déposer des cordons de matériaux polymères thermoplastiques fondus suivant des trajectoires additives précédemment paramétrées. Ils sont divisés en deux parties. La partie supérieure, comprenant les éléments liés à un procédé de fabrication permet de transformer un matériau polymère thermoplastique stocké à l'état solide en un état fondu ou vitreux. Le procédé de fabrication pourra être de type « Dépôt de fil fondu » ou de type « Extrusion de granulés thermoplastiques », en fonction des caractéristiques des composants à fabriquer. La partie inférieure, constituée d'une buse d'injection a pour objectif d'extruder des cordons de matériaux. Axisymétrique ou non, elle est définie par plusieurs paramètres : son empreinte (dimensions et géométries), la géométrie de sa section de sortie et le matériau la constituant. Un repère cartésien est placé au niveau du barycentre de la section de sortie de la buse afin d'orienter l'effecteur additif en chacun des points d'une trajectoires de fabrication.

Les problématiques relatives au choix et au paramétrage d'un effecteur additif (choix d'un procédé de fabrication, définition de la buse d'injection, orientation d'un effecteur le long d'une trajectoire de fabrication) seront traitées et résolues dans le cadre de la méthodologie de choix et de paramétrage du moyen de fabrication, présentée au sein de la partie 3 du présent chapitre.

1.3. PORTEURS

Un porteur permet à un effecteur additif ou soustractif de suivre les trajectoires de fabrication qui lui ont été définies tout en contrôlant son orientation en chacun des points. Dans le cadre de la méthodologie de préparation à la fabrication, nous avons choisi de n'utiliser qu'un seul et même porteur afin de réaliser un composant de grandes dimensions. Les porteurs sont définis par plusieurs caractéristiques intrinsèques [163] :

- une structure cinématique, caractérisée par un nombre et un agencement d'axes linéaires ou rotatifs afin d'orienter un effecteur au cours du suivi d'une trajectoire de fabrication (orientation des axes \vec{O} et \vec{V} d'un effecteur additif) ;
- un espace de travail, dont la forme et les dimensions sont fonction du nombre, de l'agencement et de la longueur des axes linéaires et rotatifs. Il devra être suffisamment volumineux afin de pouvoir réaliser l'ensemble des stratégies de fabrication du composant à réaliser ;
- la vitesse de déplacement du TCP en fonction de la masse de l'effecteur, qui permet de déplacer ce dernier aux vitesses paramétrées dans le cadre des stratégies de fabrication. Dans le cadre des procédés additifs à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus, les vitesses de déplacements sont faibles (dans la littérature, une vitesse maximale de 0,2 m/s est mentionnée ce qui est inférieur aux vitesses de déplacements maximales des porteurs de grandes dimensions [164][165]) et la masse des effecteurs limitée. Dans la suite de cette partie, on considèrera le couple vitesse de déplacement - masse utile d'un porteur comme étant suffisant quelle que soit leur catégorie. Ce paramètre ne sera pas un critère d'évaluation ;
- la rigidité d'un porteur, qui représente la résistance aux déformations et aux vibrations lors d'un processus de coupe (usinage métallique). Dans le cadre des stratégies de fabrication, les efforts engendrés par un effecteur sur la structure du porteur sont faibles comparés aux efforts générés par un processus d'usinage métallique. Dans la suite, on considèrera les porteurs comme suffisamment rigides quelle que soit leur catégorie. Ce paramètre ne sera pas un critère d'évaluation.

De plus, le coût du porteur n'est pas pris en considération dans le cadre de la méthodologie de préparation à la fabrication, qui est centrée sur des considérations scientifiques et techniques. Le coût d'un porteur est également difficile à estimer car sujet à des variations considérables en fonction des volumes achetés et des taxes en vigueur.

La méthodologie de préparation à la fabrication étant générique, toutes les catégories de porteurs pourront être utilisées. Au sein de la littérature scientifique, les porteurs sont divisés en deux catégories : les machines (3-axes de type cartésiennes ou deltas, 5-axes avec configuration berceau ou poignet) et les bras robotisés (6-axes, avec ou sans axes externes). Nous développerons par la suite les éléments relatifs à ces deux catégories (caractéristiques intrinsèques, référence au sein de la littérature). Puis nous proposerons une conclusion sur les porteurs et une ouverture sur les problématiques engendrées par le choix et le paramétrage de ces derniers afin de réaliser des composants de grandes dimensions.

1.3.1. PORTEURS DE TYPE MACHINES

Les machines représentent la première catégorie de porteurs représentée dans le cadre de la fabrication additive de composants de grandes dimensions à partir de polymères thermoplastiques fondus. Les caractéristiques intrinsèques et références bibliographiques sont classées et présentées ci-dessous en fonction du nombre d'axes de leurs structures cinématiques. Les auteurs ne mentionnent pas de sources faisant référence aux machines 4 et 6 axes et par conséquent, ces dernières ne seront pas développées.

1.3.1.1. MACHINES 3-AXES

Caractéristiques des machines 3-axes

Les machines ayant la structure cinématique la plus élémentaire sont appelées « machines cartésiennes » ou « machine 3-axes ». Elles sont constituées de trois axes linéaires en mouvement les uns par rapport

aux autres, permettant de déplacer un effecteur par rapport à un bâti machine fixe. L'espace de travail d'une machine cartésienne, le plus souvent fermé, est un parallélépipède rectangle ayant des dimensions égales à la course de chacun des axes auquel il faut retirer le volume occupé par l'effecteur utilisé (Figure 154A1). Lors d'un cycle de fabrication, l'axe de l'effecteur \vec{O} est maintenu vertical (colinéaire à l'axe \vec{Z} du bâti machine) tandis que la direction d'avance \vec{V} est maintenue colinéaire à l'axe \vec{X} du bâti machine (Figure 154B). Le plateau de fabrication est quant à lui fixe dans le cas où l'effecteur se déplace suivant 3 axes de translation ou en déplacement suivant l'axe Z, dans le cas où l'effecteur se déplace dans un plan formé par les axes X et Y (Figure 154C1). Les machines cartésiennes sont exemptées de singularités cinématiques, ce qui facilite la programmation des trajectoires de fabrication.

Les machines 3-axes peuvent également être de type « Delta » [161]. L'architecture cinématique de cette catégorie de machine est la suivante : trois bras montés sur des axes verticaux positionnent l'effecteur dans l'espace et permettent à ce dernier de se déplacer suivant 3 axes linéaires. L'espace de travail d'une machine delta est cylindrique, le plus souvent fermé (Figure 154A2). Lors d'un cycle de fabrication, l'axe de l'effecteur \vec{O} est maintenu colinéaire à l'axe \vec{Z} du bâti machine tandis que la direction d'avance \vec{V} est maintenue fixe et horizontale (Figure 154B). Le plateau de fabrication est quant à lui maintenu fixe (Figure 154C2).

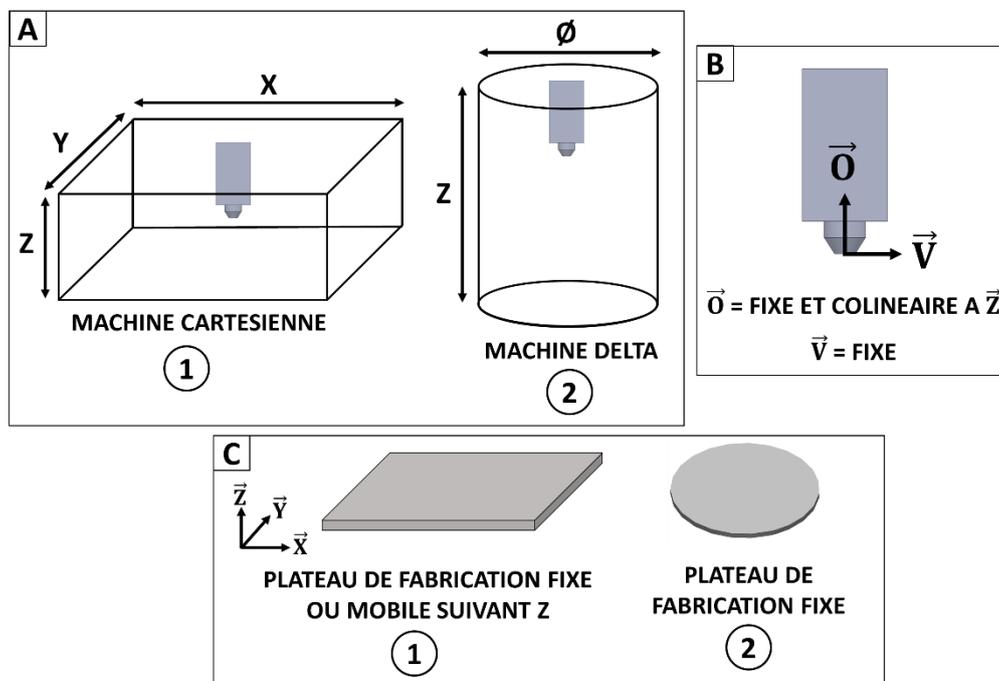


Figure 154 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, espace de travail et orientation de l'effecteur relatifs aux machines cartésiennes

Machines 3-axes au sein de la littérature scientifique

L'usage des machines cartésiennes de grandes dimensions est évoqué au sein de la littérature scientifique à maintes reprises :

- l'entreprise Américaine Cosine a développé une machine cartésienne ayant une espace de travail de 1100 mm de long, 850 mm de large et 850 mm de haut [166] (Figure 155A) ;
- l'entreprise Modix a développé une gamme de machines cartésiennes ayant des espaces de travail allant jusqu'à 5 mètres cubes, avec comme objectif de fabriquer des composants de grandes dimensions pour des applications automobiles et aéronautiques [47] (Figure 155B) ;
- un portique 3-axes de grandes dimensions a été utilisé afin de réaliser un pont pédestre de 15 mètres de long ans le cadre d'un partenariat de recherche entre les entreprises SCG et Polymaker

[167] (Figure 155C). Le volume de travail de ce portique est de 24 mètres de long, 4 mètres de large et 1,5 mètres de haut.

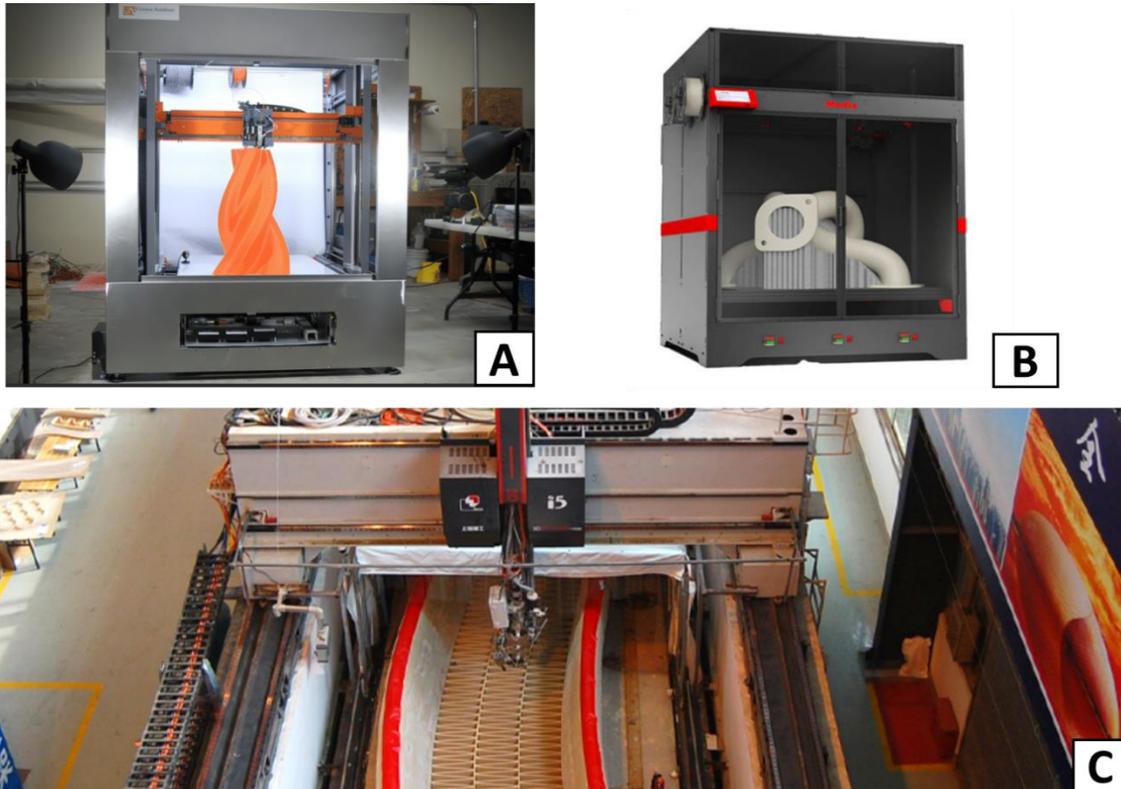


Figure 155 : machines cartésiennes de grandes dimensions utilisées dans le cadre de la fabrication additive de composants de grandes dimensions à partir de polymères thermoplastiques fondus

L'usage des machines à structures parallèles de grandes dimensions dans le cadre de la fabrication additive de composants de grandes dimensions à partir de polymères thermoplastiques fondus est également évoqué au sein de la littérature scientifique :

- Serin et al. [168] ont développé et testé une machine à structure parallèle afin de réaliser des composants de grandes dimensions (Figure 156A) ;
- l'entreprise hollandaise Tractus développe une gamme de machines à structures parallèles ayant un espace de travail d'un mètre de diamètre et d'une hauteur de 2,1 mètres (Figure 156B)[169].

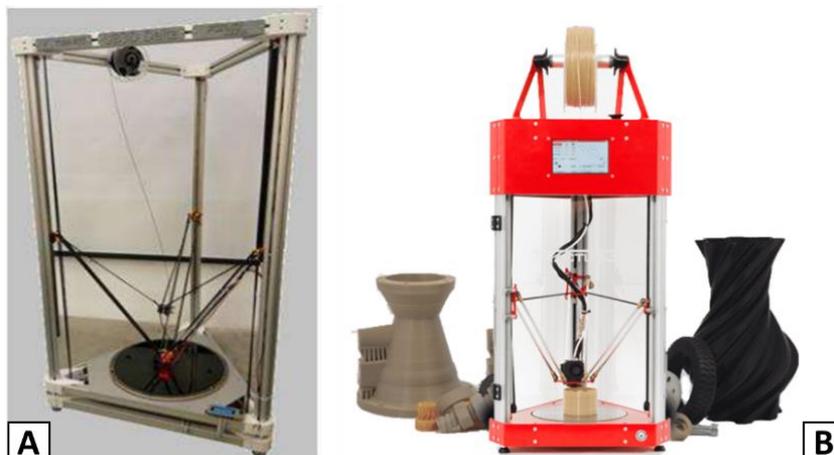


Figure 156 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, machine 3-axes à structures parallèles

1.3.1.2. MACHINES 5-AXES

Caractéristiques des machines 5-axes

Les machines 5-axes ont deux degrés de liberté cinématique de plus que les machines cartésiennes (trois axes linéaires et deux axes rotatifs). On retrouve sous cette dénomination principalement deux configurations différentes, en fonction de la position des axes supplémentaires :

- la configuration poignet, suivant laquelle les deux axes rotatifs supplémentaires sont situés au niveau de l'effecteur, ce qui permet à l'axe \vec{O} d'être orienté suivant toutes les directions de l'espace tandis que le plateau de fabrication reste fixe (Figure 157A) [170] ;
- la configuration berceau, suivant laquelle les deux axes rotatifs supplémentaires sont situés au niveau du plateau de fabrication, ce qui permet d'orienter ce dernier par rapport à l'axe de l'effecteur \vec{O} maintenu vertical et colinéaire à l'axe \vec{Z} du bâti machine (Figure 157B) [171].

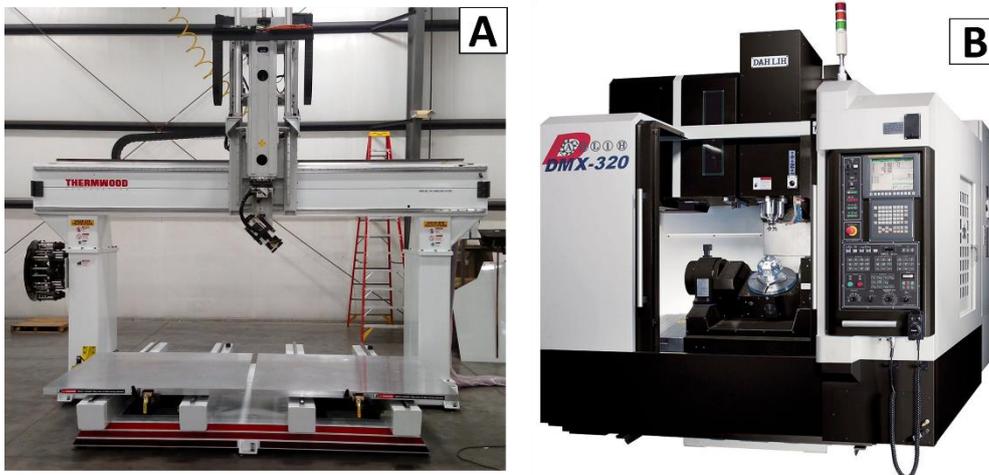


Figure 157 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, machines 5-axes en configurations berceau et poignet

La cinématique des machines 5-axes, quelle que soit la configuration, ne permet pas de contrôler l'orientation de la direction d'avance \vec{V} . Les dimensions de l'espace de travail d'une machine 5-axes avec configuration de type poignet dépendent de la longueur des axes linéaires et de la course des axes au niveau du poignet tandis que les dimensions de l'espace de travail d'une machine 5-axes avec configuration de type berceau dépendent de la longueur des axes linéaires et des dimensions du plateau rotatif. Les enceintes des machines 5-axes, quelle que soit leur configuration, sont fermées.

Les machines 5-axes, en configuration berceau ou poignet, font face à des singularités cinématiques au niveau du plateau de fabrication qui peuvent lui donner des mouvements de grande amplitude. Lorsqu'une trajectoire de fabrication passe par un point de singularité, la vitesse de déplacement relative entre l'effecteur et le composant devient faible, ce qui nuit au processus de fabrication [172]. La programmation des trajectoires de fabrication relative aux machines 5-axes, en comparaison avec celle des machines 3-axes, est complexe, notamment à cause de la gestion des singularités.

Machines 5-axes au sein de la littérature scientifique

L'usage des machines 5-axes de grandes dimensions dans le cadre de la fabrication additive de composants de grandes dimensions à partir de polymères thermoplastiques fondus est plusieurs fois évoqué au sein de la littérature scientifique :

- Post et al. [159] ont utilisé une machine 5-axes avec une configuration de type poignet afin de réaliser des composants non structuraux de grandes dimensions. Les dimensions de l'espace de

travail de la machine utilisée sont de 6 mètres de long pour 2,3 mètres de large et 1,8 mètres de haut (Figure 158A) ;

- Fathizadan et al. [40] ont utilisé une machine 5-axes de très grandes dimensions dénommée LSAM (pour Large Scale Additive Manufacturing) dans le cadre de travaux sur les composants de grandes dimensions réalisés à partir de matériaux polymères thermoplastiques renforcés de fibres courtes de carbone. Les dimensions de l'espace de travail de la machine sont de 30 mètres de long pour 3 mètres de large et 1,5 mètres de haut (Figure 158B) ;
- Anderson et al. [45] ont utilisé une machine 5-axes avec une configuration de type poignet afin de réaliser le bateau 3Dirigo, dénommée WHAM (pour Wide & High Additive Manufacturing). Les dimensions de l'espace de travail de cette machine sont de 46 mètres de long, 23 mètres de large et 10 mètres de haut (Figure 158C).

En pratique, la majorité des applications que l'on trouve dans la littérature sont réalisées avec des machines 5-axes en configuration poignet car les dimensions du berceau limitent la taille des composants à réaliser.

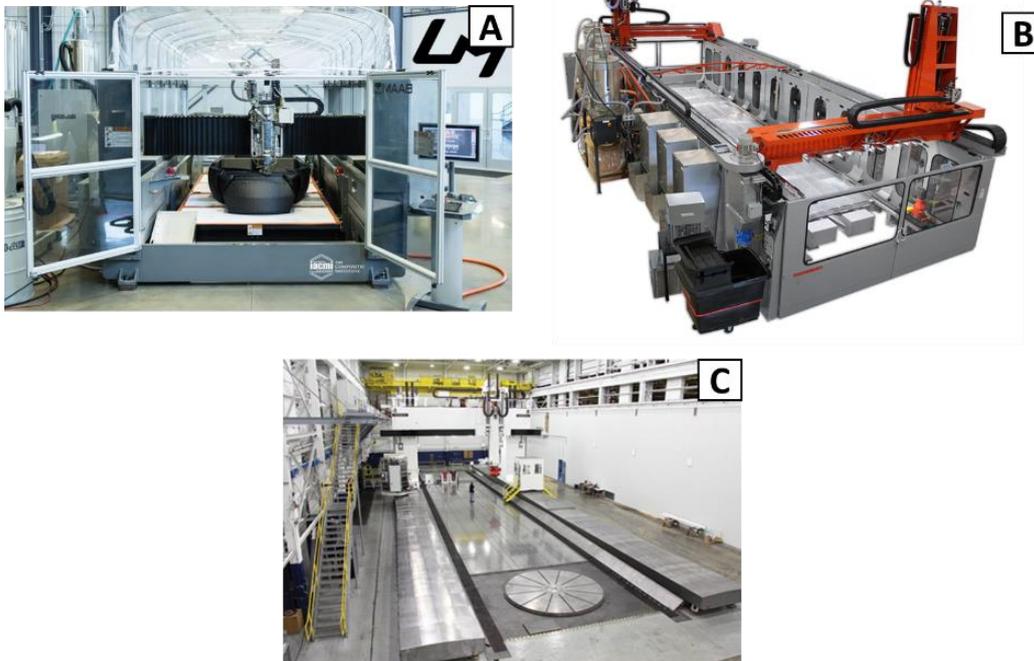


Figure 158 : machines 5-axes de grandes dimensions utilisées dans le cadre de la fabrication additive de composants de grandes dimensions à partir de polymères thermoplastiques fondus

1.3.2. BRAS ROBOTISES 6-AXES

Caractéristiques des bras robotisés 6-axes

Les robots industriels sont divisés en de multiples catégories, ayant chacune des structures cinématiques différentes : robots 6-axes, robots SCARA (autrement appelés robots 4 axes), robots Picker, robot parallèles Delta ou robots cartésiens [173]. Dans le cadre de la fabrication additive de composants de grandes dimensions à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus, la totalité des applications utilisant des robots industriels est réalisée par l'intermédiaires de bras robotisés 6-axes de type anthropomorphe. Par conséquent, dans la suite de cette partie, seuls ces derniers seront développés.

La structure cinématique d'un bras robotisé 6-axes est de type ouverte, constituée de 6 axes rotatifs θ_i ($1 \leq i \leq 6$) joints entre eux par 7 corps rigides. Elle permet d'orienter l'axe de l'effecteur \vec{O} et la direction d'avance \vec{V} suivant n'importe quelle direction de l'espace (Figure 159A) [174]. La description d'un bras robotisé reprend le lexique du corps humain : pied (Figure 159B), épaule (Figure 159C), coude (Figure 159D) et poignet (Figure 159E).

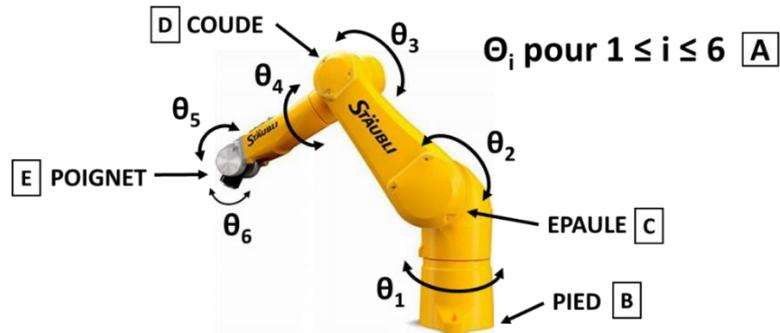


Figure 159 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, structure cinématique des bras robotisés 6-axes

Ce vocabulaire est utilisé afin de décrire la posture d'un robot, qui correspond à la position de l'épaule (à gauche ou à droite), du coude (positif ou négatif) et du poignet (positif ou négatif). La pose d'un robot correspond quant à elle à une position et une l'orientation de l'effecteur dans l'espace de travail du robot. Pour une seule et même pose d'un bras robotisé 6-axes, 8 postures différentes peuvent être utilisées (2^3 possibilités). Par conséquent, les bras robotisés 6-axes font face à des singularités cinématiques dues à leur structure cinématique. Lors du suivi d'une trajectoire de fabrication, le passage par une position singulière du bras robotisé a pour effet de fortement diminuer la vitesse de déplacement du TCP (par rapport à sa vitesse de consigne) et de fortement augmenter la vitesse de rotation des axes en mouvement. Un point de singularité est traversé, lors du suivi d'une trajectoire de fabrication, lorsque le robot passe d'une posture à une autre. Il existe trois types de singularités [175] :

- les singularités de poignet, qui sont les plus fréquemment rencontrées. Elles se produisent lorsque les axes N°4 et N°6 du bras robotisé deviennent colinéaires (la valeur de l'axe N°5 est égale à 0°) et ont pour conséquence de fortement ralentir la vitesse de déplacement de l'effecteur dans la direction de l'axe N°5 (Figure 160Ai) ;
- les singularités de coude, qui se produisent lorsque le centre du poignet se trouve sur le plan passant par les axes N°2 et N°3 du robot. Cette singularité est due au passage de l'axe N°3 par une valeur nulle (Figure 160Aii) ;
- les singularités d'épaule, qui se produisent lorsque le centre du poignet du robot coïncide avec un plan passant par les axes N°1 et N°2. Cette singularité est la plus difficile à anticiper car, contrairement aux singularités de poignet et de coude, elle dépend de la position de plusieurs axes du bras robotisé. Les mouvements de l'effecteur dans une direction colinéaire à l'axe N°2 deviennent impossibles (Figure 160Aiii).

L'espace de travail d'un robot, le plus souvent ouvert, est défini comme l'ensemble des poses atteignables par l'effecteur accroché à son interface mécanique. Il est fonction :

- de la longueur de chacun des segments et des limites angulaires du bras robotisé ;
- des dimensions de l'effecteur utilisé ;
- du positionnement du pied : au sol (Figure 160Bi), sur le côté (Figure 160Bii), vers le haut (Figure 160Biii)
- de la présence ou non d'axes supplémentaires : ajout d'un ou deux axes rotatifs lorsque le bras robotisé est positionné face à un berceau [20] (Figure 160Ci), ajout d'un axe linéaire lorsque le bras robotisé est positionné sur un rail (Figure 160Cii) ou encore ajout de deux ou trois axes linéaires lorsque le bras robotisé est positionné sur un portique (Figure 160Ciii).

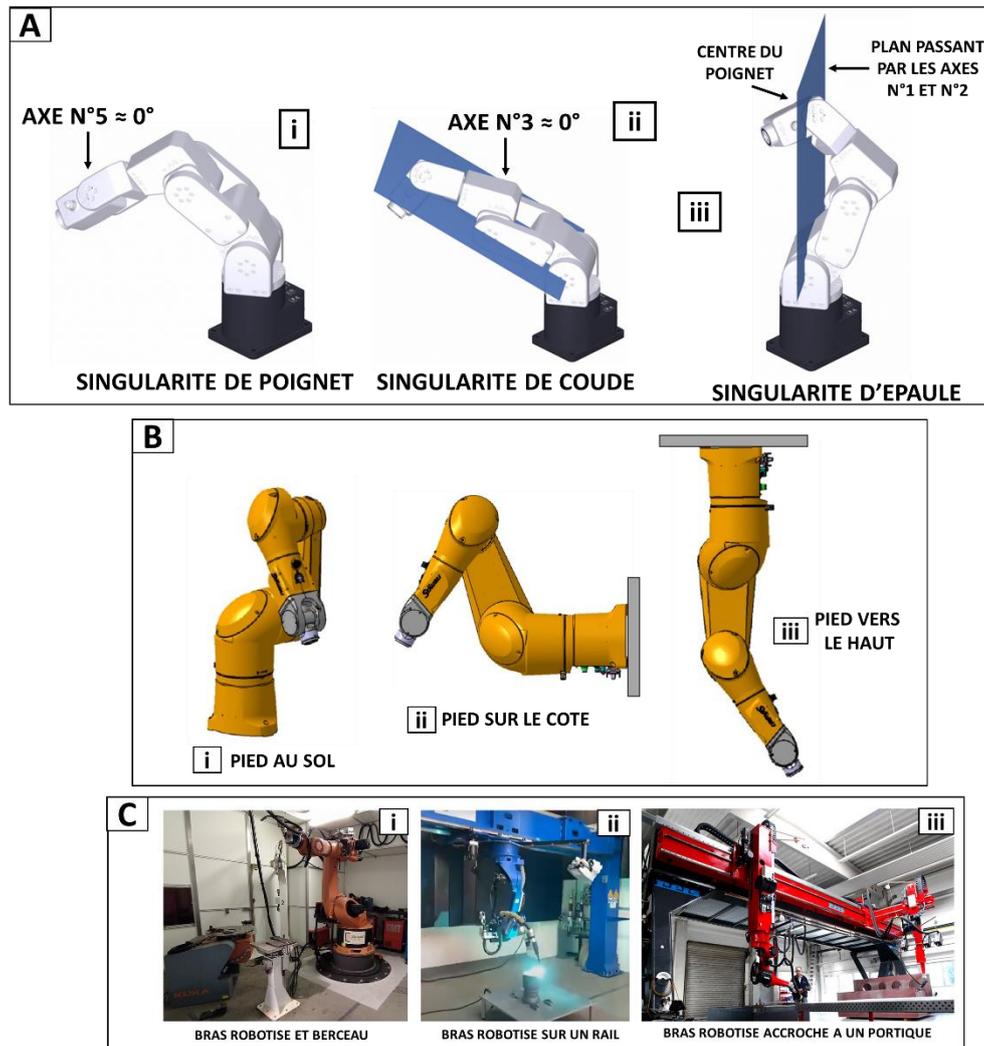


Figure 160 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, singularités – positionnement – axes supplémentaires d’un bras robotisé 6-axes

L’espace de travail d’un bras robotisé étant à 6 dimensions, il est impossible de le représenter graphiquement [173]. Il contient des partitions internes, appelées « aspects », au sein desquelles le bras ne rencontre pas de singularité (le bras garde la même posture) [176]. La présence de singularités complexifie fortement la génération des trajectoires de fabrication robotisées.

Bras robotisés 6-axes au sein de la littérature scientifique

L’usage des bras robotisés 6-axes dans le cadre de la fabrication additive de composants de grandes dimensions à partir de polymères thermoplastiques fondus est évoqué à plusieurs reprises au sein de la littérature scientifique :

- Yuan et al. [177] ont réalisé une structure non conventionnelle inspirée de l’architecture des toiles d’araignées en utilisant un bras robotisé 6-axes dans le cadre d’un projet à visée architecturale (Figure 161A) ;
- Semmoudi et al. [178] utilisent, dans le cadre du projet LASCALA, un bras robotisé 6-axes afin de réaliser des composants de grandes dimensions (Figure 161B) ;
- l’entreprise Drawn, basée à Lyon, utilise un bras robotisé 6-axes afin de réaliser des pièces d’ameublement de grandes dimensions [179] (Figure 161C) ;

- l'entreprise AREVO utilise des bras robotisés dans le cadre de sa plateforme RAM (pour Robot-based Additive Manufacturing) afin de réaliser des composants de grandes dimensions à partir de filaments renforcés de fibres continues [180] (Figure 161D) ;
- l'entreprise Stratasys a développé deux procédés de fabrication utilisant des bras robotisés 6-axes, le procédé « Robot Composite 3D Demonstrator » et le procédé « Infinite Build 3D Demonstrator », qui ont pour objectif la réalisation de composant de grandes dimensions réalisés en matériaux thermoplastiques renforcés de fibres continues [181] (Figure 161E).

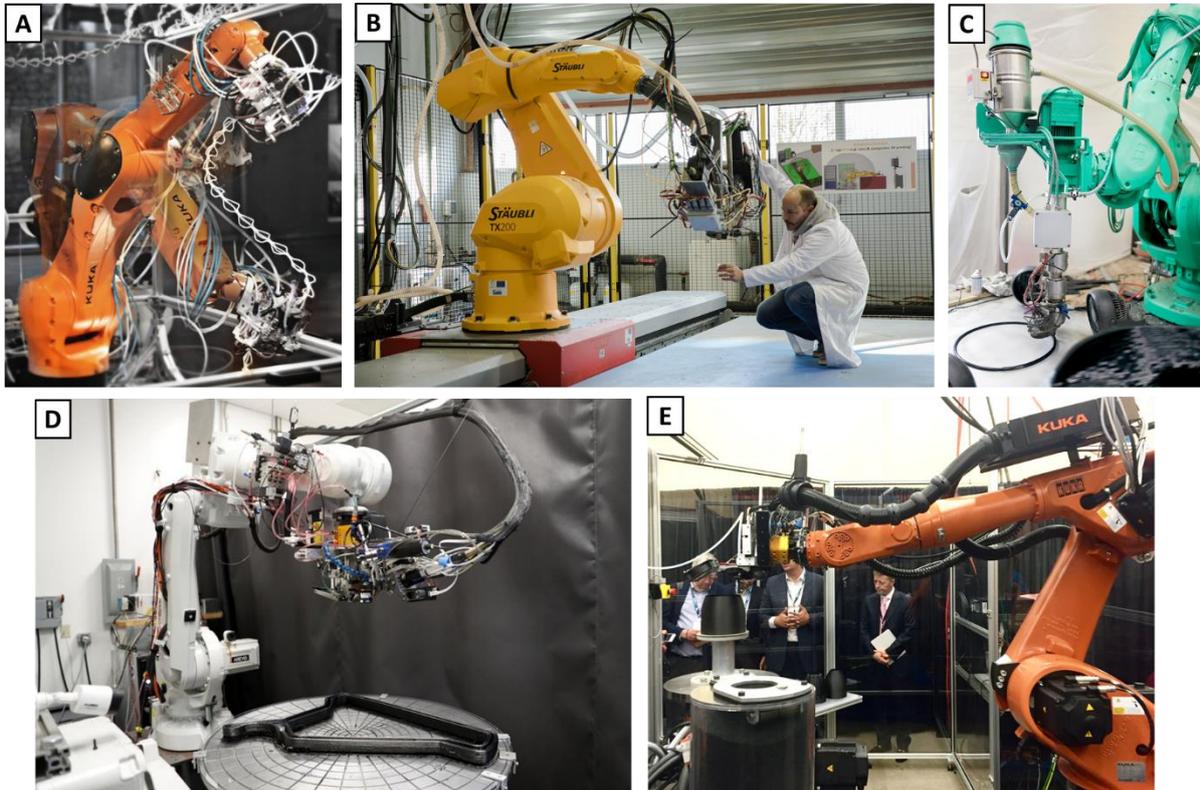


Figure 161 : bras robotisés 6-axes utilisés dans le cadre de la fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus

1.3.3. CONCLUSION SUR LES PORTEURS

Les porteurs permettent à un effecteur additif ou soustractif de suivre les trajectoires de fabrication qui lui ont été définies tout en contrôlant son orientation en chacun des points. Nous avons choisi de n'utiliser dans ces travaux qu'un seul et même porteur afin de réaliser l'ensemble des stratégies de fabrication. Le porteur pourra être une machine (cartésienne, delta, 5-axes avec configuration berceau ou poignet) ou un bras robotisé 6-axes. Les caractéristiques des porteurs permettant de réaliser un choix adapté aux stratégies de fabrication sont synthétisées dans le Tableau 7. Elles seront utilisées au sein de la partie 3 portant sur la méthodologie de choix et de paramétrage d'un moyen de fabrication.

PORTEUR	MACHINES CARTESIENNES	MACHINES DELTA	MACHINES 5-AXES / BERCEAU	MACHINES 5-AXES / POIGNET	ROBOTS 6-AXES
DEGRES DE LIBERTE CINEMATIQUE	3 TRANSLATIONS	3 TRANSLATIONS	3 TRANSLATIONS + 2 ROTATIONS	3 TRANSLATIONS + 2 ROTATIONS	6 ROTATIONS – AJOUT D'AXES SUPPLEMENTAIRES POSSIBLE
ORIENTATION DE L'AXE DE L'EFFECTEUR \vec{O}	VERTICALE	VERTICALE	VERTICALE	NOMBREUSES ORIENTATIONS	TOUTES LES ORIENTATIONS
ORIENTATION DE LA DIRECTION D'AVANCE \vec{V}	FIXE	FIXE	VARIABLE - NON PARAMETRABLE	VARIABLE - NON PARAMETRABLE	PARAMETRABLE
PLATEAU DE FABRICATION	FIXE OU EN MOUVEMENT SUIVANT UN AXE	FIXE	DEUX AXES DE ROTATION	FIXE	FIXE – UN OU DEUX AXES DE ROTATIONS
ESPACE DE TRAVAIL	PARALLELEPIPE RECTANGLE	CYLINDRIQUE	HEMISPHERIQUE	PARALLELEPIPE RECTANGLE	NON REPRESENTABLE GRAPHIQUEMENT

Tableau 7 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, paramètres intrinsèques des porteurs

1.4. CONCLUSION SUR LES NOTIONS RELATIVES AU CHOIX ET AU PARAMETRAGE DU MOYEN DE FABRICATION

Dans cette partie, nous avons d'abord défini la notion de moyen de fabrication comme l'ensemble Effecteurs – Porteur. Nous avons ensuite développé les notions relatives aux effecteurs. Ces derniers sont divisés en deux catégories :

- effecteurs soustractifs, constitués d'un ensemble « Outil de coupe – Porte outil », attachés au moyen de fabrication par l'intermédiaire d'une broche et ayant pour objectif de retirer les surépaisseurs volontairement ajoutées à la maquette numérique du composant à fabriquer ;
- effecteurs additifs, ayant pour objectif de déposer des cordons de matériaux polymères thermoplastiques fondus suivant des trajectoires additives précédemment paramétrées. Ils comportent les éléments nécessaires au procédé de fabrication (dépôt de fil fondu ou extrusion de granulés thermoplastiques) et se terminent par une buse d'injection permettant d'extruder des cordons de matériaux polymères thermoplastiques fondus.

Les effecteurs font face à des problématiques qui seront présentées dans la partie suivante et résolues dans le cadre de la méthodologie de choix et de paramétrage du moyen de fabrication : choix d'un procédé de fabrication, définition de la buse d'injection, orientation d'un effecteur le long d'une trajectoire de fabrication.

Puis nous expliciterons les notions relatives aux porteurs. Ces derniers, qui ont pour objectif de permettre à un effecteur de suivre les trajectoires de fabrication définies tout en contrôlant son orientation en chacun des points, sont divisés en deux catégories : machines (cartésiennes, delta, 5-axes avec configuration berceau ou poignet) ou bras robotisé 6-axes. Les caractéristiques déterminant le choix d'un porteur sont les suivantes : structure cinématique, qui permet d'orienter l'effecteur au cours du suivi d'une trajectoire de fabrication (axe de l'effecteur \vec{O} et direction d'avance \vec{V}) et espace de travail, qui doit être assez volumineux pour réaliser l'ensemble des stratégies de fabrication. Reste le choix d'un porteur capable de réaliser les stratégies de fabrication en orientant l'effecteur tel que paramétré. Il fera l'objet de problématiques qui seront présentées dans la partie suivante et résolues dans le cadre de la méthodologie de choix et de paramétrage d'un moyen de fabrication.

2. PROBLEMATIQUES RELATIVES AU CHOIX ET AU PARAMETRAGE DU MOYEN DE FABRICATION

2.1. CHOIX ET PARAMETRAGE DES EFFECTEURS ADDITIFS

Le choix et le paramétrage des effecteurs additifs, nécessaires à la réalisation des stratégies volumiques et de renforcement, sont un obstacle scientifique qu'il faut lever tout en tenant compte des éléments suivants :

- optimisation de l'adhésion entre les couches de matière déposées, influant sur l'orientation de l'effecteur le long des trajectoires de fabrication ;
- prise en compte des stratégies de sectionnement et des trajectoires de renforcement, influant sur l'orientation de l'effecteur le long des trajectoires de fabrication et sur les géométries de la buse d'injection ;
- prise en compte du matériau utilisé et des dimensions des cordons déposés, influant sur le paramétrage de la buse d'injection.

Nous proposerons dans la suite du chapitre une méthodologie qui permette le choix et le paramétrage des effecteurs additifs tout en tenant compte des éléments précédemment présentés.

2.2. CHOIX ET PARAMETRAGE DU PORTEUR

Le choix et le paramétrage d'un porteur capable de réaliser l'ensemble des stratégies de fabrication représentent également un verrou scientifique que nous nous proposons de traiter dans cette thèse. Il nous faut prendre en compte les éléments suivants :

- dimensions du composant à réaliser, impactant les dimensions de l'espace de travail du porteur ;
- orientations des effecteurs additifs et soustractifs le long des trajectoires de fabrication, impactant le choix de l'architecture cinématique du porteur ;
- vérification de l'absence de collisions (entre le porteur, les effecteurs et le plateau de fabrication), de singularités cinématiques, de mouvements indésirables ou de limites d'axes le long des trajectoires des stratégies de fabrication.

Dans la suite de ce chapitre, une méthodologie permettant le choix et le paramétrage d'un porteur tout en prenant en compte les éléments précédemment présentés sera proposée.

3. METHODOLOGIE DE CHOIX ET DE PARAMETRAGE DU MOYEN DE FABRICATION

La méthodologie de choix et de paramétrage du moyen de fabrication a pour objectif de répondre aux problématiques scientifiques énoncées au sein de la partie précédente. Elle est divisée en trois étapes :

- le choix et le paramétrage des effecteurs additifs et soustractifs ayant pour objectif de déposer ou de retirer de la matière suivant les paramètres déterminés lors de l'étape de mise en place des stratégies de fabrication (Figure 162, 3.1) ;
- le choix et le paramétrage du porteur, permettant de mettre en mouvement les effecteurs suivant les trajectoires de fabrication (Figure 162, 3.2) ;
- la réalisation d'une étape de dérisquage, permettant de valider de manière empirique la préparation à la fabrication du composant au niveau de géométries jugées critiques (Figure 162, 3.3).

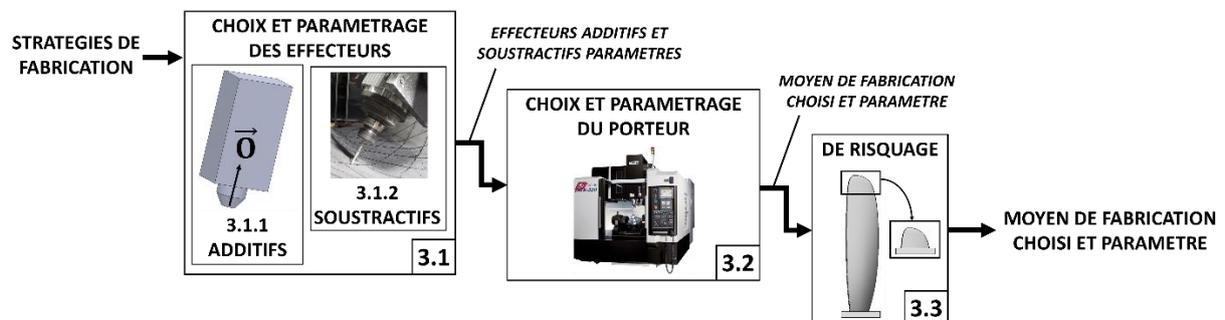


Figure 162 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, étapes de la méthodologie de choix et de paramétrage du moyen de fabrication

Nous détaillerons ces trois étapes par la suite et définirons des règles concernant le paramétrage des effecteurs et du porteur.

3.1. CHOIX ET PARAMETRAGE DES EFFECTEURS

3.1.1. CHOIX ET PARAMETRAGE DES EFFECTEURS ADDITIFS

Les données nécessaires au choix et au paramétrage des effecteurs additifs sont les trajectoires de fabrication, les dimensions des cordons à déposer, la distance entre les sections et l'orientation de chacune des sections (Figure 163i). Le choix et le paramétrage d'un effecteur additif est divisé en trois étapes : le procédé de fabrication est choisi et paramétré (Figure 163ii), l'effecteur additif est paramétré (Figure 163iii), le parcours des effecteurs additifs le long des trajectoires de fabrication est fixé (Figure 163iv). Au sortir de cette étape, les effecteurs additifs sont choisis et paramétrés (Figure 163v). Le paramétrage d'un effecteur additif est lié à une stratégie de fabrication.

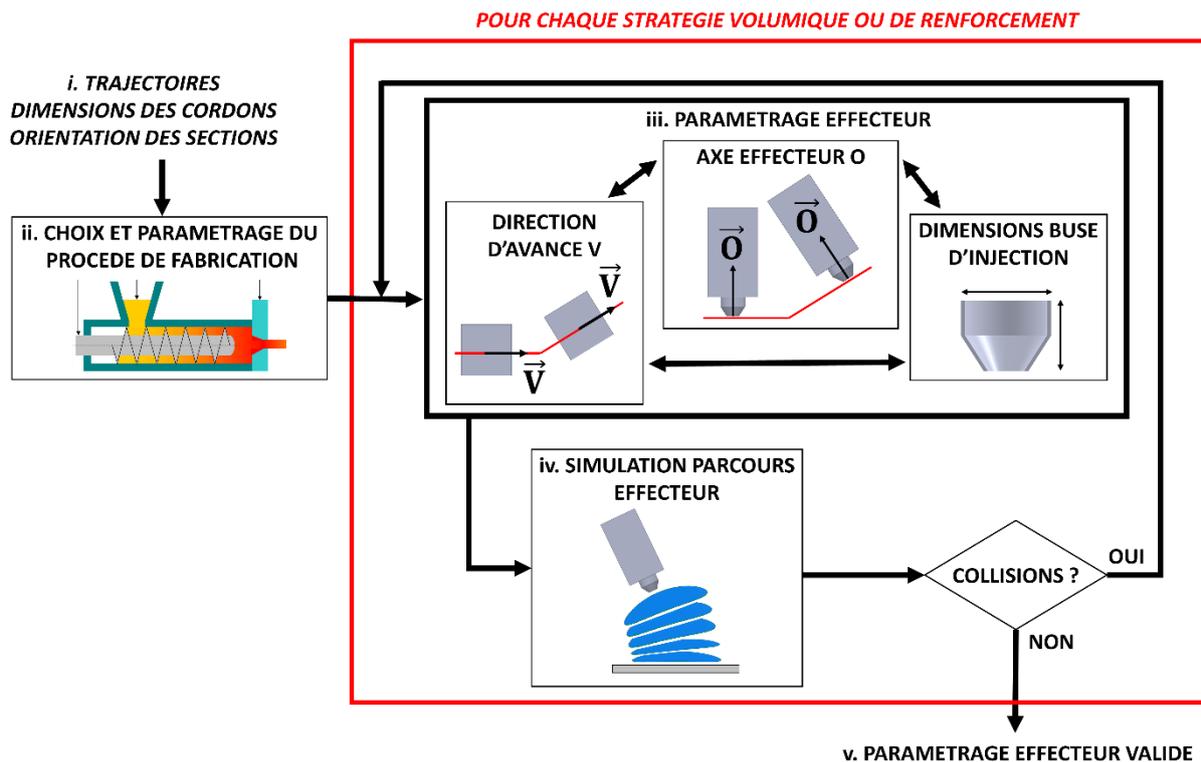


Figure 163 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, étapes de la méthodologie de choix et de paramétrage des effecteurs

Nous développerons par la suite les différentes étapes à respecter afin de choisir et paramétrer un effecteur additif.

ii) CHOIX ET PARAMETRAGE DU PROCEDE DE FABRICATION

Dans le cadre de ces travaux de recherche, nous avons choisi de n'utiliser qu'un seul et même procédé de fabrication afin de réaliser les opérations volumiques et de renforcement d'un composant. Le choix d'un procédé de fabrication est un compromis réalisé entre les propriétés du composant à fabriquer (géométries et dimensions, résolution, matériaux) et les caractéristiques intrinsèques aux procédés de fabrication (matériaux utilisables, débit massique, épaisseur des couches déposées, dimensions des cordons déposés), développées au sein de la partie 1.2.2.1 :

- le procédé d'extrusion de granulés thermoplastiques à des coûts en matière première faibles, autorise un débit massique élevé et ne permet pas d'utiliser des matériaux renforcés de fibres longues ou continues. Il est par conséquent pertinent dans le cadre de la fabrication de composants de grandes et très grandes dimensions destinées à des applications fonctionnelles non structurales (moules et outillages de grandes dimensions). Il sera associé à une opération de parachèvement dans le cadre de la réalisation de surfaces de contact et de contact non intentionnelles ;
- le procédé « Dépôt de fil fondu » est adapté à deux types de réalisation : celle de pièces de moyennes et grandes dimensions ayant des géométries nécessitant une résolution forte ou celle de composants structuraux, nécessitant l'utilisation de matériaux renforcés de fibres longues ou continues. Le coût de revient en matière première globalement élevé et un débit massique limité rendent le procédé « Dépôt de fil fondu » impropre à la réalisation de composants de très grandes dimensions destinés à des applications non structurales.

Le Tableau 8 résume les éléments précédemment énoncés.

PROCEDE	DEPOT DE FIL FONDU	EXTRUSION DE GRANULES THERMOPLASTIQUE
APPLICATIONS STRUCTURALES	X	
APPLICATION NON STRUCTURALES - FORTE RESOLUTION	X	
APPLICATION NON STRUCTURALES - RESOLUTION MOYENNE OU FAIBLE		X

Tableau 8 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, choix d'un procédé de fabrication en fonction des caractéristiques du composant à fabriquer

L'agencement des éléments constituant le procédé de fabrication devra être tel que le volume occupé par ces derniers soit minimisé. Si possible, des éléments seront stockés en mode déporté, c'est-à-dire à un endroit différent de l'effecteur. Par exemple, dans le cadre du procédé « Dépôt de fil fondu », il est possible de déporter le mécanisme d'entraînement du filament, ce qui permet de limiter le volume et de diminuer la masse des éléments liés au procédé et situés au niveau de l'effecteur additif [182].

iii) PARAMETRAGE DES EFFECTEURS

Le paramétrage d'un effecteur additif consiste à définir les dimensions et les géométries de la buse d'injection (Figure 164i), l'orientation de l'axe de l'effecteur \vec{O} (Figure 164ii) ainsi que l'orientation de la direction d'avance \vec{V} (Figure 164iii) pour chacune des stratégies de fabrication en prenant en considération les éléments suivants :

- respect et conservation des dimensions des cordons déposés pendant le suivi des trajectoires de fabrication (règle N°1) ;
- prise en compte des propriétés du matériau déposé et notamment de la présence de fibres continues (règle N°2 et règle N°4) ;
- optimisation de la mise en contact des cordons déposés afin d'améliorer l'adhésion entre les couches de matière (règle N°3) ;
- prise en compte de l'accessibilité afin d'éviter les collisions entre l'effecteur additif et des éléments extérieurs (règle N°5).

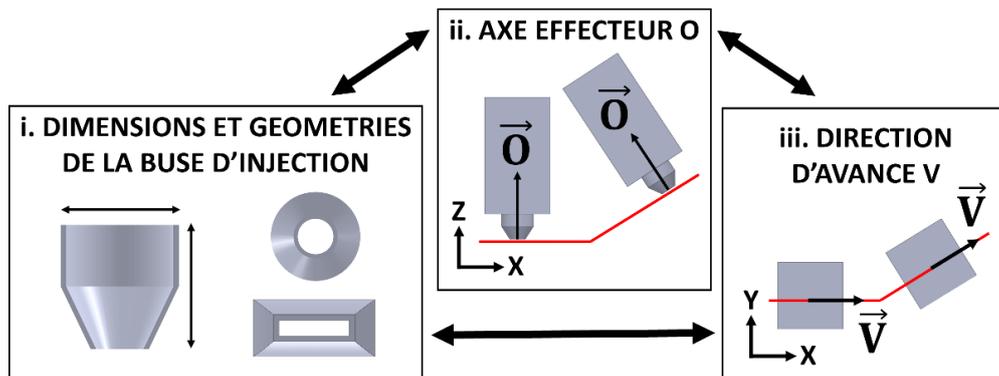


Figure 164 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, paramètres d'un effecteur additif à définir

Les règles précédemment énoncées sont présentées dans la suite de cette partie.

Règle n°1 : respect et conservation des dimensions des cordons à déposer

La géométrie et les dimensions de la section de sortie de la buse d'injection devront permettre d'obtenir des cordons qui aient les dimensions paramétrées lors de l'étape de mise en place des stratégies de fabrication : épaisseur H, largeur des cordons L (Figure 165A) tout en prenant en compte les propriétés viscoélastiques des matériaux déposés. Ces derniers font face au « Barrus effect » (encore appelé « Die

Swell Effect ») en sortie de buse d'injection : le polymère fondu connaît une expansion lorsqu'il quitte la buse d'injection dans un espace libre. Nous déterminerons la géométrie et les dimensions des sections de sortie des buses d'injection par une étape de simulation multiphysique basée sur la théorie de l'extrusion des polymères thermoplastiques et la rhéologie des fluides non-newtoniens ; nous prendrons également en considération la température d'extrusion, le débit massique à travers la buse d'injection et la vitesse d'avance de l'effecteur le long des trajectoires de fabrication (Figure 165B). Ces géométries permettront d'obtenir les cordons aux dimensions souhaitées (Figure 165C). Nous n'avons pas mis en place un modèle multiphysique dans le cadre de ces travaux ; ce sera l'objet de recherches futures.

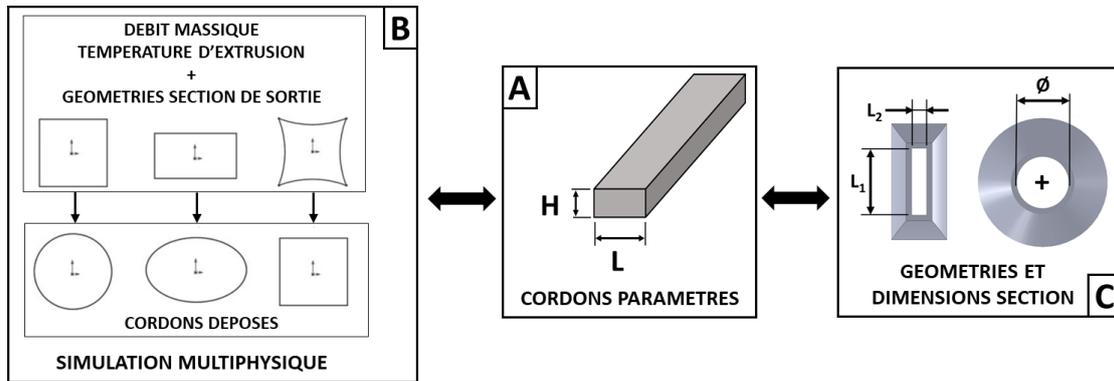


Figure 165 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, paramétrage de la buse d'injection afin de respecter les dimensions des cordons à déposer [183]

Règle n°2 : optimisation de la mise en contact des cordons de matière déposés

L'axe d'un effecteur additif \vec{O} doit être orienté de façon à maximiser la force appliquée entre la couche en cours de dépôt N et la couche précédemment déposée N-1. Cela optimise la mise en contact des cordons, moment pendant lequel se crée le col de diffusion qui permet l'échange de macromolécules, et optimise in fine l'adhésion entre les couches de matière déposées [97]. Lorsque l'axe de l'effecteur additif est perpendiculaire à la trajectoire de fabrication, la force appliquée par l'effecteur est complètement dirigée de la couche N vers la couche N-1 (Figure 166A). Lorsque l'axe de l'effecteur additif a une orientation différente de la normale à la trajectoire de fabrication, la force appliquée par l'effecteur est scindée en deux composantes : la première dirigée de la couche N vers la couche N-1 et la seconde opposée ou suivant la direction d'avance de l'effecteur (Figure 166B).

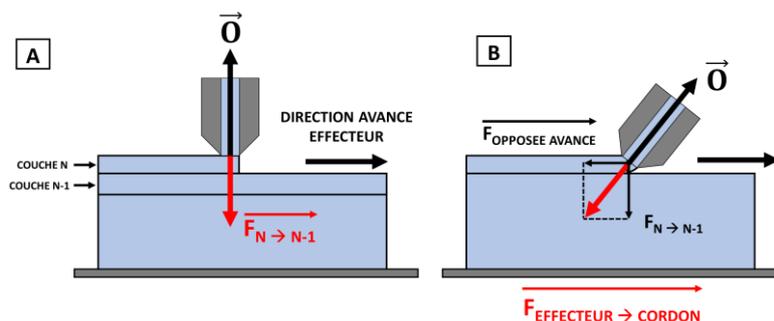


Figure 166 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, forces appliquées par l'effecteur en fonction de son orientation

Par conséquent, l'axe de l'effecteur \vec{O} restera autant que possible perpendiculaire aux trajectoires de fabrication et sera adapté aux différentes stratégies de sectionnement : orientation de l'axe de l'effecteur \vec{O} fixe et verticale dans le cadre d'une stratégie de sectionnement planaire et horizontale (Figure 167A), fixe et différente de la verticale dans le cadre d'une stratégie de sectionnement planaire et non horizontale (Figure 167B) et variant constamment dans le cadre d'une stratégie de sectionnement non planaire (sections concaves, Figure 167C et sections convexes, Figure 167D).

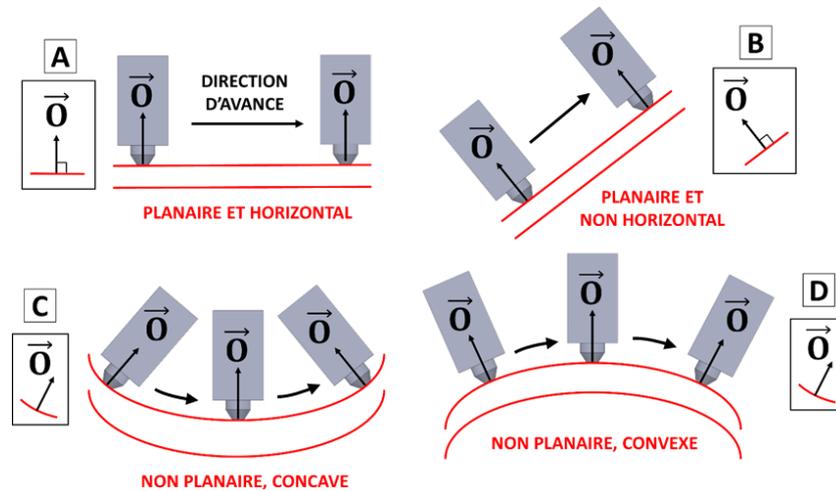


Figure 167 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, orientation de l'axe de l'effecteur en fonction des différentes stratégies de sectionnement

Règle n°3 : conservation des cordons déposés

Le paramétrage de la direction d'avance \vec{V} d'un effecteur additif le long d'une trajectoire de fabrication doit prendre en considération l'emploi d'une buse d'injection non axisymétrique ainsi que la présence de fibres continues au sein du matériau déposé. Dans le cadre de l'utilisation d'une buse non axisymétrique, la direction d'avance \vec{V} de l'effecteur additif impacte la physionomie des cordons déposés ce que met en avant la Figure 168 lors du suivi d'une trajectoire rectiligne entre deux points P_i et P_{i+1} :

- lorsque la direction d'avance reste inchangée, les dimensions du cordon déposé ne varient pas ($R_{\vec{O}}=0^\circ$, Figure 168A) ;
- à l'opposé, dans le cas d'une rotation de 90 degrés autour de l'axe de l'effecteur \vec{O} , les dimensions du cordon déposé sont modifiées ($R_{\vec{O}}=90^\circ$, Figure 168B).

Par conséquent, la direction d'avance dans le cas de l'utilisation d'une buse non axisymétrique, doit être contrôlée lors du suivi d'une trajectoire de fabrication.

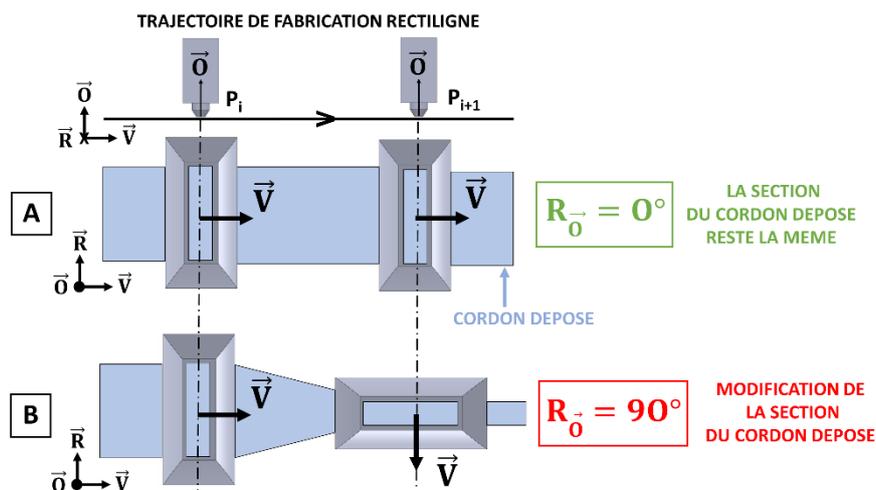


Figure 168 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, impact de la direction d'avance sur les géométries des cordons déposés dans le cas de l'utilisation d'une buse non axisymétrique

La direction d'avance \vec{V} de l'effecteur additif doit également prendre en considération les propriétés du matériau déposé :

- dans le cas de la dépose de matériaux polymères sans renforts ou renforcés de fibres courtes à travers une buse axisymétrique, l'orientation de la direction d'avance \vec{V} entre deux points d'une trajectoire de fabrication P_i et P_{i+1} est sans incidence sur les propriétés des cordons déposés (Figure 169) ;

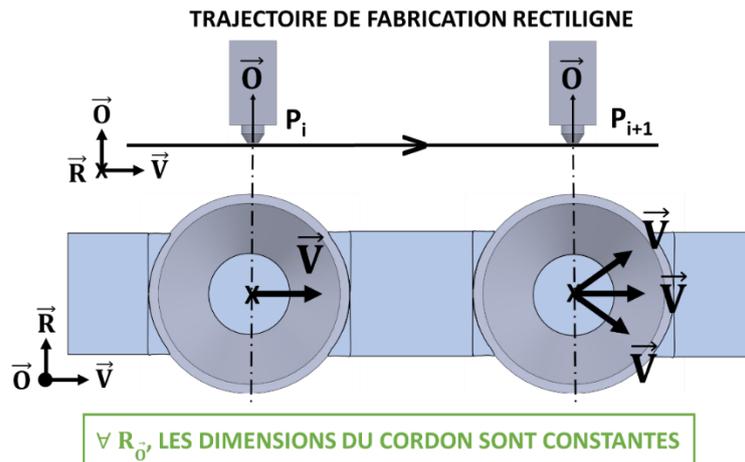


Figure 169 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, la direction d'avance d'un effecteur additif ayant une buse d'injection axisymétrique n'impacte pas les géométries des cordons déposés

- dans le cas de la dépose de matériaux polymères renforcés de fibres continues, l'orientation de la direction d'avance \vec{V} a une incidence sur l'orientation des fibres et donc sur l'état des cordons déposés. Lorsqu'entre deux points d'une trajectoire de fabrication P_i et P_{i+1} , la direction d'avance reste inchangée ($R_{\vec{O}}=0^\circ$), le dépôt des fibres continues est correct (Figure 170A). A l'opposé, lorsqu'entre deux points P_i et P_{i+1} l'effecteur effectue une rotation de 180° autour de l'axe \vec{O} , les fibres s'entremêlent les unes aux autres (Figure 170B).

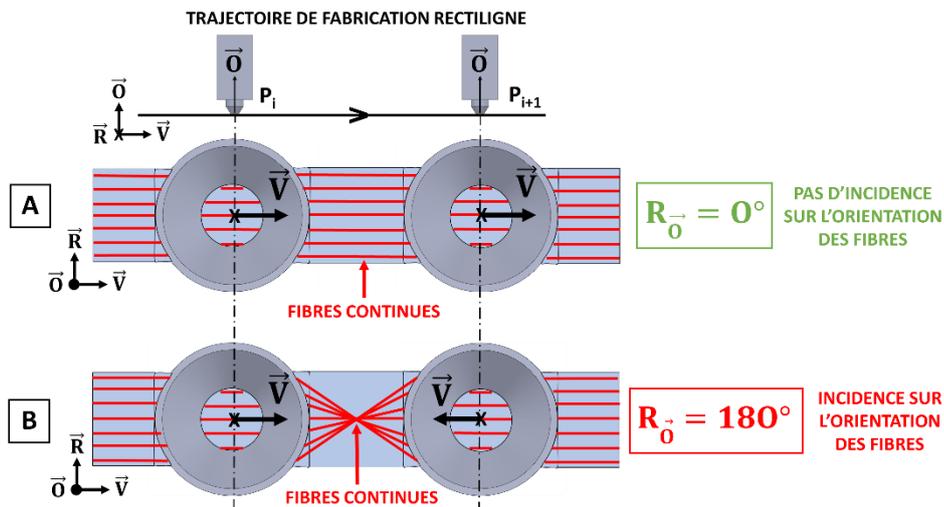


Figure 170 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, incidence de la direction d'avance sur l'orientation des fibres déposés lors du suivi d'une trajectoire de fabrication

L'utilisation d'un matériau renforcé de fibres continues oblige à contrôler la direction d'avance \vec{V} le long des trajectoires de fabrication. Le Tableau 9 fait la synthèse des éléments concernant la nécessité ou non de contrôler la direction d'avance d'un effecteur additif le long d'une trajectoire de fabrication.

BUSE D'INJECTION	MATERIAUX	CONTRÔLE DIRECTION D'AVANCE
AXISYMETRIQUE	FIBRES COURTES / SANS RENFORTS	NON
AXISYMETRIQUE	FIBRES LONGUES / CONTINUES	OUI
NON AXISYMETRIQUE	FIBRES COURTES / SANS RENFORTS	OUI
NON AXISYMETRIQUE	FIBRES LONGUES / CONTINUES	OUI

Tableau 9 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, nécessité de contrôler la direction d'avance en fonction de la buse d'injection et du matériau utilisé

Afin de prendre en considération les contraintes induites par l'utilisation d'une buse non axisymétrique et / ou la présence de fibres continues au sein du matériau déposé, la direction d'avance \vec{V} sera orientée suivant la direction de déplacement de l'effecteur, ce qui est illustré par la Figure 171 dans le cas d'une trajectoire de fabrication circulaire entre les points P_i , P_{i+1} et P_{i+2} . La rotation autour de l'axe de l'effecteur \vec{O} afin de passer de $\vec{V}_{P_i \rightarrow P_{i+1}}$ à $\vec{V}_{P_{i+1} \rightarrow P_{i+2}}$ sera progressive afin d'éviter un changement brutal de direction pouvant endommager les fibres ou changer la physionomie du cordon déposé.

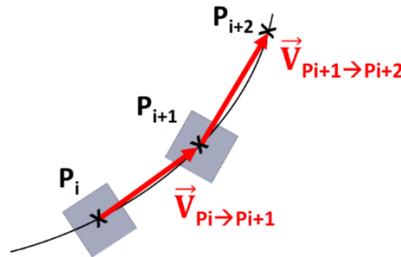


Figure 171 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, paramétrage de la direction d'avance suivant la direction de déplacement de l'effecteur additif

Règle n°4 : choix d'un matériau afin de constituer la buse d'injection

Les propriétés du matériau déposé dans le cadre d'une stratégie de fabrication influenceront sur le choix du matériau qui sera utilisé pour la buse d'injection :

- dans le cadre de l'utilisation d'un matériau polymère thermoplastique sans renforts, le laiton peut être utilisé car ce dernier, excellent conducteur de chaleur, répond parfaitement aux besoins ;
- dans le cadre de l'utilisation de matériaux polymères renforcés de fibres, il faudra utiliser un matériau résistant à l'abrasion [184]. En effet, une buse d'injection en laiton serait dégradée suite à l'extrusion de quelques kilogrammes de polymère renforcé de fibres courtes de carbone. La littérature scientifique mentionne l'utilisation de buses d'injection ayant une section de sortie en Carbure de bore (B4C) qui leur permet de résister aux matériaux les plus abrasifs [185].

Règle n°5 : prise en compte de l'accessibilité aux trajectoires de fabrication

La problématique d'accessibilité est la suivante : l'effecteur additif doit pouvoir accéder à l'ensemble des trajectoires de fabrication suivant l'orientation conférée, en tenant des règles précédemment décrites (orientation de l'axe de l'effecteur \vec{O} et de la direction d'avance \vec{V}) sans entrer en collision avec le plateau de fabrication (Figure 172A), avec une entité précédemment réalisée (Figure 172B) ou avec des sections non planes (Figure 172C). Dans le cas des sections non planes, il y a un risque de collisions lors de la réalisation de sections concaves placées à l'horizontale ou de sections convexes placées à la verticale.

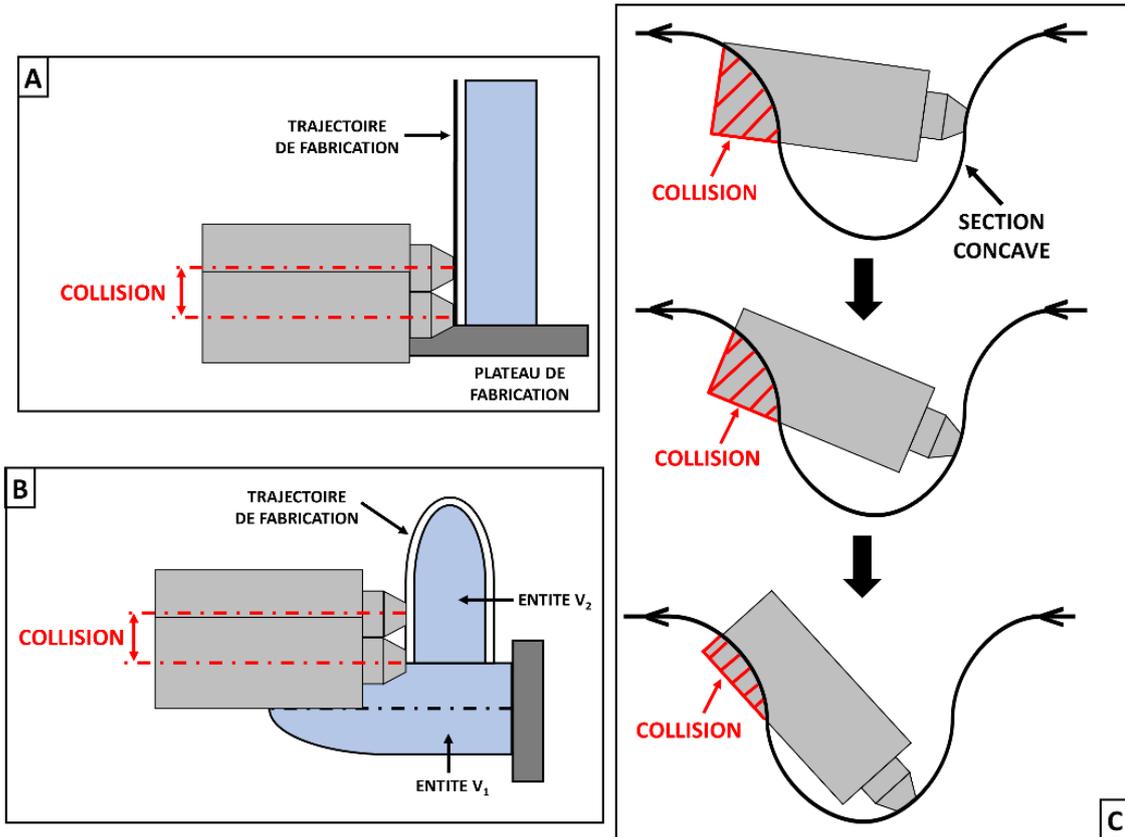


Figure 172 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, collisions possibles entre un effecteur additif et des éléments extérieurs

L'orientation de l'effecteur (axe de l'effecteur \vec{O} , direction d'avance \vec{V}) et la longueur de la buse d'injection seront alors spécifiquement paramétrées afin de permettre à l'effecteur additif d'atteindre les points les moins accessibles des trajectoires de fabrication. C'est ce que met en évidence la Figure 24 A dans le cas d'une trajectoire de renforcement prenant naissance au pied d'une entité. Afin de permettre l'accessibilité de l'effecteur à la partie non accessible de la trajectoire de renforcement, la longueur de la buse d'injection est augmentée (Figure 173A) et l'orientation de l'axe de l'effecteur est modifiée, passant progressivement d'une valeur $\vec{O}_{initial}$ à une valeur \vec{O}_{final} (Figure 173B) afin de permettre à l'effecteur l'accessibilité à l'intégralité de la trajectoire de renforcement (Figure 173C).

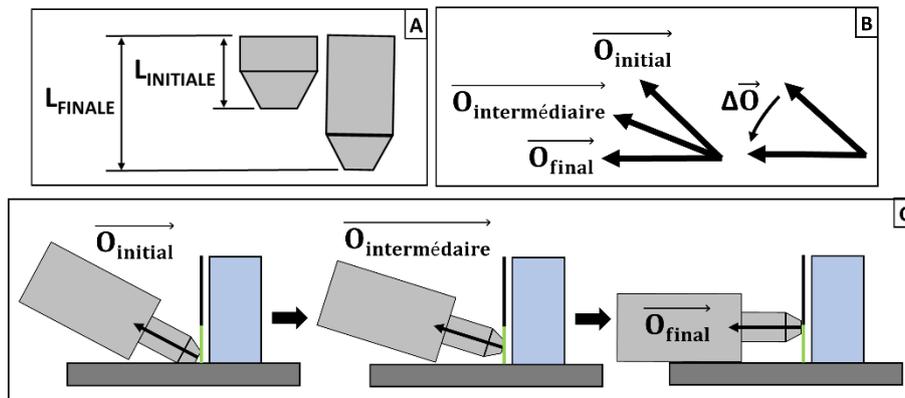


Figure 173 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, modification de l'orientation de l'effecteur et la longueur de la buse d'injection afin d'éviter une collision avec le plateau de fabrication

iv) **SIMULATION PARCOURS EFFECTEUR**

Nous avons finalement réalisé une étape de simulation du parcours des effecteurs pour chacune des stratégies de fabrication par l'intermédiaire d'un logiciel de fabrication assistée par ordinateur (FAO). Un tel logiciel permet de s'assurer de l'absence de collisions entre les effecteurs et les éléments extérieurs (plateau de fabrication, entités précédemment réalisées, sections non planes) (Figure 174). Lorsque la simulation souligne l'absence de collisions, l'étape de paramétrage des effecteurs additifs est achevée. Dans le cas contraire, il faudra réaliser une modification de l'orientation et de la longueur de la buse d'injection.

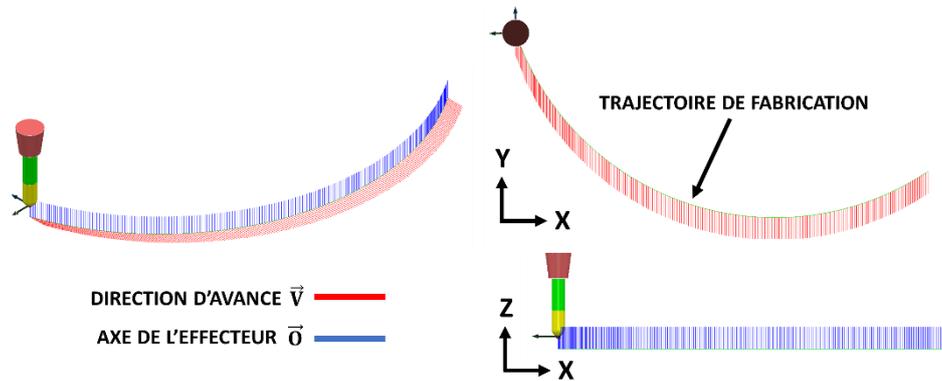


Figure 174 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, simulation du parcours d'un effecteur additif le long d'une trajectoire de fabrication

CONCLUSION SUR LE CHOIX ET LE PARAMETRAGE DES EFFECTEURS ADDITIFS

Nous avons consacré cette partie au choix et au paramétrage des effecteurs additifs, afin d'obtenir le dépôt de cordons de matière thermoplastique fondus aux dimensions paramétrées le long des trajectoires des stratégies volumiques et de renforcement définies lors de l'étape A2 de la méthodologie. Nous avons développé à ce sujet une méthodologie qui se propose de résoudre les problématiques liées au choix de l'orientation des effecteurs le long des trajectoires de fabrication en fonction de critères liés :

- à l'optimisation de l'adhésion entre les couches de matière déposées, selon les matériaux ou la physionomie des cordons déposés ;
- aux collisions entre l'effecteur et des éléments extérieurs, ayant trait à l'accessibilité des effecteurs.

Dans une première partie, concernant le choix et le paramétrage d'un procédé de fabrication, nous avons fait un compromis entre les propriétés du composant à fabriquer et les caractéristiques intrinsèques aux procédés de fabrication : le procédé d'extrusion de granulés thermoplastiques est pertinent dans le cadre de la fabrication de composants de grandes et très grandes dimensions destinés à des applications fonctionnelles non structurales (moules et outillages de grandes dimensions) ; en revanche le procédé « Dépôt de fil fondu » est adapté à la réalisation de pièces de moyennes et grandes dimensions avec des géométries qui demandent une résolution forte ou à la réalisation de composants structuraux, qui nécessitent l'utilisation de matériaux renforcés de fibres longues ou continues.

Dans un second temps nous avons explicité le paramétrage des effecteurs additifs qui s'applique aux géométries de la buse d'injection, l'orientation de l'axe de l'effecteur \vec{O} et l'orientation de la direction d'avance \vec{V} pour chacune des stratégies de fabrication. Nous avons pris en considération les dimensions et la mise en contact des cordons déposés, les propriétés des matériaux utilisés et l'accessibilité des effecteurs aux trajectoires de fabrication. Afin de respecter ces éléments, nous avons développé des règles synthétisées au sein du Tableau 10.

PROBLEMATIQUES	SOLUTIONS
RESPECT DE LA DIMENSIONS CORDONS	CHOIX DE LA GEOMETRIE DE LA SECTION DE SORTIE, D'UN DEBIT MASSIQUE ET D'UNE VITESSE D'AVANCE DE L'EFFECTEUR VIA SIMULATION MULTIPHYSIQUE
CONSERVATION DE LA GEOMETRIES CORDONS DEPOSES	CONTRÔLE DIRECTION D'AVANCE \vec{V} - SUIVANT DIRECTION DE DEPLACEMENT
PRISE EN COMPTE DE L'ORIENTATION DES FIBRES CONTINUES	CONTRÔLE DIRECTION D'AVANCE \vec{V} - SUIVANT DIRECTION DE DEPLACEMENT
OPTIMISATION DE LA MISE EN CONTACT DES CORDONS DE MATIERE DEPOSES	CONTRÔLE AXE DE L'EFFECTEUR \vec{O} - PERPENDICULAIRE AUX TRAJECTOIRES DE FABRICATION
PRISE EN COMPTE DE L'ACCESSIBILITE – EVITEMENT DES COLLISIONS	MODIFICATION DE L'AXE DE L'EFFECTEUR \vec{O} ET DE LA DIRECTION D'AVANCE \vec{V} MODIFICATION DE LA LONGUEUR BUSE D'INJECTION

Tableau 10 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, problématiques rencontrées et solutions mises en place lors du paramétrage d'un effecteur additif

Suite au paramétrage des effecteurs, nous avons réalisé une étape de simulation le long des trajectoires des stratégies de fabrication afin de s'assurer de l'absence de collisions. Puis nous avons choisi et paramétré les effecteurs additifs afin de satisfaire les paramètres déterminés lors de la mise en place des stratégies de fabrication et de prendre en compte les contraintes liées au procédé et au matériau utilisé.

3.2 CHOIX ET PARAMETRAGE DU PORTEUR

Dans cette partie nous présenterons une méthodologie permettant le choix et le paramétrage d'un porteur. Le paramétrage des effecteurs est utilisé comme donnée d'entrée (Figure 175i). Le choix et le paramétrage d'un porteur sont divisés en 4 étapes :

- le choix d'une architecture cinématique est d'abord réalisé (Figure 175ii) ;
- l'espace de travail nécessaire à la réalisation du composant est déterminé et paramétré (Figure 175iii) ;
- les stratégies de fabrication sont simulées afin de vérifier l'absence de collisions et de singularités cinématiques (Figure 175iv).

Au sortir de cette étape, le porteur est choisi et paramétré (Figure 175v).

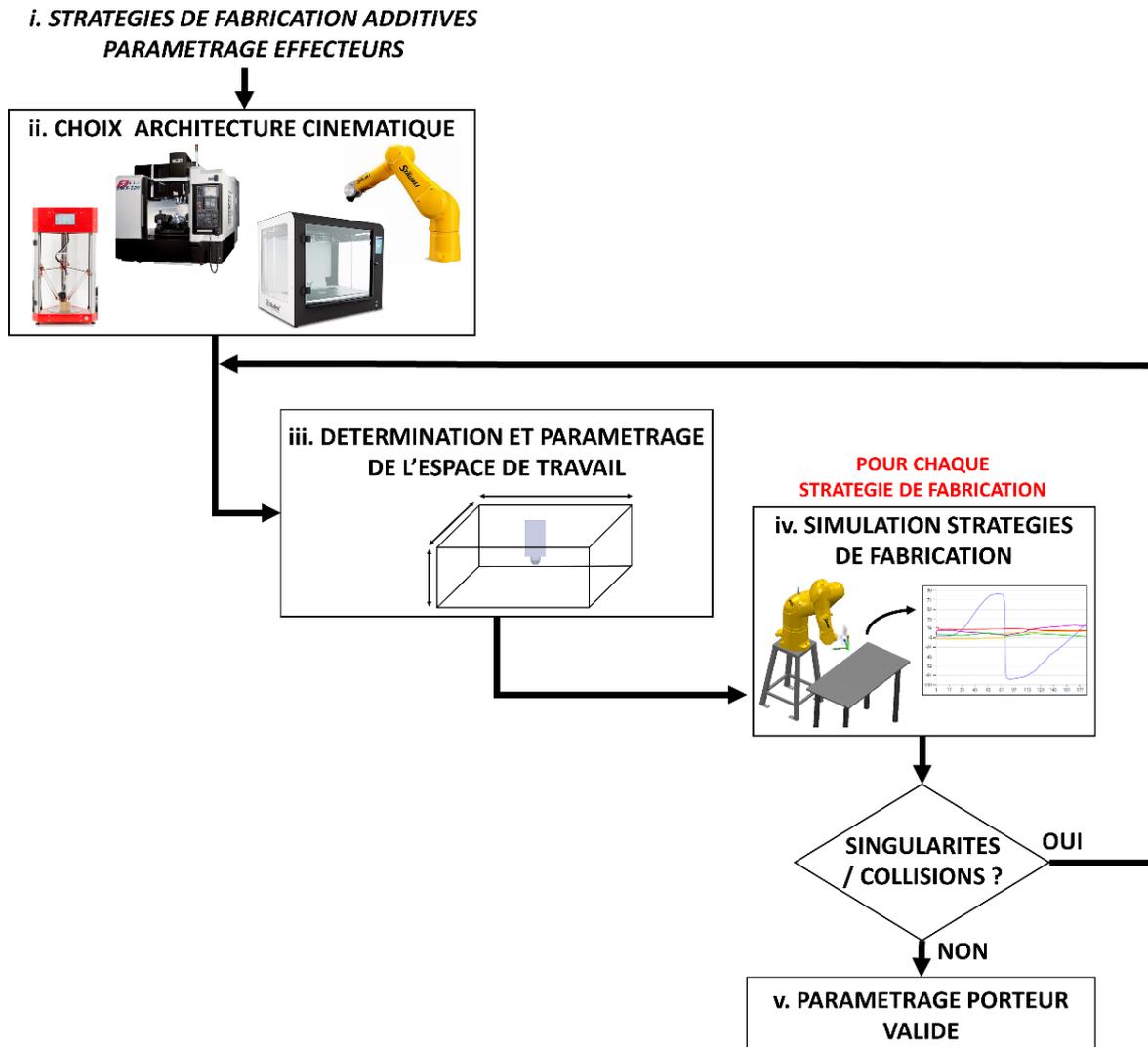


Figure 175 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, étapes de la méthodologie de choix et de paramétrage du porteur

Dans la suite de cette partie, nous détaillerons les différentes étapes à respecter afin de choisir et paramétrer un porteur.

ii. CHOIX ARCHITECTURE CINEMATIQUE

Le choix d'une architecture cinématique, premier paramètre à déterminer, est contraint par deux éléments :

- l'orientation de l'axe de l'effecteur \vec{O} , qui doit rester perpendiculaire aux trajectoires de fabrication afin d'optimiser la mise en contact et donc in fine l'adhésion entre les cordons déposés. Cette orientation dépend de la stratégie de sectionnement déterminée lors de la première étape de la méthodologie ;
- l'orientation de la direction d'avance \vec{V} , qui peut être contrôlée ou non. Elle est fonction du type de buse d'injection (symétrique, non axisymétrique) et du matériau utilisé (sans renforts, renforts fibres courtes, renforts fibres continues).

Plusieurs associations Stratégies de sectionnement – Buse d'injection – Matériaux sont possibles, impactant l'orientation de l'effecteur (axe de l'effecteur \vec{O} , direction d'avance \vec{V}) et par conséquent le choix de l'architecture cinématique du porteur :

- dans les cas où l'orientation de l'axe de l'effecteur \vec{O} est verticale (stratégies de sectionnement planaires) et le contrôle de la direction d'avance \vec{V} n'est pas nécessaire (buse d'injection axisymétrique, matériau sans renforts ou renforts fibres courtes), le repère lié à l'effecteur n'aura pas à effectuer de rotations autour de ses axes. Trois axes linéaires seront par conséquent suffisants afin de déplacer l'effecteur par rapport à un bâti machine fixe et une architecture de type machine 3-axes sera choisie (machines cartésiennes, machines Delta) (Figure 176A). On effectuera le choix de la machine, cartésienne ou Delta à l'étape suivante, en fonction du volume de travail nécessaire à la réalisation du composant ;
- dans les cas où l'orientation de l'axe de l'effecteur \vec{O} est verticale (stratégies de sectionnement planaires) et le contrôle de la direction d'avance \vec{V} nécessaire (buse d'injection non axisymétrique et / ou matériau renforcé de fibres continues), la cinématique du porteur doit permettre le déplacement de l'effecteur au sein de l'espace du travail (3 translations) et l'orientation de la direction d'avance \vec{V} le long des trajectoires de fabrication (2 rotations). Le porteur choisi devra donc avoir à minima 5 degrés de liberté cinématique afin de contrôler les effecteurs. Deux types de porteurs peuvent être utilisés dans ce cas de figure : une machine 5-axes ou un bras robotisé 6-axes. Il nous semble alors préférable d'utiliser une machine 5-axes qui a un volume de travail plus simple à déterminer et fait face à moins de singularités cinématiques qu'un bras robotisé 6-axes (Figure 176B) ;
- dans les cas où l'orientation de l'axe de l'effecteur \vec{O} est différente de la verticale (stratégies de sectionnement planaires non horizontales, stratégies de sectionnement non planaires) et le contrôle de la direction d'avance \vec{V} n'est pas nécessaire (buse d'injection axisymétrique, matériau sans renforts ou renforts fibres courtes), la cinématique du porteur doit permettre le déplacement de l'effecteur au sein de l'espace du travail (3 translations) et l'orientation de la direction d'avance \vec{V} le long des trajectoires de fabrication (2 rotations). Le porteur choisi devra donc avoir à minima 5 degrés de liberté cinématique afin de contrôler les effecteurs. Là encore, il est possible d'utiliser une machine 5-axes et un bras robotisé 6-axes. Nous avons choisi d'utiliser une machine 5-axes, pour les raisons précédemment évoquées (Figure 176C) ;
- dans les cas où l'orientation de l'axe de l'effecteur \vec{O} est différente de la verticale (stratégies planaires non horizontales, stratégies non planaires) et le contrôle de la direction d'avance \vec{V} nécessaire (buse d'injection non axisymétrique et / ou matériau renforcé de fibres continues), la cinématique du porteur doit permettre le déplacement de l'effecteur au sein de l'espace du travail (3 translations), l'orientation de la direction d'avance \vec{V} et l'orientation de l'axe de l'effecteur \vec{O} le long des trajectoires de fabrication (3 rotations). Le porteur choisi devra donc avoir à minima 6 degrés de liberté cinématique afin de contrôler les effecteurs. Nous choisirons donc une architecture cinématique de type bras robotisé 6-axes (Figure 176D).

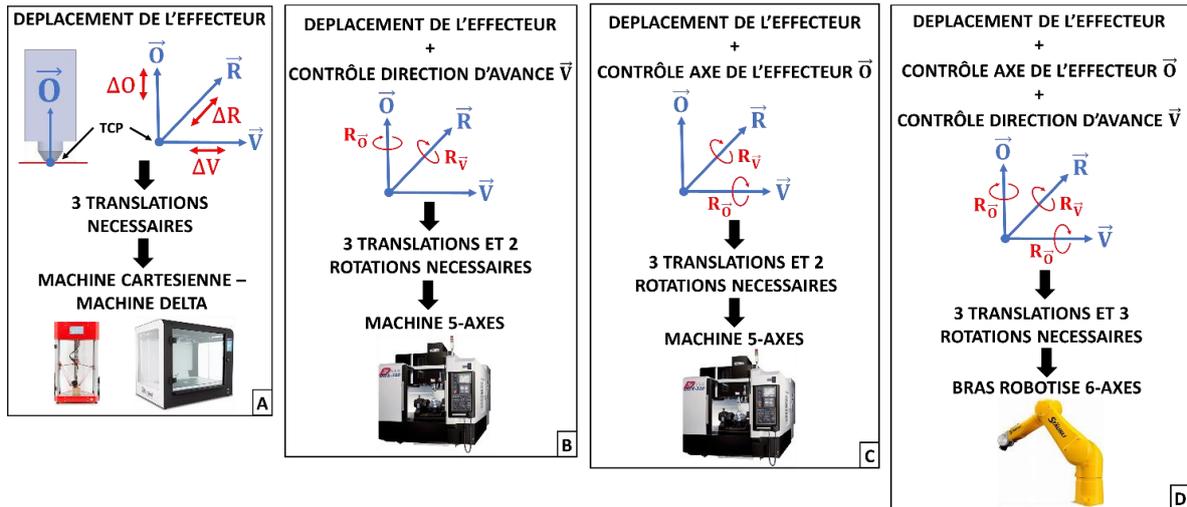


Figure 176 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, choix d’une architecture cinématique en fonction des degrés de liberté cinématique nécessaires

Les éléments précédents sont résumés au sein du Tableau 11. Les stratégies de sectionnement y ont été divisées en deux catégories : stratégies planaires et horizontales (PH) et les autres stratégies de sectionnement (stratégies planaire non horizontales, stratégies non planaires).

SECTIONNEMENT	SECTION DE SORTIE DE LA BUSE D’INJECTION	MATERIAUX	ARCHITECTURE CINEMATIQUE
PH	AXISYMETRIQUE	FIBRES COURTES / SANS RENFORTS	MACHINE CARTESIENNE – MACHINES DELTA
PH	AXISYMETRIQUE	FIBRES LONGUES / CONTINUES	MACHINE 5-AXES
PH	NON AXISYMETRIQUE	FIBRES COURTES / SANS RENFORTS	MACHINE 5-AXES
PH	NON AXISYMETRIQUE	FIBRES LONGUES / CONTINUES	MACHINE 5-AXES
AUTRE	AXISYMETRIQUE	FIBRES COURTES / SANS RENFORTS	MACHINE 5-AXES
AUTRE	AXISYMETRIQUE	FIBRES LONGUES / CONTINUES	BRAS ROBOTISE
AUTRE	NON AXISYMETRIQUE	FIBRES COURTES / SANS RENFORTS	BRAS ROBOTISE
AUTRE	NON AXISYMETRIQUE	FIBRES LONGUES / CONTINUES	BRAS ROBOTISE

Tableau 11 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, choix d’une architecture cinématique en fonction de la stratégie de sectionnement, du matériau et de la buse d’injection

iii. DETERMINATION DE L’ESPACE DE TRAVAIL

Une fois l’architecture cinématique du porteur choisie, l’espace de travail nécessaire à la réalisation du composant est déterminé. Il est fonction :

- des dimensions du composant à réaliser, positionné sur le plateau de fabrication, et de son éventuelle structure de maintien (Figure 177A). Plus un composant est volumineux, plus l’espace de travail nécessaire à sa réalisation est important ;
- de l’encombrement des effecteurs utilisés. Plus l’effecteur est volumineux, plus le volume occupé au sein de l’espace de travail du porteur est important. La distance entre l’interface mécanique du moyen de fabrication, à laquelle est accroché l’effecteur et le TCP pourra alors être prise comme référence afin d’évaluer ce paramètre (Figure 177B) ;
- de l’accessibilité nécessaire à la réalisation de stratégies de renforcement ou de parachèvement, l’axe de l’effecteur devant être colinéaire à la normale sortante aux parois, ce qui augmente l’espace de travail nécessaire à la réalisation du composant (Figure 177C).

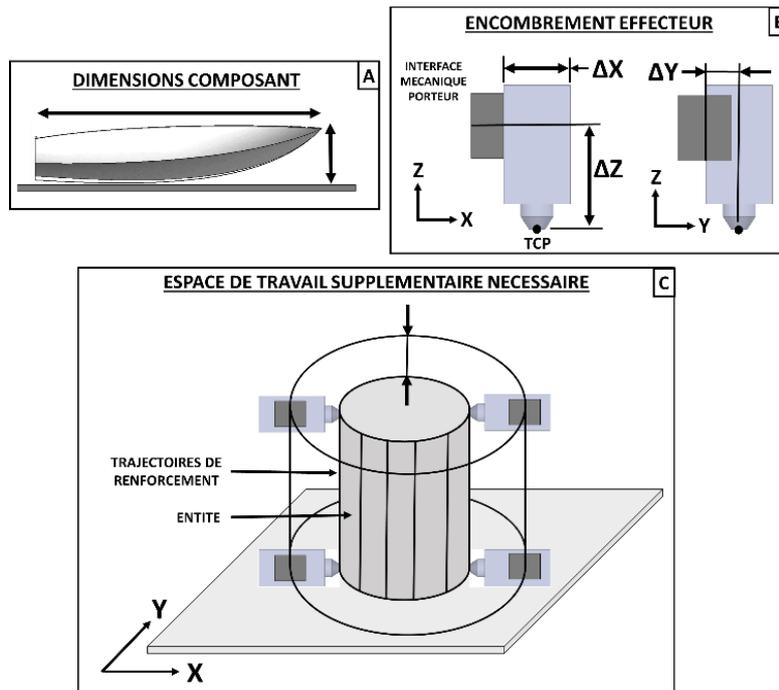


Figure 177 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, paramètres à prendre en compte lors de la détermination de l'espace de travail nécessaire à la réalisation d'un composant

L'espace de travail du moyen devra être adapté aux éléments précédents, quelle que soit la cinématique choisie :

- dans le cas de l'utilisation d'une machine cartésienne ou d'une machine Delta, la course des axes linéaires devra être correctement choisie (Figure 178A). La géométrie du composant à réaliser, comparée aux espaces de travail des machines cartésiennes et Delta permet de choisir entre ces deux typologies de machines : l'espace de travail d'une machine Delta est cylindrique, il est adapté à la réalisation de composants longs et élancés positionnés à la verticale par rapport au plateau de fabrication. L'espace de travail d'une machine cartésienne est un parallélépipède rectangle, il est adapté à toutes les autres typologies de composants ; une machine cartésienne ou Delta ne permettant pas de réaliser de stratégie de renforcement, ce paramètre n'entrera pas en compte dans le cadre de la détermination de l'espace de travail ;
- dans le cas de l'utilisation d'une machine 5-axes, la course des axes linéaires devra être correctement déterminée. Dans le cas d'une configuration berceau, il faudra spécifiquement paramétrer les dimensions et les plages angulaires des axes localisés au niveau du plateau rotatif (Figure 178B). Dans le cas d'une configuration poignet, il faudra le faire pour la distance et les plages angulaires des deux axes situés en amont de l'interface mécanique (Figure 178C) ;
- dans le cas de l'utilisation d'un bras robotisé 6-axes, c'est la longueur des segments et les plages angulaires des axes qu'il faudra déterminer (Figure 178D).

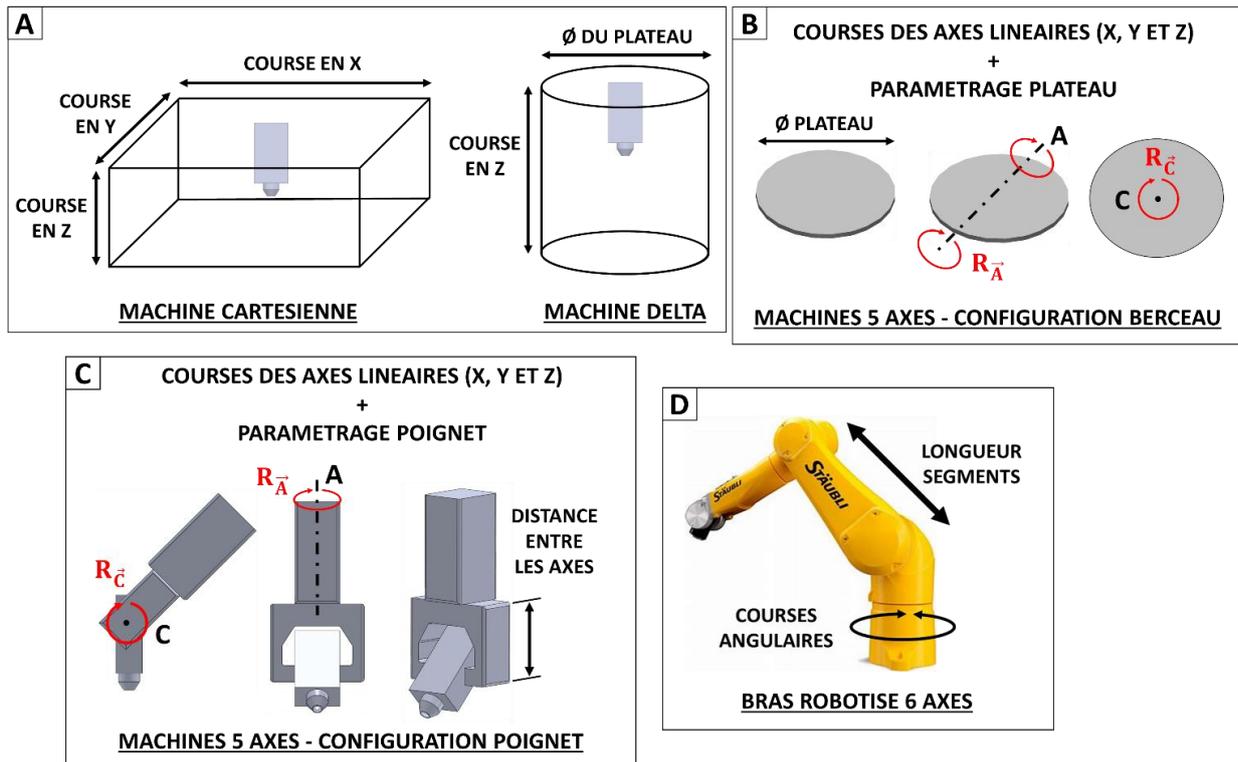


Figure 178 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, paramétrage de l'espace de travail d'un porteur

vi. SIMULATION DES STRATEGIES DE FABRICATION

Une fois l'étape de paramétrage complétée, une simulation du parcours du porteur est réalisée pour chaque stratégie de fabrication (Figure 179). Elle permet d'obtenir la position, la vitesse et l'accélération des axes linéaires et rotatifs en fonction du temps ou des points d'une trajectoire de fabrication, ce qui permet :

- de déceler la présence de singularités cinématiques : retournement du plateau dans le cas de l'utilisation d'un porteur de type machine 5-axes en configuration berceau, passage d'une singularité (coude, épaule ou poignet) dans le cas de l'utilisation d'un porteur de type bras robotisé 6-axes). Lorsqu'un porteur traverse une singularité, un ou plusieurs axes se déplacent brusquement (fort déplacement, forte accélération) ;
- de détecter un mouvement indésirable d'un ou plusieurs axes au cours du cycle de fabrication ce qui peut occasionner des défauts au niveau des cordons déposés ;
- de vérifier que le porteur n'atteint pas de limites au niveau des axes linéaires et rotatifs, signe que le porteur a été mal dimensionné ;
- de vérifier l'absence de collisions entre le porteur, les effecteurs et le plateau de fabrication.

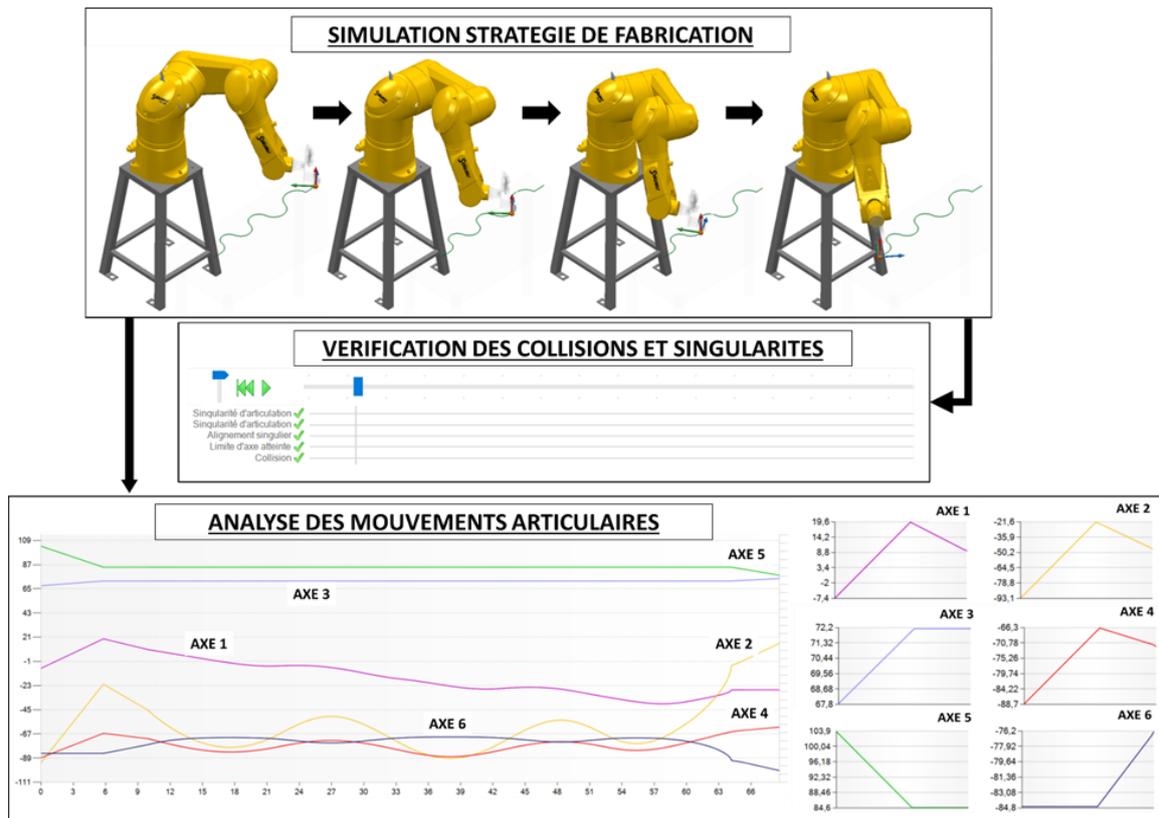


Figure 179 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, simulation du parcours d'un porteur le long de trajectoires de fabrication

Lorsque la simulation du parcours du porteur ne présente pas de signe de collisions, de singularités, de limites d'axes ou de mouvement indésirable au niveau d'un ou plusieurs axes pour chacune des stratégies de fabrication, l'étape de choix et paramétrage du porteur est achevée. Dans le cas contraire, la détermination de l'espace de travail et / ou le paramétrage du porteur devront être modifiés.

CONCLUSION SUR LE CHOIX ET LE PARAMETRAGE DU PORTEUR

Cette partie a été consacrée au choix et au paramétrage du porteur, avec pour objectif de permettre aux effecteurs additifs et soustractifs de suivre les trajectoires de fabrication définies au sein des stratégies de fabrication, tout en contrôlant leur orientation.

Nous avons présenté à ce sujet une méthodologie qui se propose de résoudre les problématiques liées au choix et au paramétrage d'un porteur en fonction de l'orientation des effecteurs le long des trajectoires de fabrication (axe de l'effecteur \vec{O} , direction d'avance \vec{V}) et des dimensions du composant réalisé.

Dans un premier temps, nous avons choisi une architecture cinématique en fonction de la stratégie de sectionnement définie, du paramétrage de la buse d'injection et des matériaux utilisés. Puis, en fonction des éléments suivants, nous avons sélectionné une typologie de porteur : machines cartésiennes, machines Delta, machine 5-axes en configuration poignet ou berceau ou encore des bras robotisés 6-axes.

Nous avons ensuite choisi les dimensions de l'espace de travail en fonction des dimensions du composant à réaliser et de son éventuelle structure de maintien, de l'encombrement des effecteurs utilisés et de l'accessibilité nécessaire à la réalisation de stratégies de renforcement ou de parachèvement :

- course des axes linéaires d'une machine 3-axes
- course des axes linéaires et plages angulaires des axes rotatifs d'une machine 5-axes ;

- longueur des segments et plages angulaires des axes rotatifs d'un bras robotisé 6-axes.

Puis, nous avons simulé les mouvements du porteur le long des trajectoires de fabrication afin de vérifier l'absence de collisions, de singularités cinématique, de limites d'axe et de mouvements indésirables. Lorsque l'étape de simulation est validée, le paramétrage du porteur est achevé. Dans le cas contraire, la détermination de l'espace de travail et / ou le paramétrage du porteur devront être modifiés.

Après cette étape, le porteur est choisi et paramétré. Nous réalisons alors une étape de dérisquage, qui vise à valider la réalisation des éléments jugés critiques du composant à fabriquer. Nous la présenterons dans la partie suivante.

3.3. DE RISQUAGE DU COMPOSANT A FABRIQUER

L'objectif d'une étape de dérisquage est de valider de manière empirique les choix réalisés lors de la préparation à la fabrication d'un composant :

- valider la résistance des éléments paramétrés via une étape de simulation par éléments finis via la mise en place d'essais mécaniques ;
- valider les propriétés géométriques des composants par rapport à leurs maquettes numériques et leurs cahiers des charges géométriques, dimensionnels et d'états de surface. Les géométries les plus sensibles d'un composant seront alors extraites et réalisées.

Au sortir d'une étape de dérisquage, la réalisation du composant est validée ou non.

Le dérisquage réalisé dans le cadre de la fabrication du fémur est présenté à titre d'exemple. Ce dernier, placé à la verticale par rapport au plateau de fabrication (Figure 180A), comporte des zones ayant des surfaces en porte-à-faux au niveau du condyle et de la tête fémorale (Figure 180B). La maquette numérique de ces éléments est alors extraite et positionnée sur le plateau de fabrication (Figure 180C) puis réalisée suivant les paramètres choisis lors de l'étape de mise en place des stratégies de fabrication (Figure 180D). Cette étape de dérisquage a permis de vérifier la qualité du dépôt et de comparer les déviations par rapport à la maquette numérique.

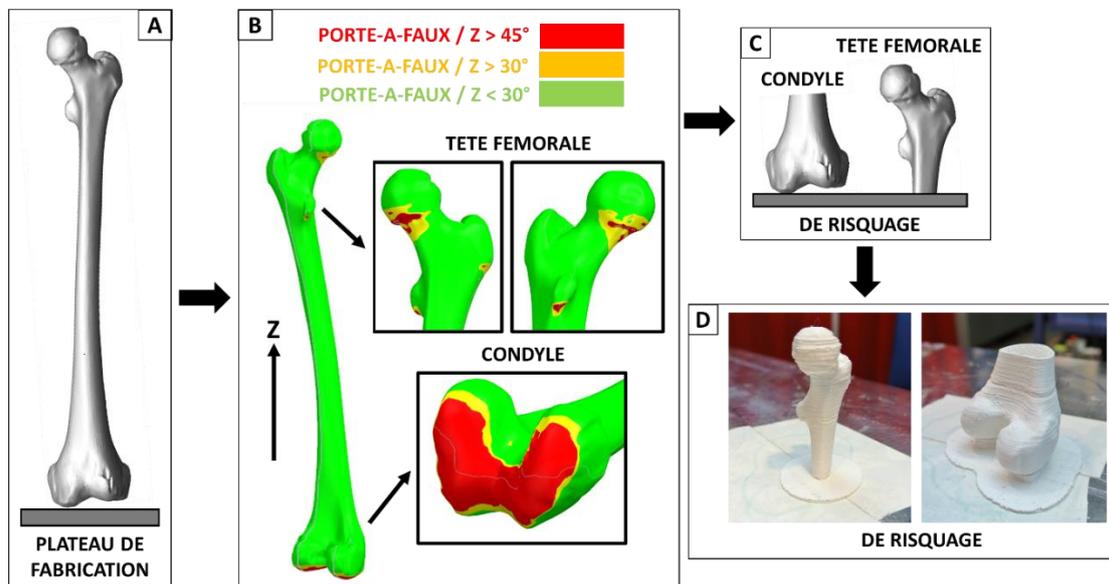


Figure 180 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, illustration d'une opération de dérisquage dans le cadre de la fabrication du fémur

4. CHOIX ET PARAMETRAGE DU MOYEN DE FABRICATION UTILISE DANS LE CADRE DE CES TRAVAUX DE RECHERCHE

4.1. CHOIX ET PARAMETRAGE DES EFFECTEURS

Choix et paramétrage du procédé de fabrication

Le choix du procédé de fabrication est un compromis réalisé entre les propriétés du composant à fabriquer (géométries et dimensions, résolution, matériaux) et les caractéristiques intrinsèques aux procédés de fabrication (matériaux utilisables, débit massique, épaisseur des couches déposées, dimensions des cordons déposés). Les démonstrateurs réalisés afin de mettre en avant la pertinence de la méthodologie ont les caractéristiques suivantes :

- la pale d'éolienne, le fémur, l'hélice et le sabre sont des démonstrateurs visuels, nécessitant une forte résolution ;
- les opérations de renforcement mises en place dans le cadre de la fabrication de l'hyperboloïde, de la poutre et de la pale sont destinées à utiliser des matériaux renforcés de fibres continues afin de maximiser les propriétés mécaniques des couches de renforcement.

Par ailleurs, des essais de caractérisation et de renforcement ont été menés avec le filament prototype (matrice polyamide, fibres de carbone continues). Le Tableau 12 résume les éléments précédemment mentionnés.

CAS D'APPLICATION / ESSAIS REALISES	CARACTERISTIQUES
PALE D'EOLIENNE	DEMONSTRATEUR VISUEL – FORTE RESOLUTION
SABRE	DEMONSTRATEUR VISUEL – FORTE RESOLUTION
CHAISE	DEMONSTRATEUR VISUEL – FORTE RESOLUTION
FEMUR	DEMONSTRATEUR VISUEL – FORTE RESOLUTION
HYPERBOLOIDE	STRATEGIE DE RENFORCEMENT – UTILISATION DE MATERIAUX RENFORCES DE FIBRES CONTINUES
HELICE	DEMONSTRATEUR VISUEL – FORTE RESOLUTION
FILAMENT PROTOTYPE	CARACTERISATION DU MATERIAU
POUTRE + RENFORCEMENT	STRATEGIE DE RENFORCEMENT – UTILISATION DE MATERIAUX RENFORCES DE FIBRES CONTINUES
PALE + RENFORCEMENT	STRATEGIE DE RENFORCEMENT – UTILISATION DE MATERIAUX RENFORCES DE FIBRES CONTINUES

Tableau 12 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, caractéristiques des démonstrateurs et des essais réalisés dans le cadre de ces travaux de recherche

Au vu des éléments nécessaires à la réalisation des démonstrateurs, nous avons choisi d'utiliser le procédé « Dépôt de fil fondu », adapté à la réalisation de pièces de grandes dimensions qui ont des géométries nécessitant une résolution forte. Il permet également l'utilisation de matériaux renforcés de fibres longues ou continues et fait avancer la recherche concernant le développement d'un matériau renforcé et la mise en place de stratégies de renforcement.

Dans ces travaux, nous avons choisi de développer en interne un effecteur additif adapté au procédé « Dépôt de fil fondu », ce qui permet de lui implémenter des évolutions de manière rapide et efficace lorsque cela s'avère nécessaire. L'effecteur mis en place est composé des éléments suivants : une partie électronique permettant le contrôle des équipements, composée d'une carte Arduino Mega 2560 [186] sur laquelle a été fixée un bouclier de type RAMPS 1.4 [187] (Figure 181A), une extrudeuse de type Titan E3DV6 [188] (Figure 181B), un moteur pas à pas Neema 17 actionnant le mécanisme d'entraînement [189] (Figure 181C) et un châssis en aluminium permettant de positionner les éléments précédents les uns par rapport aux autres et de fixer l'outil à l'interface mécanique du moyen de fabrication (Figure 181D). Un changeur d'outil, fixé au châssis en aluminium, permet le montage et le démontage rapide de l'effecteur additif à l'interface mécanique du porteur.

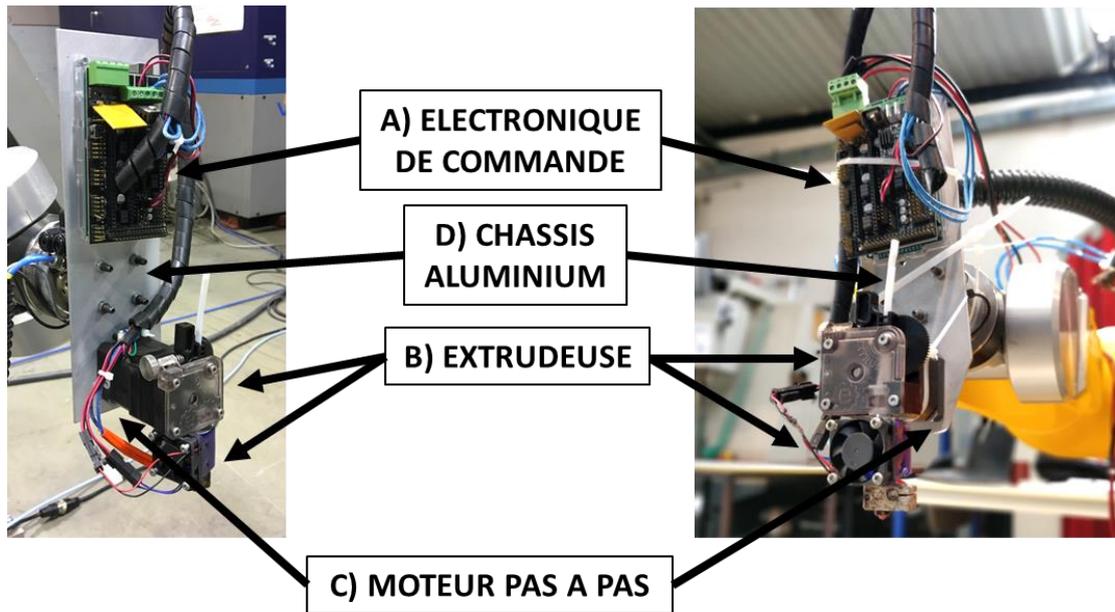


Figure 181 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, équipements liés au procédé « Dépôt de fil fondu » utilisés dans le cadre de ces travaux de recherche

Paramétrage de l'effecteur additif

Dans ces travaux, nous avons utilisé des buses axisymétriques avec des sections de sortie circulaires. Afin de s'adapter aux différentes épaisseurs de couches et aux largeurs de cordons paramétrées lors de la mise en place des stratégies de sectionnement, différents diamètres ont été choisis (de 0,4 à 2,85 mm de diamètre). Celui des buses d'injection utilisées suit une règle établie dans le cadre du procédé « Dépôt de fil fondu » : le diamètre de la buse est égal à deux fois l'épaisseur de la couche déposée [190]. Nous avons choisi des buses en laiton pour les composants réalisés à partir de matériaux sans renforts mais des buses ayant des sections de sortie renforcées de carbure de bore pour la réalisation de composants renforcés de fibres continues. Les éléments concernant les buses d'injection utilisées dans le cadre de ces travaux de recherche sont synthétisés par le Tableau 13.

CAS D'APPLICATION	TPOLOGIE BUSE	DISTANCE ENTRE SECTIONS [mm]	DIAMETRE SECTION DE SORTIE [mm]	MATERIAUX EXTRUDE	MATERIAU BUSE
PALE D'EOLIENNE	AXISYMETRIQUE	1,425	2,85	SANS RENFORTS	LAITON
SABRE	AXISYMETRIQUE	0,2	0,4	SANS RENFORTS	LAITON
CHASSE	AXISYMETRIQUE	1,425	2,85	SANS RENFORTS	LAITON
FEMUR	AXISYMETRIQUE	0,2	0,4	SANS RENFORTS	LAITON
HYPERBOLOIDE	AXISYMETRIQUE	1,425	2,85	SANS RENFORTS – RENFORTS FIBRES CONTINUES	CARBURE DE BORE
HELICE	AXISYMETRIQUE	0,2	0,4	SANS RENFORTS	LAITON
FILAMENT PROTOTYPE	AXISYMETRIQUE	0,65	1,3	FILAMENT AVEC FIBRES CONTINUES	CARBURE DE BORE
POUTRE + RENFORCEMENT	AXISYMETRIQUE	1,425	2,85	SANS RENFORTS – RENFORTS FIBRES CONTINUES	CARBURE DE BORE
PALE + RENFORCEMENT	AXISYMETRIQUE	0,2	0,4	SANS RENFORTS – RENFORTS FIBRES CONTINUES	CARBURE DE BORE

Tableau 13 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, paramètres des buses d'injection utilisées dans le cadre de ces travaux de recherche

Pour chaque stratégie de fabrication, nous avons déterminé de façon empirique la largeur des cordons déposés, en faisant varier la vitesse d'avance de l'effecteur. Nous avons toujours choisi le débit massique maximal obtenu avec l'effecteur.

La Figure 182 illustre le paramétrage de la largeur des cordons extrudés qui doit être égale à 3 mm afin de réaliser la chaise de grandes dimensions. Pour cette réalisation, l'épaisseur entre les couches est de 2,85 mm. Le débit massique maximal que l'on peut obtenir avec une buse d'injection d'un diamètre égal à 2,85 mm et l'extrudeuse utilisée est de 0,114 m³/hr. La largeur des cordons est de 3 mm lorsque la vitesse d'avance de l'effecteur est égale à 600 mm/min.

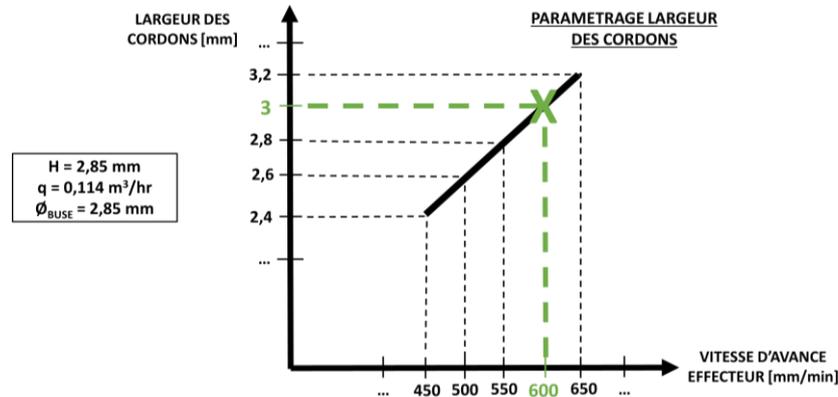


Figure 182 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, paramétrage de la largeur des cordons dans le cadre de la fabrication de la chaise

Afin de maximiser la force appliquée entre la couche en cours de dépôt N et la couche précédemment déposée N-1, l'axe de l'effecteur additif \vec{O} a été paramétré de manière à rester constamment perpendiculaire aux trajectoires de fabrication :

- pour les composants sectionnés par des stratégies planaires et horizontales (chaise, fémur, pale d'éolienne et lame de sabre représentés sur la Figure 35), l'axe de l'effecteur \vec{O} a été paramétré afin de rester vertical ;

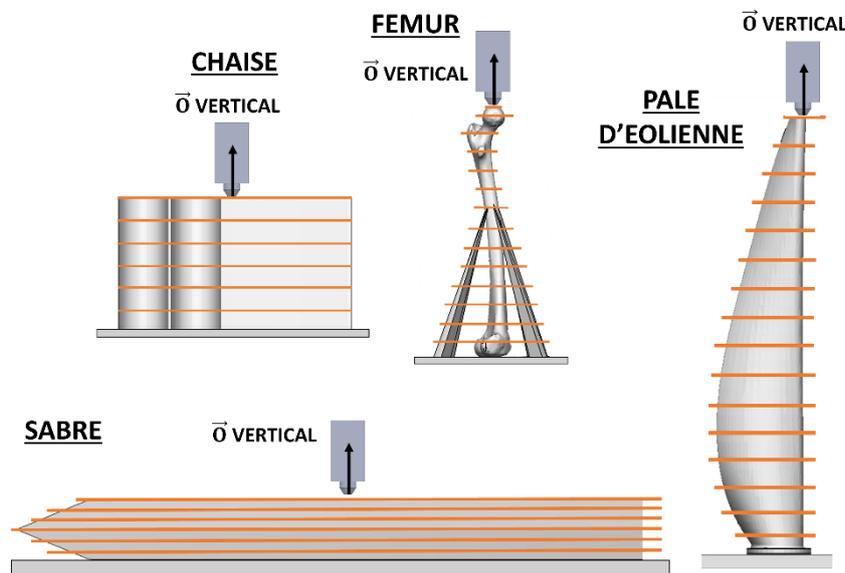


Figure 183 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, orientation de l'axe de l'effecteur \vec{O} dans le cadre de la réalisation de la chaise, du fémur, de la pale d'éolienne et de la lame de sabre

- pour les composants réalisés avec une stratégie volumique et une stratégie de renforcement, l'orientation de l'axe de l'effecteur \vec{O} a été réalisée en deux temps. Tout d'abord, afin de réaliser les stratégies volumiques, l'axe de l'effecteur a été paramétré pour rester vertical le long des trajectoires de fabrication, les composants étant sectionnés par des stratégies planaires et

horizontales (Figure 184A). Puis, afin de réaliser les stratégies de renforcement, l'axe de l'effecteur a été paramétré pour être perpendiculaire aux parois renforcées. Afin de renforcer la pale et de l'hyperboloïde, il changera constamment d'orientation. Pour renforcer la poutre, l'axe de l'effecteur restera horizontal car les parois extérieures sont planes et verticales (Figure 184) ;

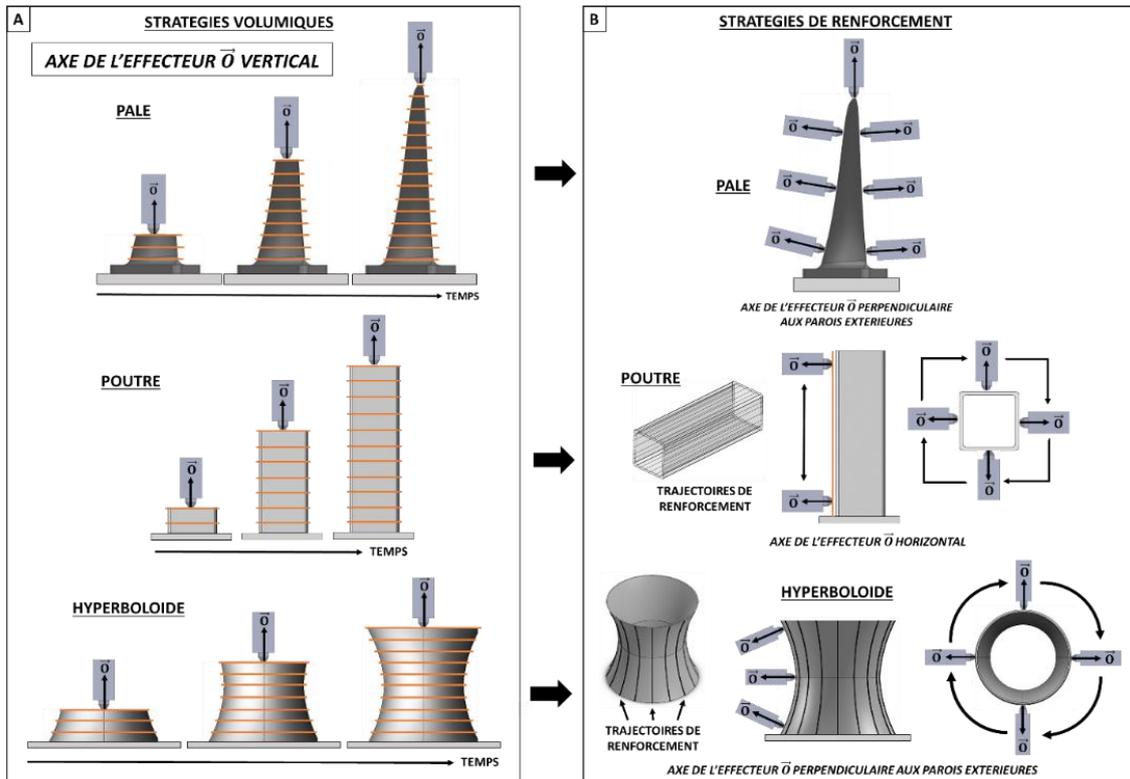


Figure 184 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, orientation de l'axe de l'effecteur \vec{O} dans le cadre de la réalisation des composants renforcés

- dans le cadre de la réalisation d'un composant complexe constitué de plusieurs entités, le paramétrage de l'axe de l'effecteur est réalisé autant de fois qu'il y a d'entités. L'hélice a été décomposée en 4 entités et l'axe de l'effecteur paramétré 4 fois. Afin de réaliser l'entité V_1 , l'axe de l'effecteur est perpendiculaire au plateau de fabrication (stratégie de sectionnement planaire et horizontale). Il est ensuite orienté suivant la direction de croissance des entités V_2 , V_3 et V_4 .

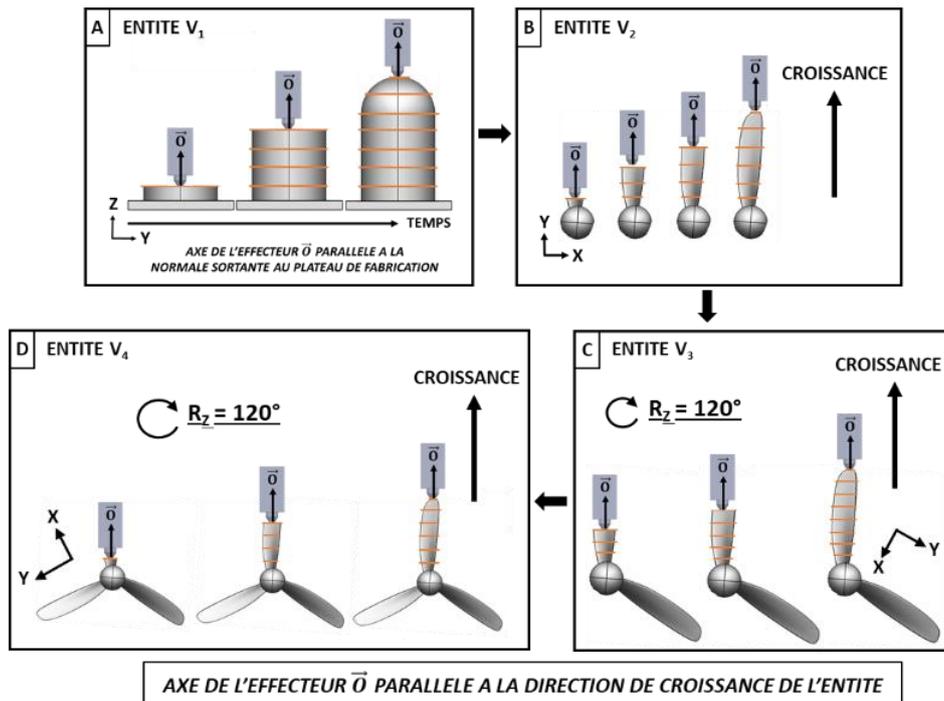


Figure 185 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, orientation de l'axe de l'effecteur \vec{O} dans le cadre de la réalisation de l'hélice

Pour ces travaux de recherche, nous avons utilisé des buses d'injection axisymétriques. La paramétrisation de la direction d'avance \vec{V} a été la suivante :

- lors de la réalisation de la pale d'éolienne, du sabre, de la chaise et du fémur, les matériaux utilisés étaient sans renforts. Le contrôle de la direction d'avance \vec{V} n'est par conséquent pas nécessaire ;
- lors des essais de caractérisation du filament renforcé de fibres continues, la direction d'avance a été paramétrée suivant la direction de déplacement ;
- lors de la réalisation des composants avec une stratégie de renforcement, des matériaux sans renforts ont été utilisés et la direction d'avance \vec{V} n'a pas été contrôlée.

Le Tableau 14 synthétise les éléments précédemment énoncés.

CAS D'APPLICATION	SECTION DE SORTIE DE LA BUSE D'INJECTION	MATERIAUX	CONTRÔLE DIRECTION D'AVANCE
PALE D'EOLIENNE	AXISYMETRIQUE	SANS RENFORTS	NON
SABRE	AXISYMETRIQUE	SANS RENFORTS	NON
CHAISE	AXISYMETRIQUE	SANS RENFORTS	NON
FEMUR	AXISYMETRIQUE	SANS RENFORTS	NON
HYPERBOLOIDE	AXISYMETRIQUE	SANS RENFORTS	NON
HELICE	AXISYMETRIQUE	SANS RENFORTS	NON
FILAMENT PROTOTYPE	AXISYMETRIQUE	FIBRES CONTINUES	OUI
RENFORCEMENT POUTRE	AXISYMETRIQUE	SANS RENFORTS	NON
RENFORCEMENT PALE	AXISYMETRIQUE	SANS RENFORTS	NON

Tableau 14 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, matériaux et sections de sortie des buses utilisées lors de la réalisation des cas d'application

Pour finir, la simulation du parcours des effecteurs le long des parcours d'outil n'a pas montré de collisions entre ces derniers et les éléments extérieurs.

4.2. CHOIX ET PARAMETRAGE DU PORTEUR

Le choix de l'architecture cinématique du porteur est le premier paramètre à déterminer. Il est contraint par l'orientation de l'axe de l'effecteur \vec{O} et de la direction d'avance \vec{V} :

- dans le cadre de la réalisation de la pale d'éolienne, du sabre, de la chaise et du fémur, l'axe de l'effecteur \vec{O} reste vertical. Par conséquent, une cinématique porteur offrant trois translations est suffisante et l'on peut utiliser une machine 3-axes, 5-axes ou un bras robotisé 6-axes ;
- Les stratégies de renforcement de l'hyperboloïde, de la poutre et de la pale donnent lieu à un paramétrage de l'axe de l'effecteur \vec{O} qui doit constamment changer d'orientation afin de s'adapter aux parois extérieures. Un porteur ayant au minimum 5 degrés de liberté (trois déplacements et deux rotations) sera alors nécessaire. On pourra également utiliser une machine 5-axes ou un bras robotisé 6-axes ;
- l'hélice, décomposée en 4 entités, nécessitera un porteur ayant au minimum 5 degrés de liberté (trois déplacements et deux rotations) afin de pouvoir orienter l'axe de l'effecteur. On pourra utiliser une machine 5-axes ou un bras robotisé 6-axes.

Par ailleurs, l'étude du développement de trajectoires multi axes et l'utilisation de matériaux renforcés de fibres continues nous contraint à utiliser un porteur ayant une cinématique qui permette de contrôler la direction d'avance \vec{V} et l'axe de l'effecteur \vec{O} , suivant toutes les directions de l'espace (trois déplacements et trois rotations).

Par conséquent, nous avons choisi d'utiliser un bras robotisé 6-axes pour réaliser l'intégralité des cas d'application de la méthodologie et traiter l'axe de recherche concernant le dépôt de filaments renforcés de fibres continues suivant des trajectoires multi axes. Le Tableau 15 synthétise les éléments précédemment énoncés.

CAS D'APPLICATION	TRANSLATIONS	ROTATIONS	CINEMATIQUE PORTEUR POSSIBLES
PALE D'EOLIENNE	3	0	MACHINES 3 ET 5 AXES – BRAS ROBOTISES 6 AXES
SABRE	3	0	MACHINES 3 ET 5 AXES – BRAS ROBOTISES 6 AXES
CHAISE	3	0	MACHINES 3 ET 5 AXES – BRAS ROBOTISES 6 AXES
FEMUR	3	0	MACHINES 3 ET 5 AXES – BRAS ROBOTISES 6 AXES
HYPERBOLOIDE	3	2	MACHINES 3 ET 5 AXES – BRAS ROBOTISES 6 AXES
HELICE	3	2	MACHINE 5 AXES – BRAS ROBOTISES 6 AXES
FILAMENT PROTOTYPE	3	2	MACHINE 5 AXES – BRAS ROBOTISES 6 AXES
RENFORCEMENT POUTRE	3	2	MACHINE 5 AXES – BRAS ROBOTISES 6 AXES
RENFORCEMENT PALE	3	2	MACHINE 5 AXES – BRAS ROBOTISES 6 AXES
MULTI AXES + FIBRES CONTINUES	3	3	BRAS ROBOTISE 6-AXES

Tableau 15 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, cinématique porteur nécessaire à la réalisation des cas d'applications de la méthodologie

Une fois l'architecture cinématique du porteur déterminée, il faudra choisir un bras robotisé 6-axes capable de réaliser les cas d'application de la méthodologie de préparation à la fabrication. Les composants les plus volumineux sont les suivants :

- la pale d'éolienne, positionnée à la verticale sur le plateau de fabrication et mesurant 1060 mm de haut. L'axe de l'effecteur additif \vec{O} sera placé à la verticale lors du cycle de fabrication (Figure 186A) ;

- la chaise, d'une hauteur de 813 mm, d'une largeur de 462 mm et d'une profondeur de 443 mm, a sa face latérale en contact avec le plateau de fabrication. L'axe de l'effecteur additif \vec{O} sera placé à la verticale lors du cycle de fabrication (Figure 186B) ;
- la lame de sabre, d'une longueur totale de 1000 mm est placée à l'horizontale sur le plateau de fabrication. L'axe de l'effecteur additif \vec{O} sera placé à la verticale lors du cycle de fabrication (Figure 186C).

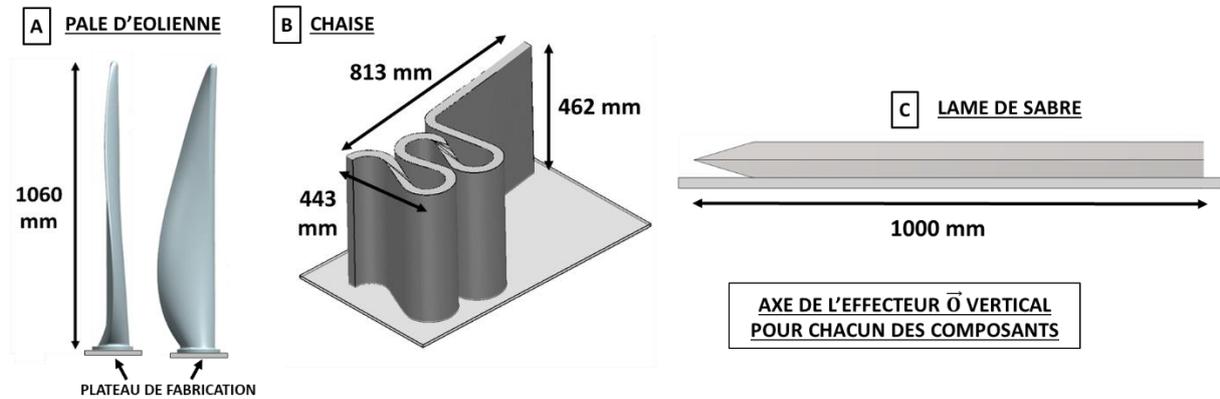


Figure 186 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, dimensions des composants les plus volumineux

La capacité du bras robotisé à réaliser ces composants validera sa capacité à réaliser les autres, moins volumineux. Dans ce but, nous avons testé le bras robotisé 6-axes Stäubli TX90 placé avec sa base sur le sol, présent au sein de la plateforme Rapid Manufacturing [165] (Figure 187A). Pour ce faire, un jumeau numérique a été créé à l'aide d'un logiciel de fabrication assistée par ordinateur (Figure 187B). Ce dernier permettra par ailleurs de post traiter les trajectoires de fabrication dans le langage de programmation du porteur, une fois qu'elles auront été validées.

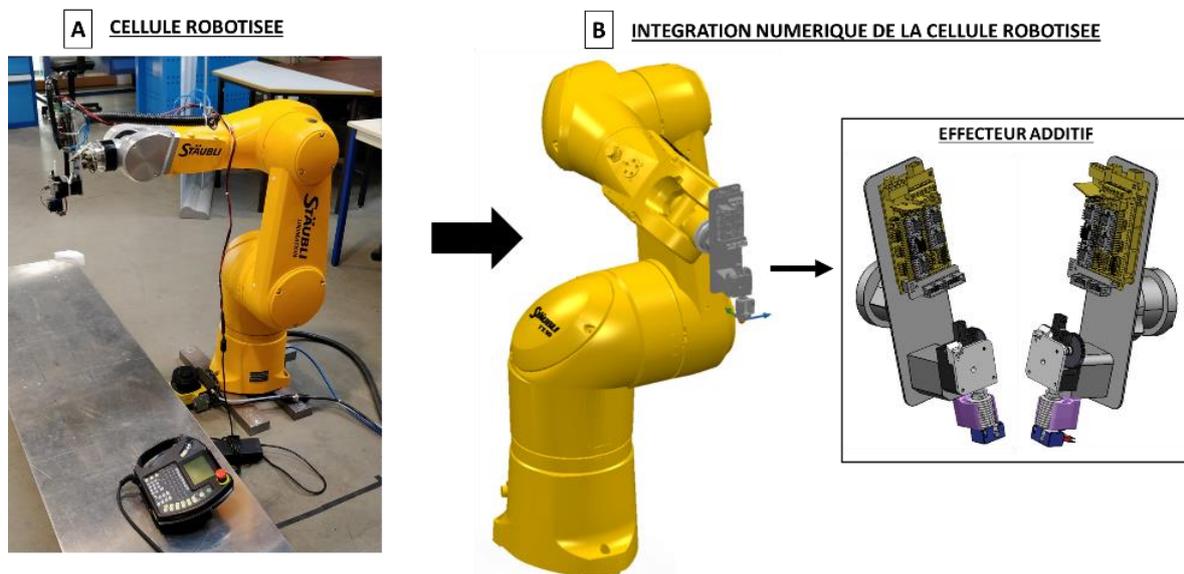


Figure 187 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, jumeau numérique de la cellule robotisée

Nous avons d'abord vérifié et validé la capacité du bras robotisé à réaliser la chaise et le sabre (Figure 186B et C) en réalisant un cas d'application de grandes dimensions, d'une longueur de 1500 mm et d'une largeur égale à 400 mm (Figure 188A). Comme le bras robotisé est capable de déplacer l'effecteur additif pour atteindre l'ensemble des points des trajectoires de fabrication du composant, il pourra également réaliser la chaise et la lame de sabre.

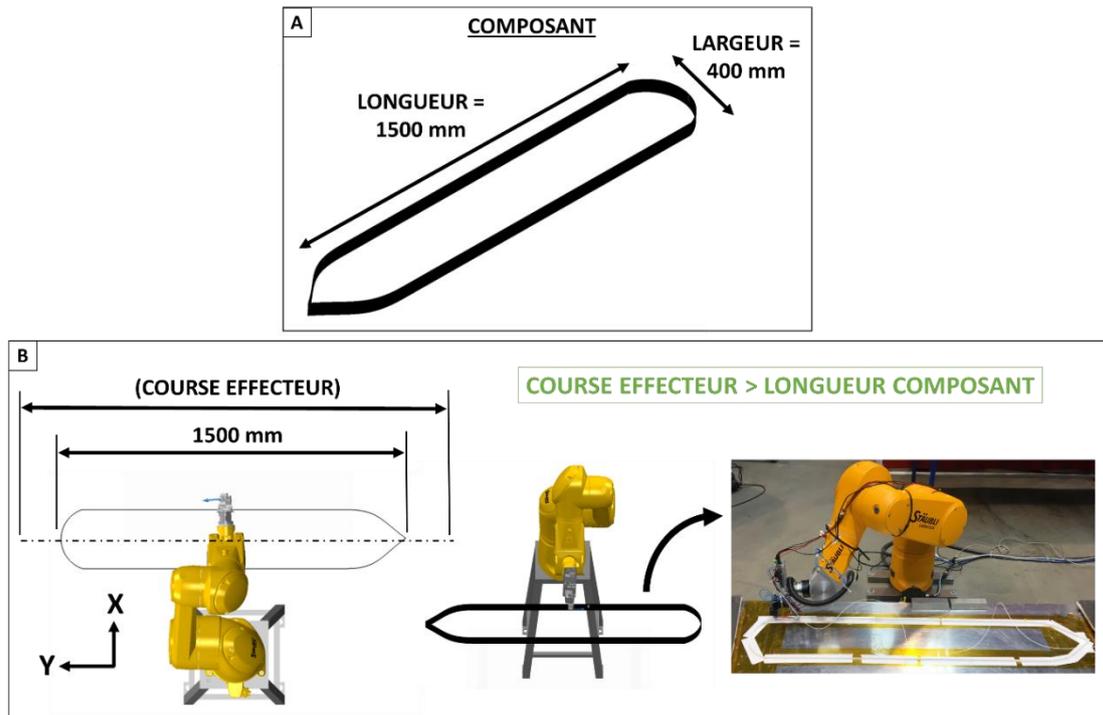


Figure 188 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, orientation d'un composant en fonction de ses géométries et de la capacité du bras robotisé

Nous avons ensuite vérifié si le bras robotisé pouvait accéder aux trajectoires de fabrication de la pale d'éolienne (Figure 186A), l'objectif étant de pouvoir déplacer le porteur suivant la verticale ascendante du point N°1 au point N°2 sans rencontrer de limites d'axes et de singularités (Figure 189A). Or, positionné sur le sol, le bras robotisé n'est pas capable de se déplacer à la verticale du point N°1 au point N°2 car il rencontre une singularité de poignet aux trois quarts environ de la hauteur du composant (Figure 189B). La course du robot suivant la verticale ascendante est de 720 mm, ce qui est inférieur à la hauteur du composant (1060 mm). Il paraît donc nécessaire de surélever le bras robotisé suivant l'axe Z afin d'augmenter son espace de travail qui passe alors de 720 à 1135 mm. La course du bras robotisé est ainsi supérieure à la hauteur du composant. On peut finalement déplacer l'effecteur additif du point N°1 au point N°2 sans rencontrer de singularités et limites d'axes (Figure 189C).

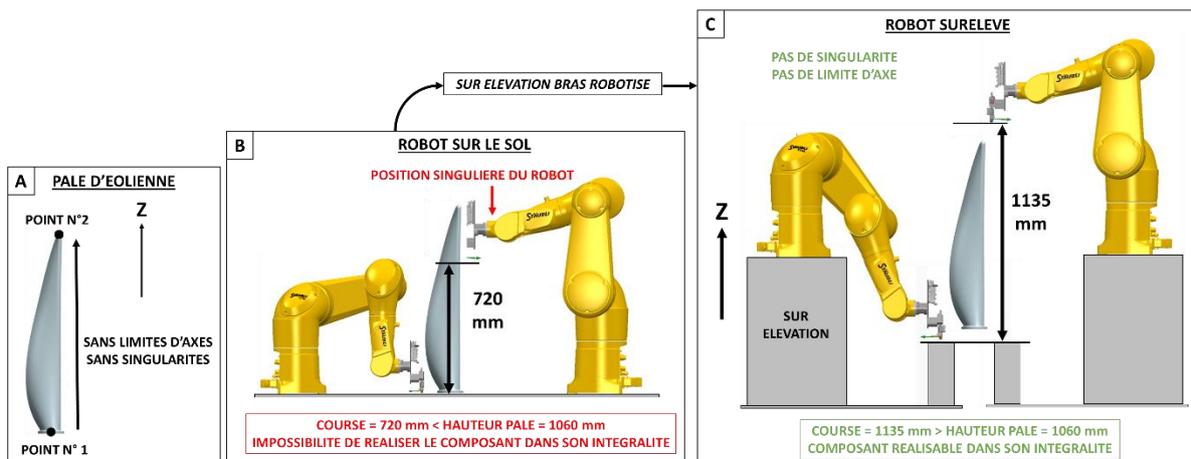


Figure 189 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, vérification de l'accessibilité aux trajectoires de fabrication de la pale d'éolienne

Il a donc été décidé de placer le bras robotisé sur un chaise mécano-soudée, de hauteur égale à 700 mm, permettant sa surélévation et la réalisation de la pale d'éolienne (Figure 190A). Afin de prendre en compte la surélévation du bras robotisé, un plateau de fabrication ayant une longueur égale à 1000 mm,

une largeur égale à 500 mm et une hauteur égale à 700 mm (égale à la hauteur de la chaise mécano soudée) a été fabriqué (Figure 190B). Les dimensions du plateau sont suffisamment importantes pour permettre la fabrication de la chaise et de la lame de sabre. La cellule robotisée a été mise en place et le jumeau numérique de cette dernière a été implémenté au sein d'un logiciel de FAO (Figure 190C).

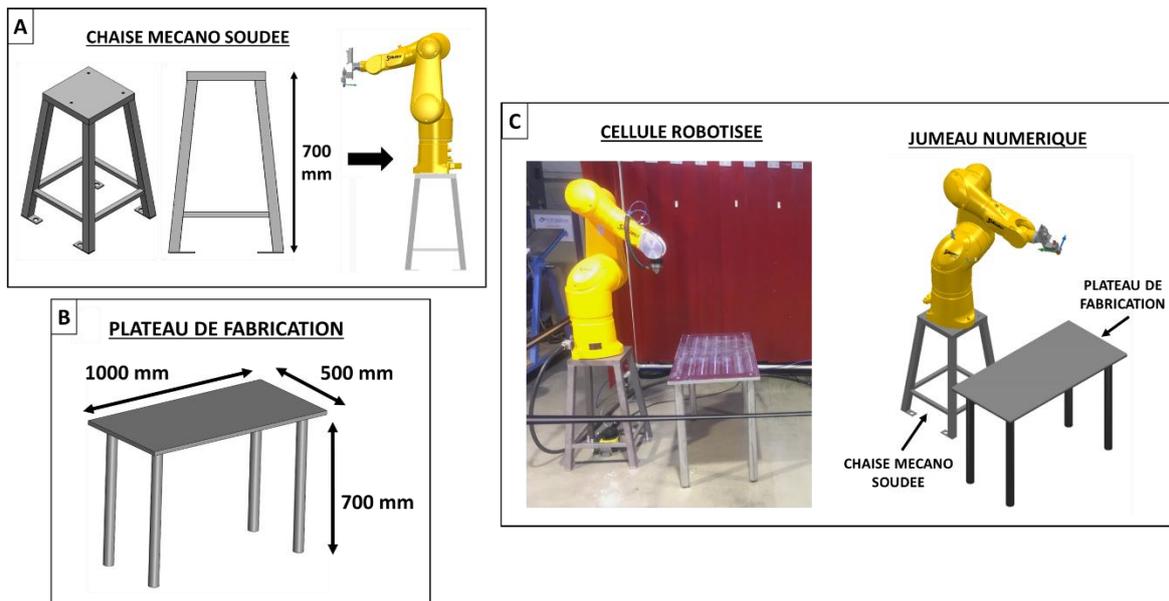


Figure 190 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, comparaison de la distance de travail suivant l'axe Z du bras robotisé

L'espace de travail offert par le bras robotisé Stäubli TX90 positionné sur la chaise mécano-soudée est validé et la réalisation des cas d'applications de la méthodologie possible.

Puis nous avons paramétré le porteur. L'utilisation d'un bras robotisé 6-axes dans le cadre de la fabrication additive de composants de grandes dimensions à partir de matériaux polymères thermoplastiques a nécessité le développement de plusieurs étapes de paramétrage que nous présenterons ci-dessous.

Définition de la posture du bras robotisé

Nous avons d'abord choisie et bloquée la posture du bras robotisé afin d'éviter l'apparition de singularités le long des trajectoires de fabrication : épaule à gauche, coude positif et poignet négatif (Figure 191A). Afin de maintenir l'épaule à gauche, les plages angulaires des axes N°2 et N°1 ont été respectivement paramétrées pour aller de 0 à 145 degrés (Figure 191B) et de -90 à 90 degrés. Le coude du robot, lorsqu'il est positif, permet à l'effecteur additif d'atteindre le plateau de fabrication et d'éviter les collisions entre ce dernier et le bras robotisé. Pour garder le coude positif et éviter les singularités qui surviennent lorsque l'axe N°3 passe d'une valeur positive à une valeur négative (ou à l'opposé, d'une valeur négative à une valeur positive), nous avons paramétré ce dernier afin qu'il aille de 5 à 145 degrés (Figure 191C). Pour finir, nous avons configuré le poignet pour qu'il reste négatif. Pour ce faire, la plage de l'axe N°5 a été fixée de -110 à -5 degrés, les singularités de poignet intervenant quand la valeur de l'axe N°5 passe d'une valeur positive à une valeur négative (ou à l'opposé, d'une valeur négative à une valeur positive) (Figure 191D). La configuration du poignet, positive ou négative, n'impacte pas les stratégies de fabrication.

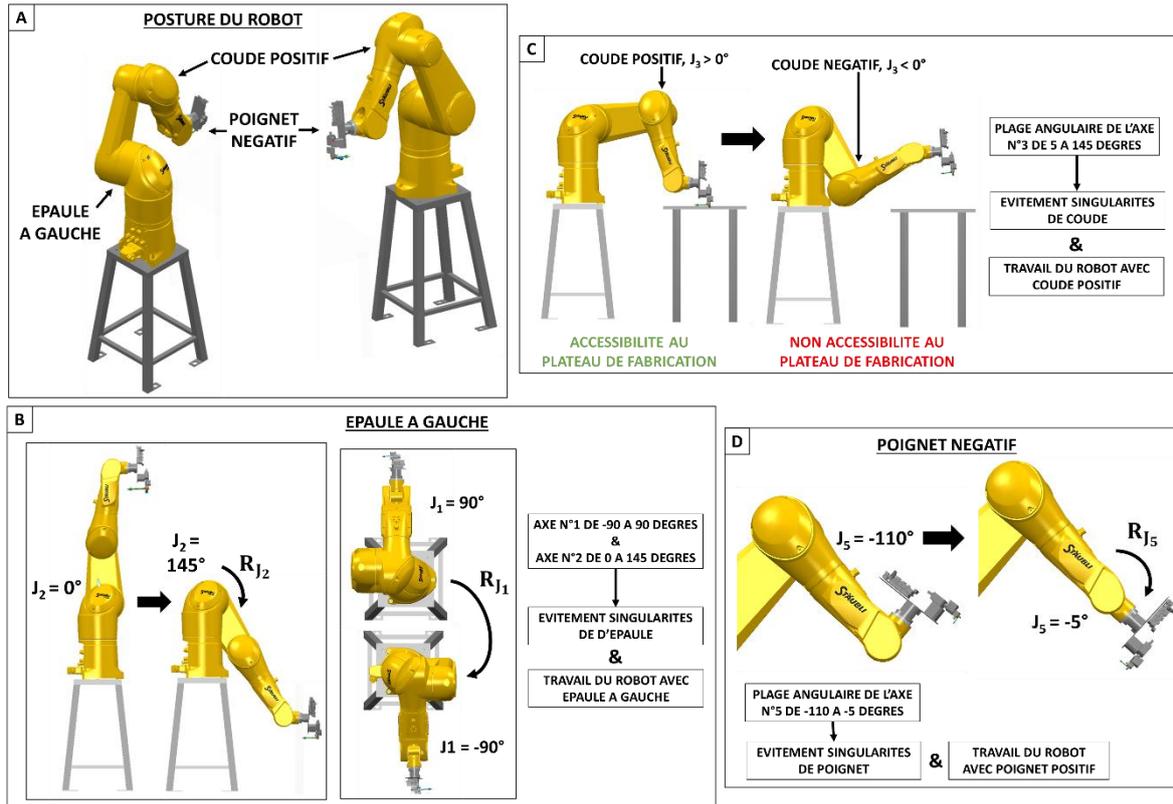


Figure 191 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, paramétrage des plages angulaires du bras robotisé utilisé dans le cadre de ces travaux de recherche

Positionnement des composants dans la cellule robotisée

Nous avons ensuite déterminé le positionnement optimal des composants au sein de la cellule robotisée, en prenant en compte la capacité du bras robotisé et les dimensions du composant à réaliser. L'espace de travail d'un bras robotisé 6-axes maintenu dans la posture épaule à gauche - coude positif - poignet négatif est anisotrope :

- suivant l'axe X du repère lié à la base du bras robotisé, lorsque l'axe de l'effecteur \vec{O} est vertical et que le TCP se trouve au niveau du sol, la course de l'effecteur est de 440 mm (Figure 192A) ;
- suivant l'axe Y du repère lié à la base du bras robotisé, lorsque l'axe de l'effecteur \vec{O} est vertical et que le TCP se trouve au niveau du sol, la course de l'effecteur est de 1900 mm (Figure 192B). La distance parcourue par l'effecteur suivant l'axe Y est quasiment symétrique par rapport à l'origine du repère.

Par conséquent, le côté le plus long d'un composant de grandes dimensions positionné sur le plateau de fabrication sera aligné avec l'axe Y du repère lié au robot (Figure 192C).

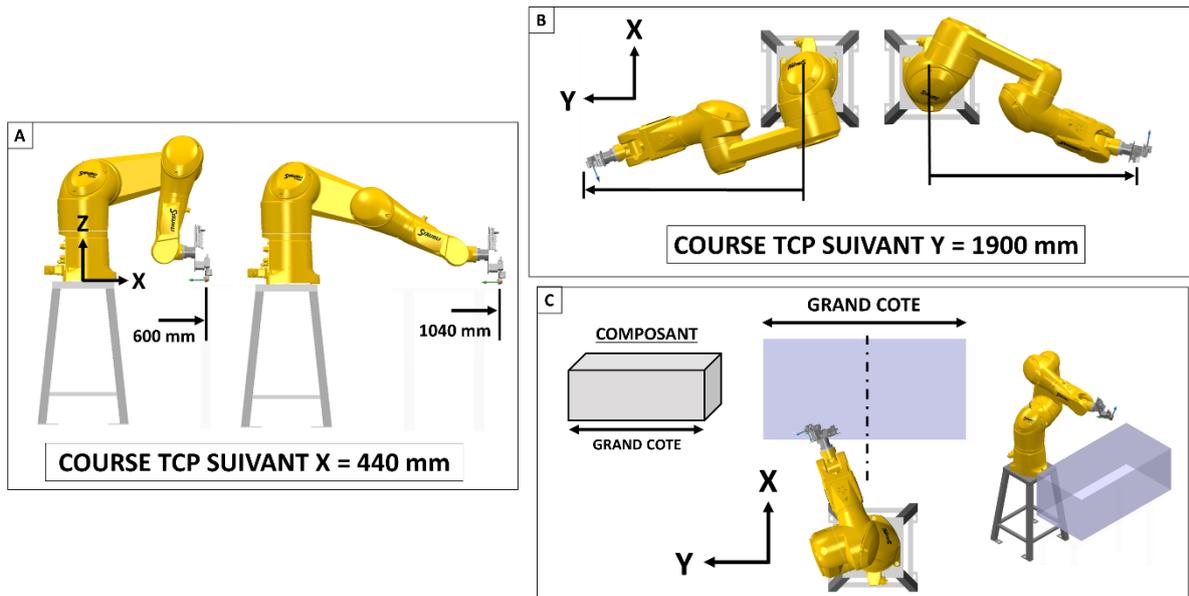


Figure 192 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, course de l'effecteur du bras robotisés suivant les axes X et Y

Une règle équivalente peut également s'appliquer au positionnement d'un composant long et élancé, positionné à la verticale par rapport au plateau de fabrication : ce dernier sera placé à l'intérieur de la course de l'effecteur suivant la verticale ascendante.

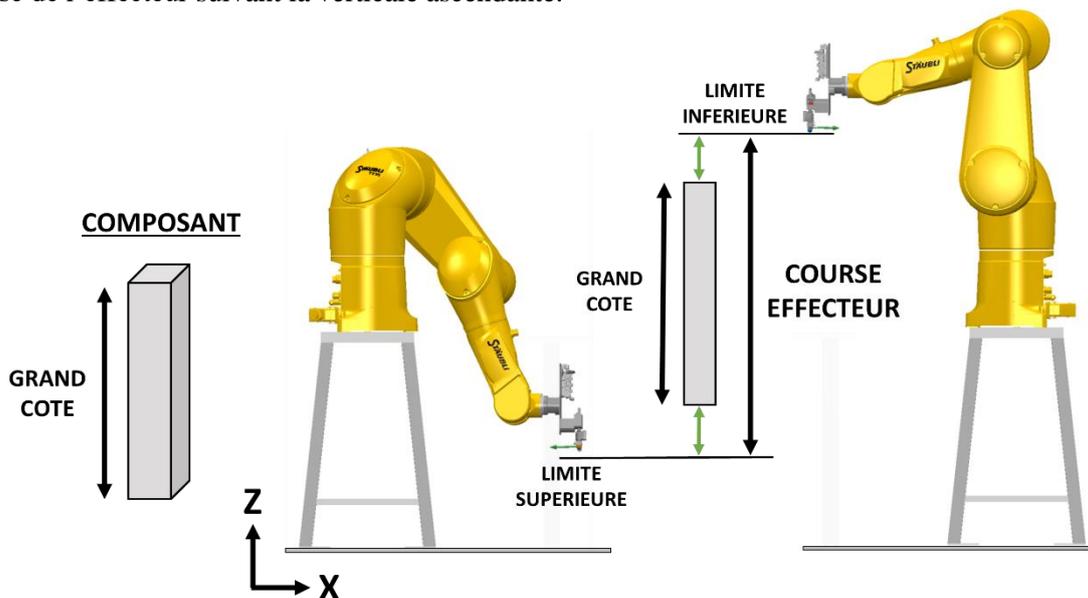


Figure 193 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, placement d'un composant long et élancé placé à la verticale par rapport au plateau de fabrication

La chaise et la lame de sabre ont été positionnés sur le plateau de fabrication, avec leur côté le plus long colinéaire à l'axe Y du repère lié au bras robotisé, conformément à la règle précédemment décrite (Figure 194A). L'accessibilité de l'effecteur additif aux trajectoires de fabrication, positionné avec l'axe \vec{O} à la verticale, a été vérifiée et validée pour les deux composants :

- points N°1, N°2 et N°3 en position haute et basse pour la chaise (Figure 194B) ;
- points N°1 et N°2 aux extrémités de la lame de sabre (Figure 194C).

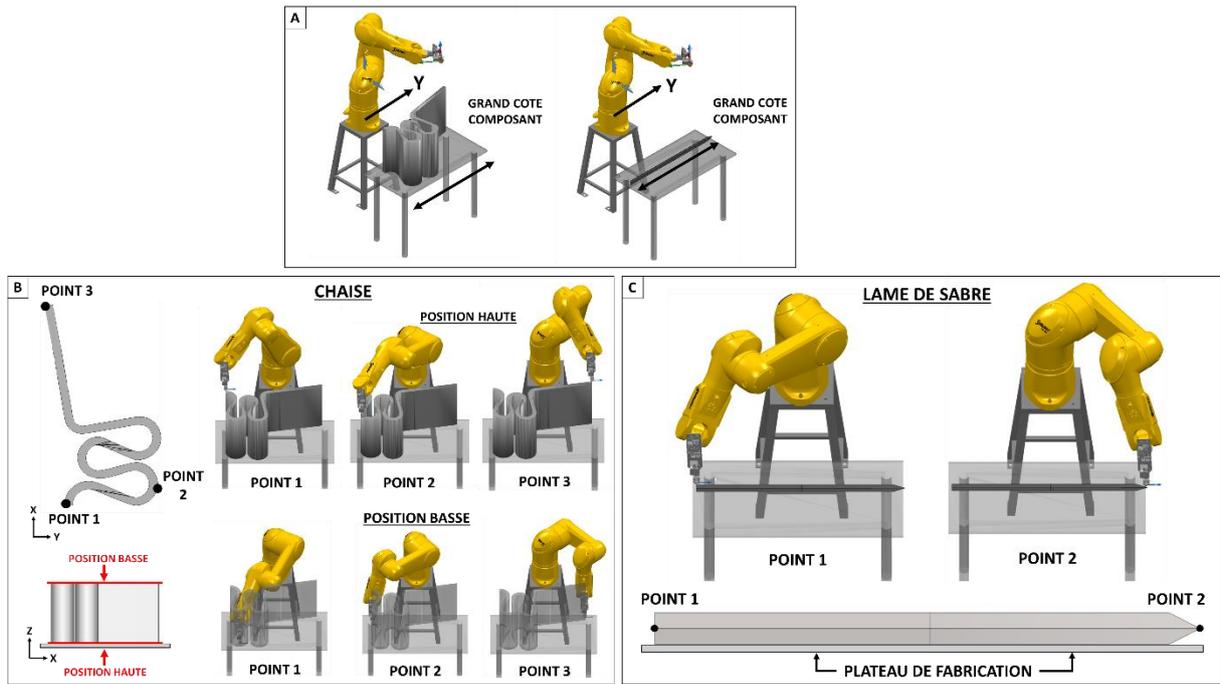


Figure 194 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, positionnement de la chaise et de la lame de sabre

Le fémur a été positionné sur le plateau de fabrication face au bras robotisé. La course de l'effecteur suivant la verticale ascendante étant supérieure à la hauteur du composant, c'est ce positionnement qui rendra la réalisation possible (Figure 195A). Quant au positionnement de l'hélice au sein de la cellule robotisée, nous avons choisi de la placer sur un plateau diviseur qui autorise une rotation autour d'un axe, l'usage de ce montage expérimental ajoutant un degré de liberté à la cellule robotisée (Figure 195Bi). La première entité sera donc bâtie à partir du plateau diviseur, les entités N°2 – N°3 – N°4 à partir du moyeu central (Figure 195Bii).

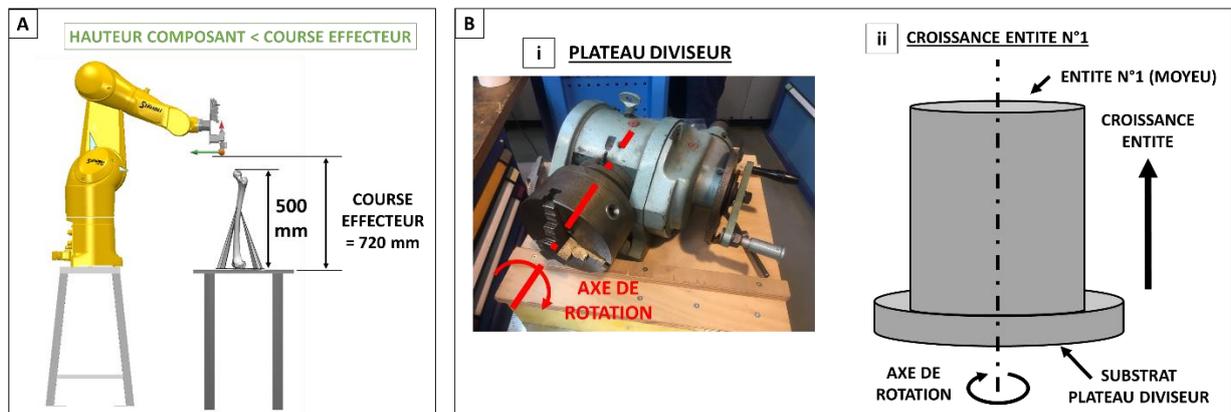


Figure 195 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, positionnement du fémur et de l'hélice au sein de la cellule robotisée

Plusieurs positions du composant par rapport au bras robotisé sont possibles :

- composant avec l'axe du moyeu central suivant la verticale ascendante. Suivant ce positionnement, le bras robotisé est capable de déplacer l'effecteur additif le long des trajectoires de fabrication (Figure 196A) ;
- composant avec l'axe du moyeu central suivant la verticale descendante. Ce positionnement n'est pas compatible avec la posture du bras robotisé : l'axe N°3 a été paramétré de manière à ce que le coude reste positif. La réalisation du composant avec ce positionnement nécessitant un coude négatif, ce positionnement n'est pas retenu (Figure 196B) ;

- composant avec l'axe du moyeu central suivant la direction opposée à l'axe X du repère lié au bras robotisé. Suivant ce positionnement, le bras robotisé est capable de déplacer l'effecteur additif le long des trajectoires de fabrication (Figure 196C) ;
- composant avec l'axe du moyeu central suivant l'axe X du repère lié au bras robotisé. Ce positionnement engendre une singularité de coude, le bras robotisé travaillant en hyperextension. Par conséquent, il n'est pas retenu (Figure 196D).

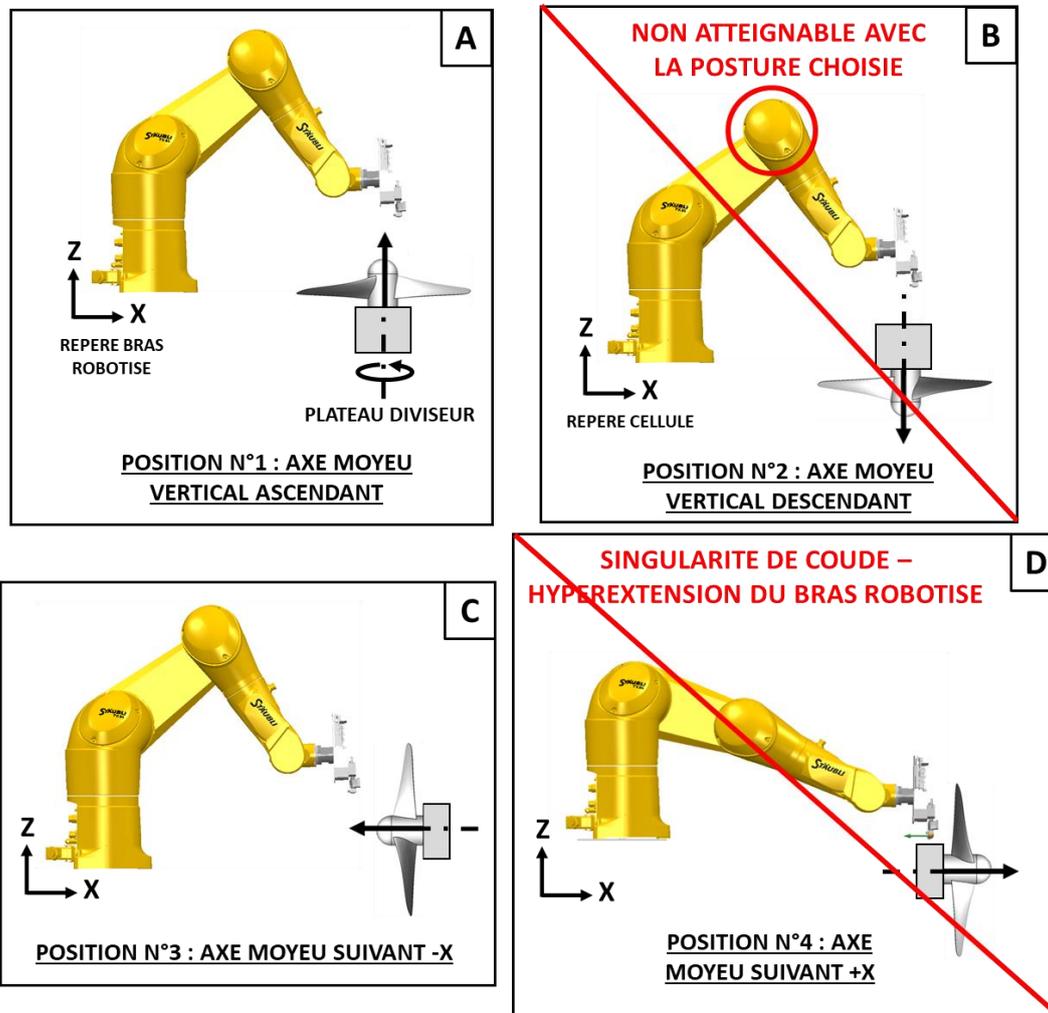


Figure 196 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, positions possibles de l'hélice face au bras robotisé

Il y a donc deux positions possibles de l'axe du moyeu par rapport au bras robotisé : la première suivant la verticale ascendante et la seconde suivant la direction opposée à l'axe X du repère lié au bras robotisé. Nous avons choisi cette dernière pour des raisons pratiques : le montage diviseur, suivant sa position naturelle, oriente l'axe du moyeu suivant la direction opposée à l'axe X du repère. Le montage expérimental sera alors plus facile à mettre en place. La fabrication des différentes entités qui constituent l'hélice est synthétisée dans la Figure 197 : le moyeu est réalisé suivant la direction opposée à l'axe X du repère lié au bras robotisé, les pales suivant l'axe Z du repère lié au bras robotisé.

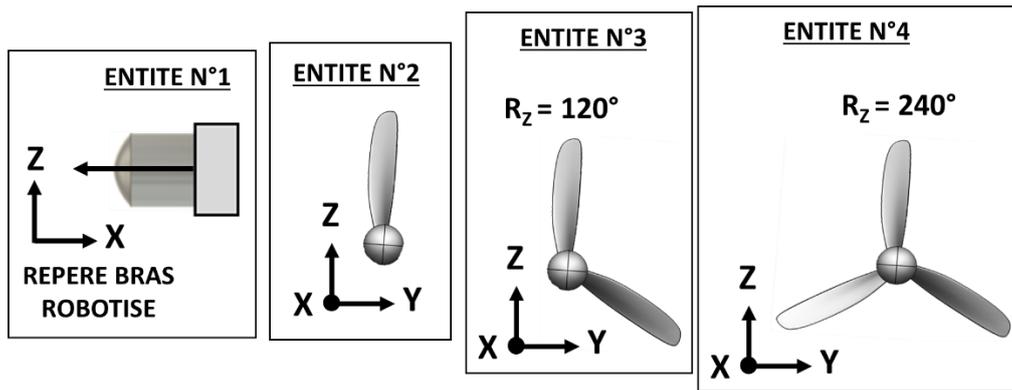


Figure 197 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions,

Paramétrage du mouvement des axes du bras robotisé

Une fois la posture du bras robotisé choisie et les composants positionnés au sein de la cellule robotisée, les mouvements des axes lors des stratégies de fabrication sont paramétrés. Lors du suivi des trajectoires de fabrication, le mouvement de certains axes peut être priorisé tandis que le mouvement d'autres axes peut être dépriorisé.

Dans le cadre de l'utilisation de l'effecteur additif utilisé lors de ces travaux de recherche, il a été choisi de prioriser les mouvements des axes 1, 2 et 3 et de déprioriser les mouvements des axes 4, 5 et 6 afin de limiter les mouvements du poignet du bras robotisé et de ne pas endommager les câbles de contrôle et d'alimentation électrique de l'effecteur additif utilisé, ce qui est illustré par la Figure 198 dans le cadre du suivi d'une trajectoire plane, horizontale formant des demis cercles (Figure 198A) :

- lorsque les axes N°1, N°2 et N°3 sont priorisés (axes N°4, N°5 et N°6 dépriorisés), les plages angulaires du bras robotisé lors du cycle de fabrication sont de 57 degrés suivant l'axe 4 (-18 à -75 degrés), 19 degrés suivant l'axe 5 (57 à -76 degrés) et de 0 degrés suivant l'axe 6 (valeur de l'axe constante, égale à -71 degrés) (Figure 198B) ;
- lorsque les axes N°4, N°5 et N°6 sont priorisés (axes N°1, N°2 et N°3 dépriorisés), les plages angulaires du bras robotisé lors du cycle de fabrication sont de 85 degrés suivant l'axe 4 (-15 à -100 degrés), 34 degrés suivant l'axe 5 (-60 à -94 degrés) et de 30 degrés suivant l'axe 6 (-75 à -104 degrés) (Figure 198C).

Les mouvements articulaires sont donc moindres lorsque la priorisation est portée sur les axes N°1, N°2 et N°3 du bras robotisé, les risques d'endommagement sont minimisés.

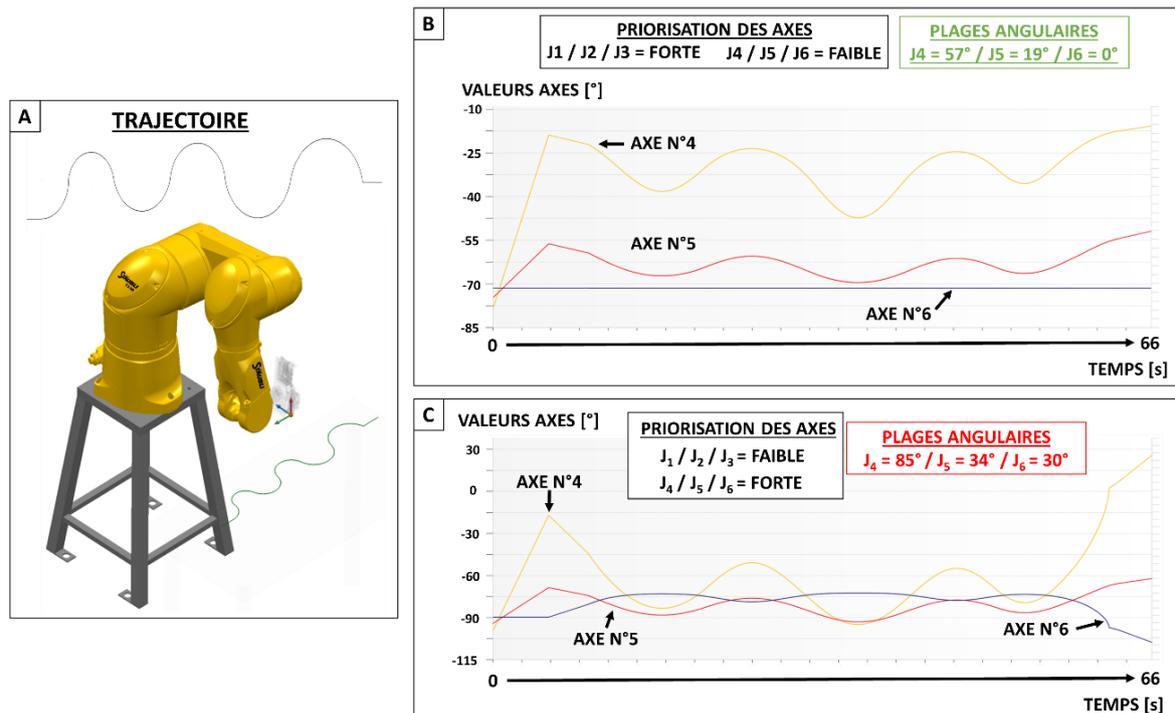


Figure 198 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, impacte de la priorisation des axes sur les mouvements articulaires du bras robotisé lors du suivi d'une trajectoires de fabrication

Par ailleurs, lorsqu'on utilise un effecteur additif pourvu d'une buse axisymétrique et un matériau sans renforts, cinq degrés de liberté sont nécessaires au suivi des trajectoires de fabrication. Par conséquent, on pourra bloquer l'axe N°6 du bras robotisé afin de supprimer un degré de liberté et ainsi éviter les redondances cinématiques.

Suite au paramétrage du porteur, nous avons réalisé une étape de simulation des stratégies de fabrication via l'utilisation d'un logiciel de FAO et du jumeau numérique de la cellule robotisée, afin de vérifier l'absence de limites d'axes, de singularités, de collisions et de mouvements articulaires indésirables. Elle n'a pas révélé de problèmes et les stratégies de fabrication ont été validées.

4.3. REALISATION DE L'ETAPE DE DERISQUAGE

Nous avons réalisé certaines parties de la lame de sabre, du fémur et de l'hélice, jugées comme potentiellement risquées, à travers une étape de dérisquage, afin de nous assurer de manière empirique de leur bonne réalisation.

La pointe de la lame du sabre, l'élément le plus critique, a été réalisée en premier. Elle a été correctement réalisée, l'adhésion entre la structure de soutien et cette dernière ayant été optimale. Nous avons ensuite fabriqué un sabre d'une longueur égale à 500 mm a qui n'a pas montré de déformations lors du refroidissement, ce qui indique que la problématique a été correctement anticipée lors de la mise en place de la stratégie volumique. La jonction entre la lame et la structure de soutien a été correctement réalisée ainsi que le dépôt global des couches de matière. L'étape de dérisquage de la lame de sabre a donc été validée (Figure 199).

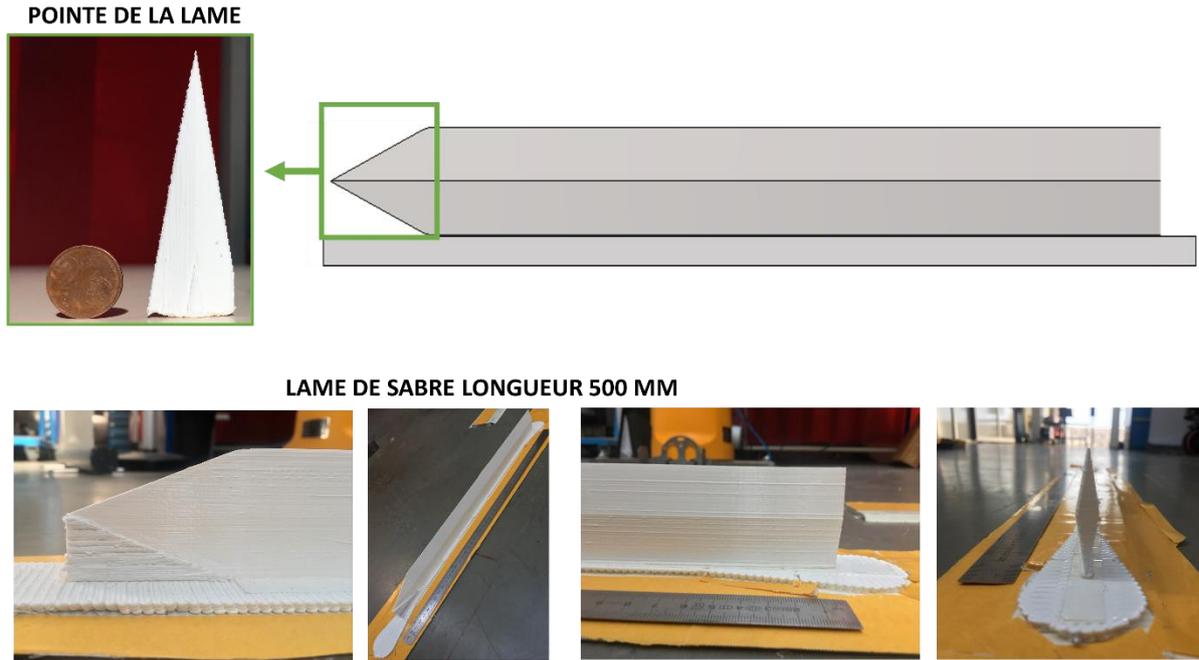


Figure 199 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, parties de la lame de sabre réalisées et validées par une étape de dérisquage

Lors de leur réalisation, les pointes des pales de l'hélice n'ont pas montré de signe d'effondrement des couches sous leurs propre poids, le dépôt des couches ayant été correctement réalisé (Figure 200A). C'est également le cas des surfaces en porte-à-faux du condyle et de la tête du fémur où il n'y a pas trace d'effondrement. Le dépôt des couches de matière est validé car les paramètres du procédé ont été correctement déterminés (Figure 200B).

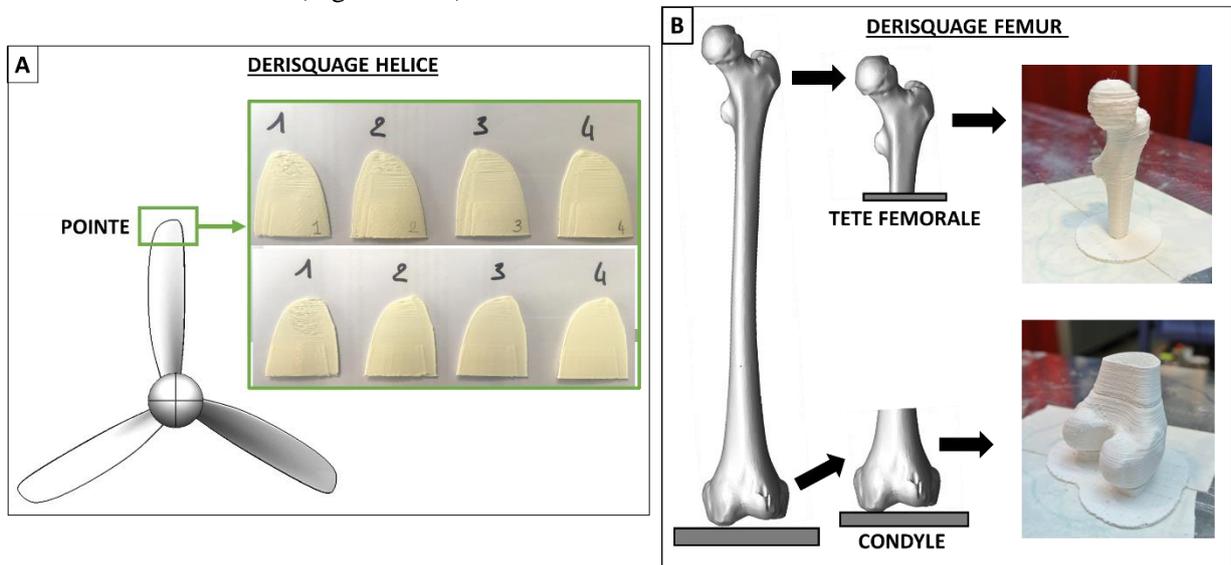


Figure 200 fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, parties du fémur et de l'hélice réalisées et validées par une étape de dérisquage

Les éléments ayant été correctement réalisés, l'étape de dérisquage a été validée et la fabrication des composants débutée.

4.4. FABRICATION DES CAS D'APPLICATION

Les composants ont finalement été réalisés conformément aux éléments présentés à travers les différentes étapes de la méthodologie de préparation à la fabrication.

4.4.1. HELICE

L'hélice a été réalisée à partir du plateau diviseur suivant le positionnement précédemment défini : axe du moyeu suivant la direction opposée à l'axe X du repère lié au bras robotisé et pales réalisées suivant l'axe Z du repère lié au bras robotisé (Figure 201A). Les Figure 201B et la Figure 201C représentent les entités N°1 (moyeu) et N°2 (pale N°1) en cours de fabrication.

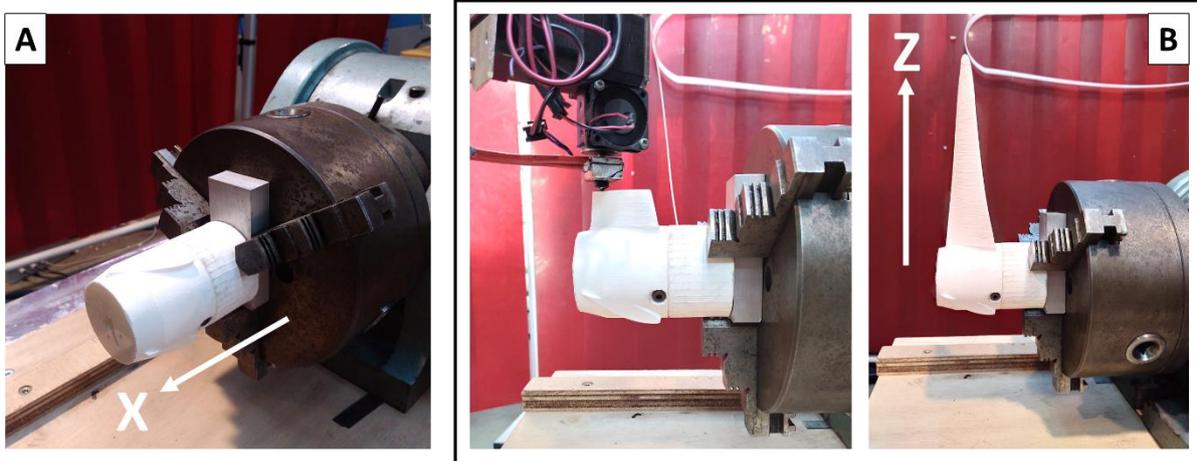
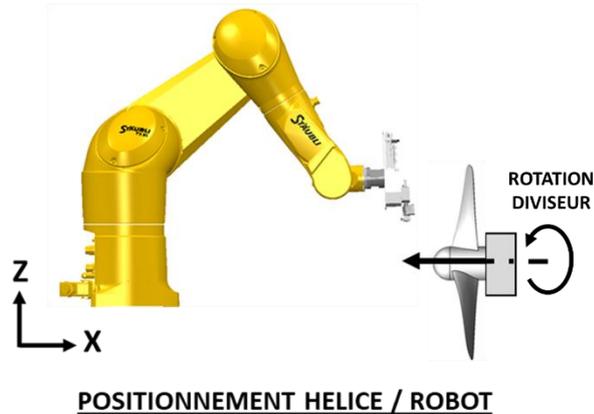


Figure 201 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, réalisation des entités N°1 et N°2 de l'hélice

Le résultat post fabrication est illustré par la figure ci-dessous : composant attaché au montage expérimental (Figure 202A), composant détaché du montage expérimental (Figure 202B). Une opération de polissage manuel a été réalisée après fabrication afin d'obtenir un état de surface irréprochable.

Pour conclure, la réalisation du composant s'est correctement déroulée et la résolution a été jugée comme satisfaisante : l'épaisseur des couches déposées (0,2 mm pour toutes les entités) a permis d'obtenir un rendu précis de toutes les géométries du composant. Le composant est actuellement exposé comme partie d'une maquette de taille réduite d'un bateau innovant.

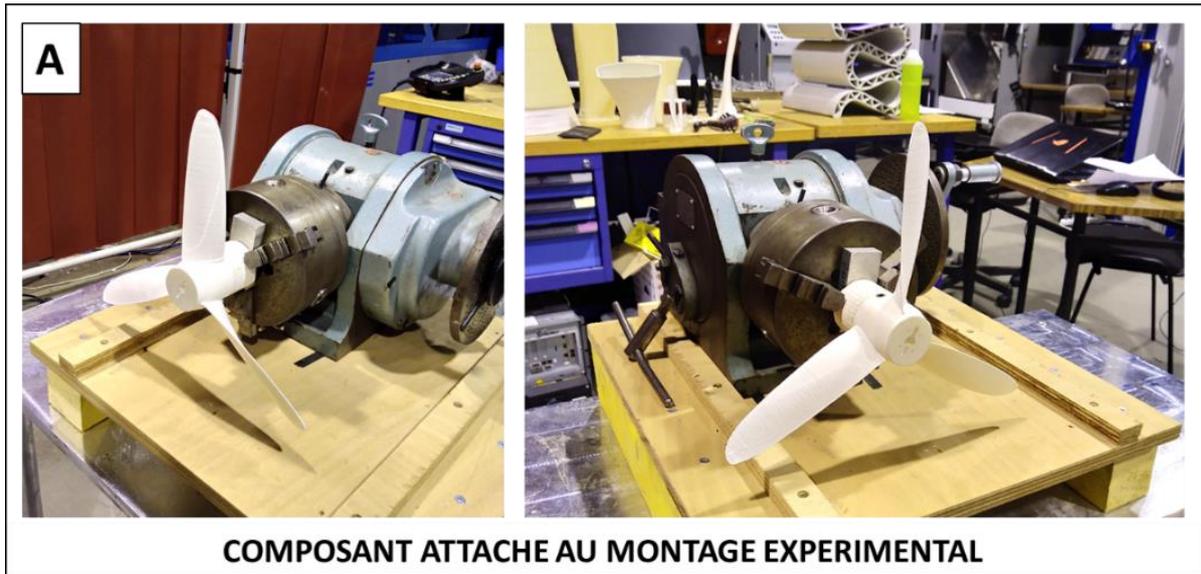


Figure 202 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, résultat obtenu suite à la fabrication de l'hélice

4.4.2. FEMUR

Le fémur a été réalisé à partir du plateau de fabrication, positionné avec l'axe mécanique fémoral à la verticale (condyle en bas, tête fémorale en haut) (Figure 203A). La Figure 203B montre le composant après fabrication, les structures de maintien et de soutien encore attachées au composant. Ces dernières ont permis de le maintenir correctement en cours de fabrication, lui épargnant la problématique des mouvements parasites et permettant au cycle de fabrication de se dérouler sans encombre.

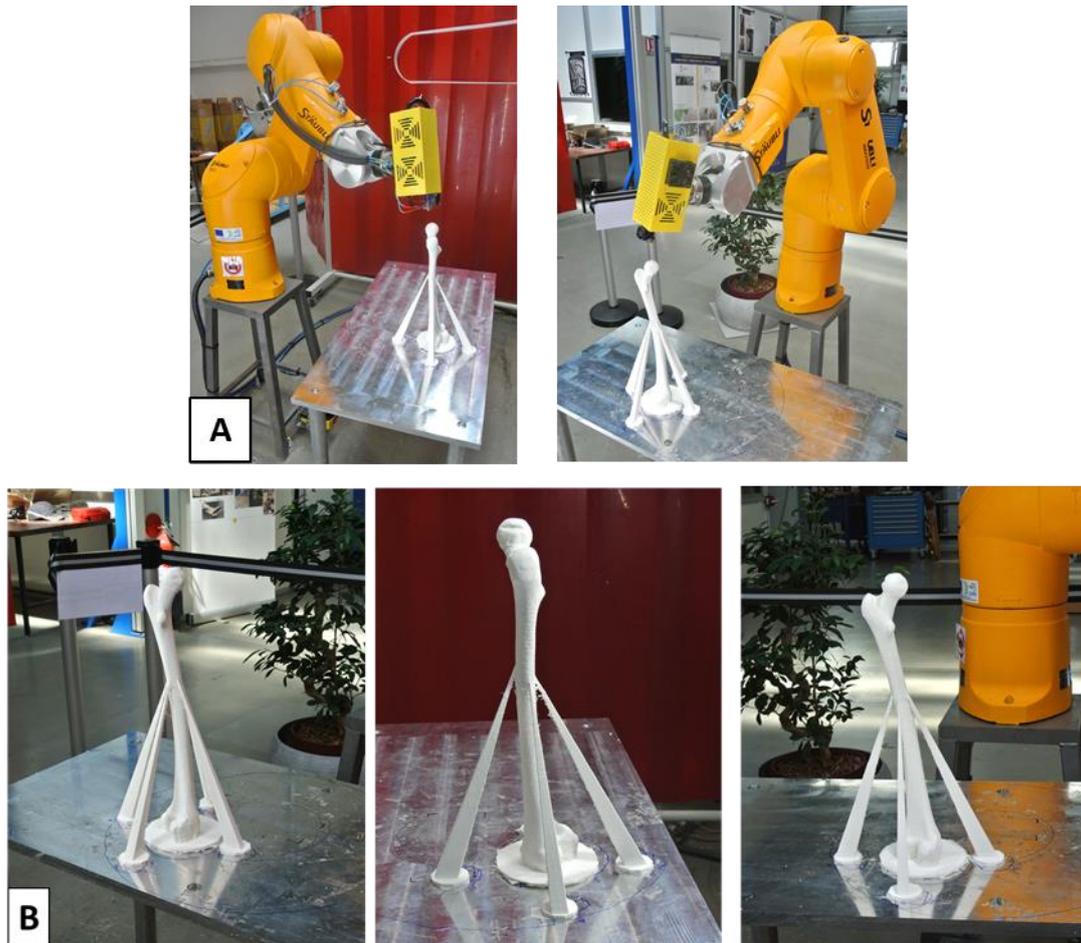


Figure 203 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, fémur positionné sur le plateau de fabrication

Après que le fémur a été décroché du plateau de fabrication, une opération de polissage manuel a été nécessaire afin de rendre les surfaces extérieures totalement lisses. La Figure 204 montre le fémur sans sa structure de maintien. Afin de pouvoir maintenir le composant à la verticale et de pouvoir être exposé, la structure de maintien a été conservée.

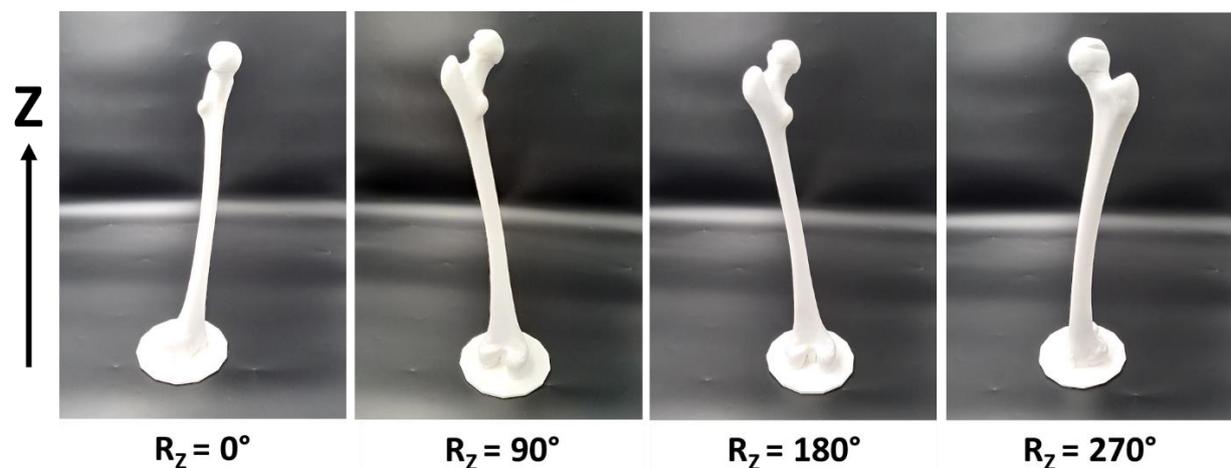


Figure 204 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, fémur sans structure de maintien et après polissage

La reproduction numérique du composant, réalisée avant l'opération de polissage, fait apparaître une déviation maximale de 2 mm par rapport à la maquette numérique (Figure 205). Dans l'ensemble, le corps du composant a été correctement réalisé et les déviations sont inexistantes. En revanche, celles-ci

sont plus importantes au niveau du condyle et de la tête fémorale. Nous avons conclu que les déviations négatives, au niveau de la tête fémorale, sont dues à l'effet de la gravité et qu'à l'opposé, les valeurs positives au niveau du condyle sont dues à une légère surextrusion, surextrusion qui a été retirée par l'opération de polissage.

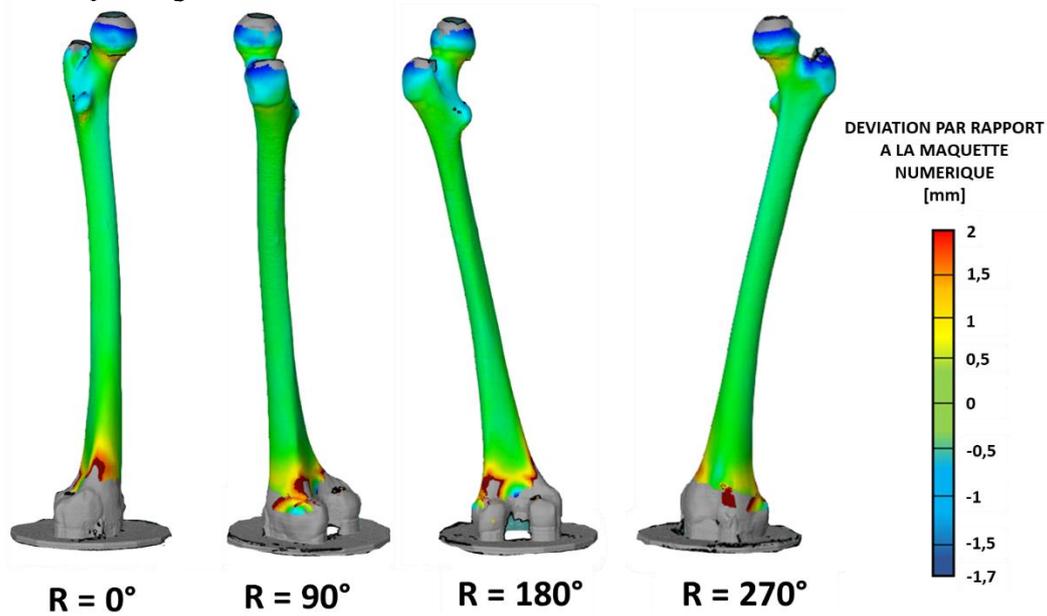


Figure 205 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, numérisation du composant réalisé et comparaison avec les géométries de la maquette numérique

4.4.3. LAME DE SABRE

La lame de sabre a été réalisée à l'horizontale, avec une structure de soutien permettant de créer un contact avec la structure en cours de fabrication. La Figure 206A illustre le résultat post-fabrication :

- la pointe de la lame a été correctement réalisée (Figure 206B), la structure de soutien ayant permis de maintenir le composant en cours de fabrication ;
- le pied de la lame a été correctement réalisé, en l'absence de décollement entre le composant et le substrat (Figure 206C).

De manière générale, le dépôt des couches est réussi et le paramétrage du procédé correctement réalisé.

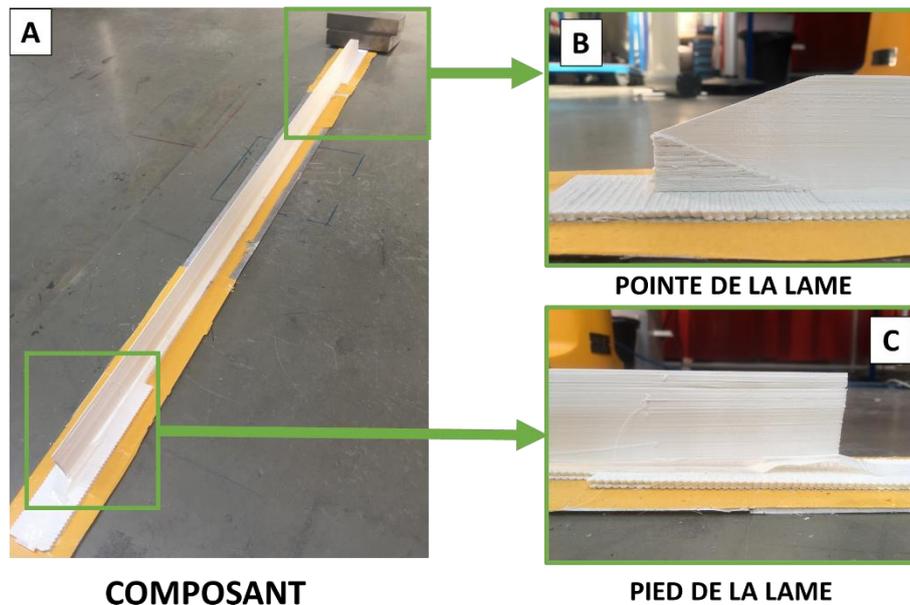


Figure 206 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, réalisation de la lame de sabre

La reproduction numérique du composant fait apparaître une déviation d'un millimètre présente au sommet de la pointe (Figure 207). Nous avons conclu qu'elle est due à une légère surextrusion à cet endroit qu'une opération de polissage manuel a permis de faire disparaître.

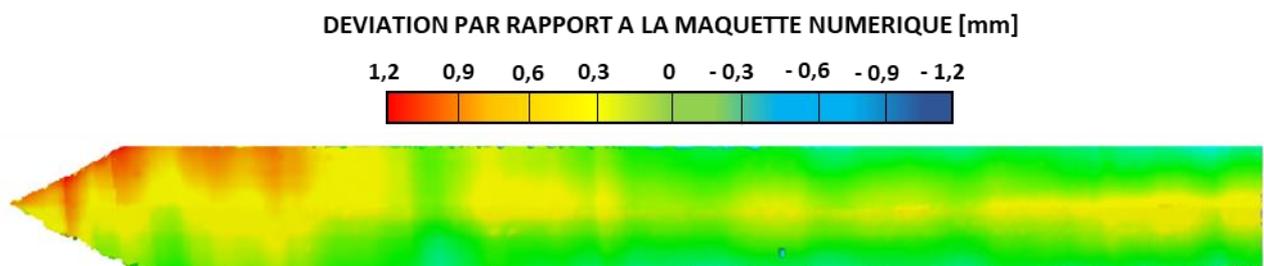


Figure 207 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, numérisation du composant réalisé et comparaison avec les géométries de la maquette numérique

4.4.4. HYPERBOLOÏDE

L'hyperboloïde a été réalisée avec sa stratégie de renforcement (Figure 208A). Si les résultats obtenus lors de la stratégie volumique et de renforcement sont corrects, il faut noter un arrêt d'extrusion dû à

une coupure de l'alimentation de l'effecteur additif qui a eu pour conséquence de stopper le dépôt de matière lors de la réalisation de certains renforts.

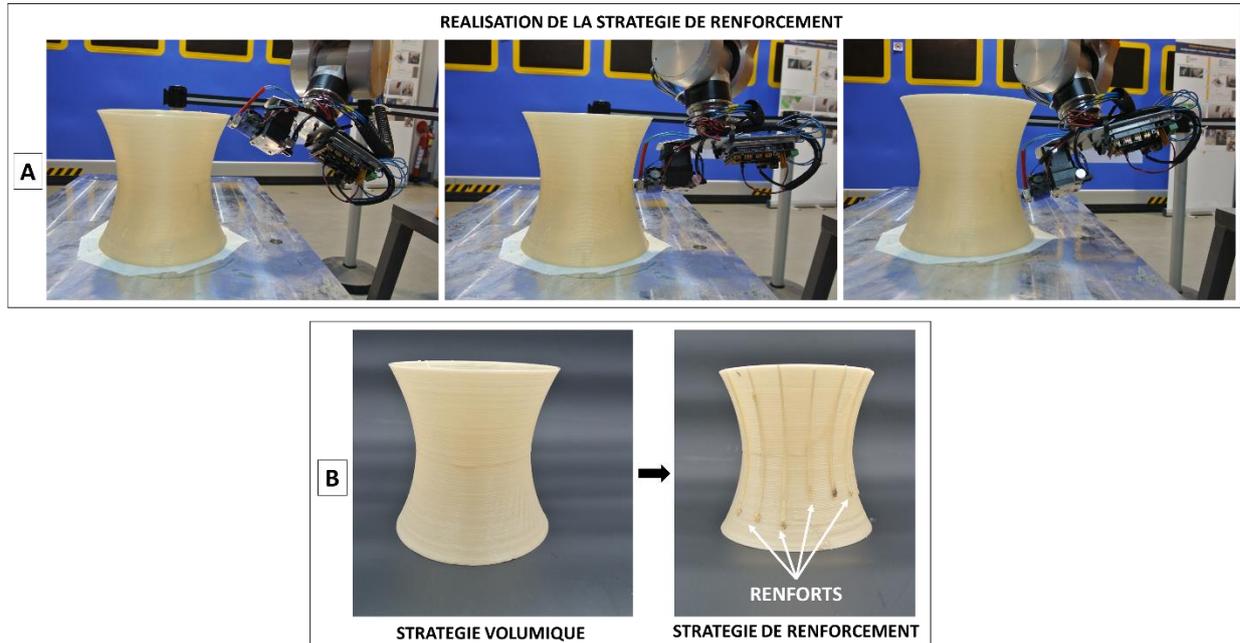


Figure 208 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, réalisation de l'hyperboloïde avec stratégie de renforcement

La prochaine étape consistera à fabriquer la structure une nouvelle fois en utilisant des matériaux renforcés de fibres continues afin de réaliser la stratégie de renforcement. La structure sera alors soumise à un essai de traction et l'apport de la stratégie de renforcement pourra être quantifié et validé.

4.4.5. PALE D'EOLIENNE

La pale d'éolienne a été réalisée à la verticale depuis le plateau de fabrication. La Figure 209 illustre le composant en cours de réalisation (Figure 209A) et en fin de fabrication (Figure 209B).

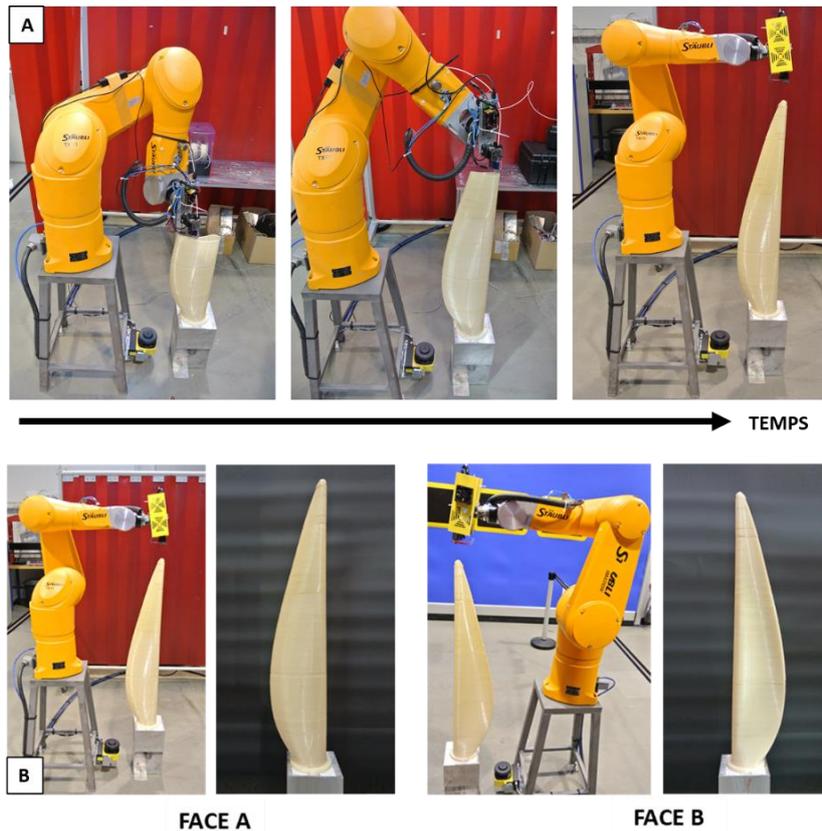


Figure 209 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, pale d'éolienne

Le composant a ensuite été reproduit numériquement et ses géométries comparées avec la maquette numérique (Figure 210) : on constate une déviation égale à 1,2 mm sur les faces A et B, ce qui est tolérable compte de ses dimensions. Un arrêt inopiné du cycle de fabrication, dû à une erreur dans le paramétrage de la plage angulaire de l'axe N°2 du bras robotisé, explique la déviation se trouvant au niveau de la pointe de la pale : le cycle a été stoppé et relancé, engendrant un léger décalage entre les couches déposées avant et après l'arrêt du bras robotisé.

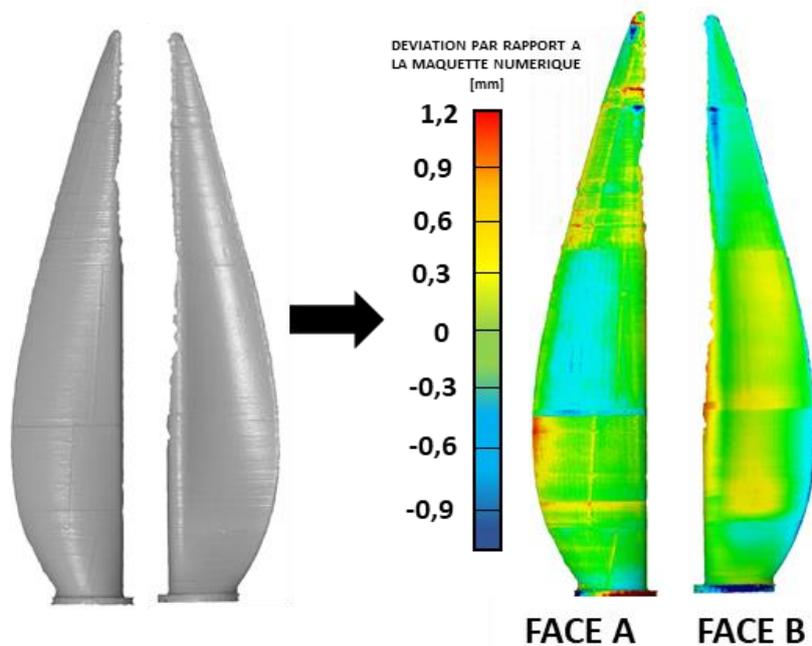


Figure 210 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, numérisation du composant réalisé et comparaison avec les géométries de la maquette numérique

4.4.6. CHAISE

La Figure 211 montre la chaise en cours de fabrication par le bras robotisé (Figure 211A), sur le plateau de fabrication après sa réalisation (Figure 211B) et retirée du plateau, en position de fonctionnement (Figure 211C).

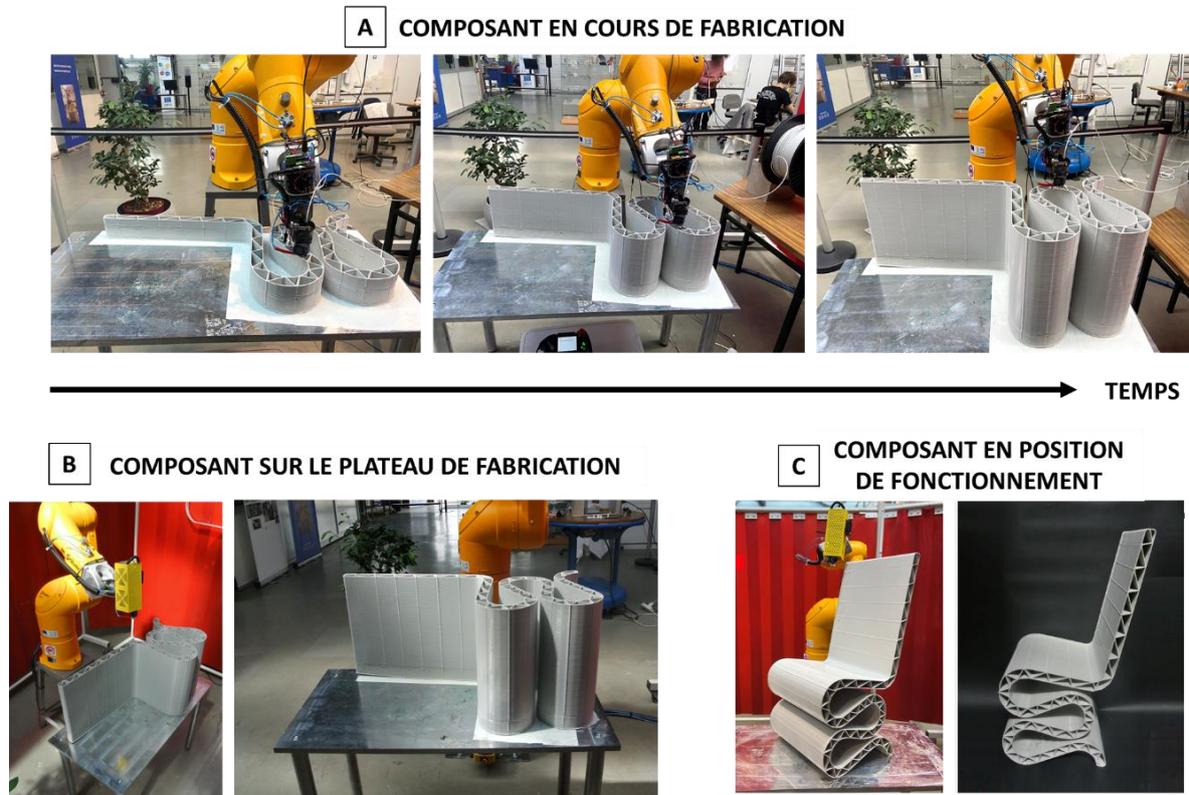


Figure 211 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, réalisation de la chaise

Le cycle de fabrication s'est déroulé de façon satisfaisante : l'empilement des couches a été correctement réalisé et les paramètres du procédé ont permis d'obtenir des cordons aux dimensions souhaitées. Néanmoins, deux points sont à signaler :

- l'enroulement du filament au sein de la bobine utilisée pour la fabrication a été défectueux à un endroit, le déroulement de la bobine stoppé pour quelques minutes, ce qui a empêché le dépôt partiel d'une couche de matière et l'apparition d'un défaut visuel (Figure 212A) ;
- un léger décollement entre le composant et le plateau de fabrication est apparu en cours de réalisation (Figure 212B), défaut dû à la contraction des cordons le long de leur direction de dépôt suite à l'apparition de contraintes résiduelles lors du refroidissement (Figure 212C). Le décollement étant faible, nous avons choisi de continuer malgré tout la fabrication du composant.

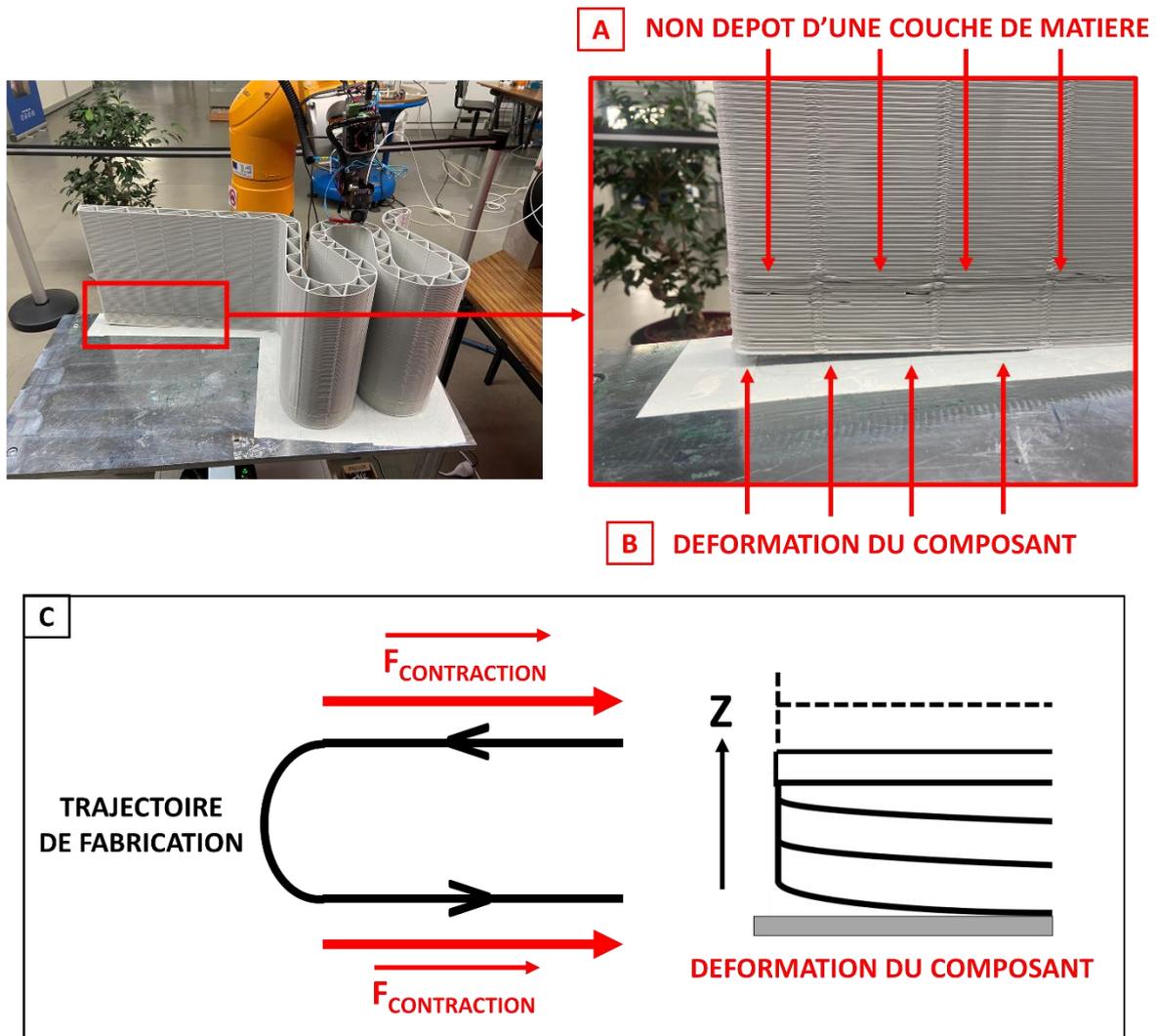


Figure 212 : fabrication additive de pièces en polymère fondu de grandes dimensions, défaut engendré lors du cycle de fabrication

La chaise est maintenant exposée sur la plateforme Rapid Manufacturing. Des essais mécaniques seront prochainement menés afin de valider de manière empirique les résultats obtenus lors de l'étape de simulation par éléments finis.

4.5. CONCLUSION SUR LE PARAMETRAGE DU MOYEN DE FABRICATION ET SUR LA REALISATION DES CAS D'APPLICATIONS

Les travaux présentés dans cette partie ont porté sur le choix et le paramétrage du moyen de fabrication. Nous avons comme principal objectif d'appliquer la méthodologie de choix et de paramétrage présentée au sein de la partie 3, aux travaux réalisés dans le cadre de ce doctorat.

Dans un premier temps, nous avons développé le choix et le paramétrage de l'effecteur additif utilisé afin de réaliser les stratégies volumiques et de renforcement, suivant la méthodologie présentée dans la partie 2.1. Au vu des composants à réaliser dans le cadre des cas d'application et des matériaux utilisés, notamment des filaments renforcés de fibres continues, nous avons choisi le procédé « Dépôt de fil fondu ». Nous avons utilisé des buses d'injection axisymétriques ayant des diamètres qui vont de 0,4 à 2,85 mm afin de s'adapter aux différentes épaisseurs de couches et aux largeurs de cordons paramétrées lors de la mise en place des stratégies de sectionnement. Nous avons mis en avant l'effecteur et les équipements utilisés, adaptés au procédé « Dépôt de fil fondu ». Nous avons également traité le

paramétrage de l'orientation de l'effecteur pour chacune des stratégies de fabrication réalisées dans le cadre des cas d'application (axe de l'effecteur \vec{O} et direction d'avance \vec{V}) :

- les composants sectionnés par une stratégie planaire et horizontale auront un axe de l'effecteur \vec{O} à orientation constante et verticale ;
- les stratégies de renforcement nécessiteront un axe de l'effecteur \vec{O} perpendiculaire aux parois recouvertes, à orientation variable ;
- la réalisation de l'hélice nécessitera 4 orientations de l'axe de l'effecteur \vec{O} différentes.

Nous avons réalisé dans un second temps le choix et le paramétrage du porteur utilisé afin de réaliser les cas d'application suivant la méthodologie présentée au sein de la partie 2.3, dont la première partie consiste à déterminer l'architecture cinématique du porteur. Au vu de l'orientation de l'effecteur additif suivant les différentes stratégies de fabrication et le contrôle de la direction d'avance \vec{V} nécessaire à la dépose de filament renforcé de fibres continues, trois déplacements et trois rotations doivent être possibles. Par conséquent, nous avons retenu une architecture de type bras robotisé 6-axes. Par conséquent, nous avons choisi un bras robotisé 6-axes ayant un espace de travail assez grand pour réaliser les cas d'application. Nous avons testé, modifié puis validé l'espace de travail offert par le bras robotisé Stäubli TX90, présent au sein de la plateforme Rapid Manufacturing :

- le bras sera placé sur une chaise mécano soudée, haute de 700 mm, qui permettra d'augmenter l'espace de travail suivant la verticale ascendante, afin de permettre la réalisation de la pale d'éolienne, placée à la verticale par rapport au plateau de fabrication ;
- un plateau de fabrication, long de 1000 mm et large de 500 mm, a été réalisé et placé à la même hauteur que la base du robot.

Nous avons alors réalisé le jumeau numérique de la cellule robotisée et l'avons implémenté au sein d'un logiciel de fabrication assistée par ordinateur. Pour paramétrer le bras robotisé, nous avons ensuite :

- édicté une règle de positionnement des composants au sein de la cellule robotisée ;
- défini la posture du robot (épaule à gauche, coude positif et poignet négatif). Afin d'éviter les changements de postures en cours de fabrication qui exposent à une singularité, les plages angulaires du bras robotisé ont été volontairement modifiées ;
- priorisé ou non les mouvements des différentes articulations du bras robotisé afin de limiter les mouvements du poignet qui peuvent endommager les câbles de contrôle et d'alimentation électrique de l'effecteur additif.

Nous avons enfin réalisé une étape de simulation des stratégies de fabrication des composants à réaliser, sans qu'aient été révélés des singularités, des collisions et des mouvements anormaux des axes du bras robotisé. Nous avons pu alors valider le porteur.

Dans une troisième partie, nous avons mené l'étape de dérisquage sur la pointe des pales de l'hélice, le condyle et la tête du fémur. Ces éléments ont validé les différentes étapes de la méthodologie de préparation à la fabrication de composants de grandes dimensions.

Finalement, nous avons réalisé les cas d'application de cette méthodologie suivant les éléments présentés à travers les différents chapitres, avons illustré les résultats obtenus et reproduit numériquement certains composants (fémur, pale d'éolienne, lame de sabre). Les choix effectués et les règles suivies nous ont paru pertinents : les composants ont correctement été réalisés et se sont montrés conformes à leur cahier des charges respectifs.

5. CONCLUSION DU CHAPITRE

Les travaux présentés dans ce chapitre ont porté sur le choix et le paramétrage du moyen de fabrication nécessaire à la réalisation additive de composants de grandes dimensions réalisés à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus, dernière étape de la méthodologie de préparation à la fabrication. Dans un premier temps, nous avons explicité les notions nécessaires à la compréhension de l'étape :

- moyen de fabrication, constitué de l'ensemble porteur – effecteurs ;
- effecteurs soustractifs, ayant pour objectif le retrait des surépaisseurs volontairement ajoutées à la maquette numérique du composant à fabriquer ;
- effecteurs additifs, ayant pour objectif de déposer des cordons de matériaux polymères thermoplastiques fondus suivant des trajectoires additives précédemment paramétrées ;
- les différentes catégories de porteurs utilisées dans le cadre de la littérature scientifique (machines 3-axes, machines 5-axes, bras robotisés 6-axes) et les leurs principales caractéristiques (structure cinématique et espace de travail).

Dans un second temps, nous avons développé les problématiques scientifiques relatives à l'étape A3 de la méthodologie de préparation à la fabrication :

- prise en compte des stratégies de sectionnement et des trajectoires de renforcement pour l'orientation de l'effecteur le long des trajectoires de fabrication et les géométries de la buse d'injection ;
- prise en compte du matériau utilisés et des dimensions des cordons déposés pour le paramétrage de la buse d'injection.

Ces problématiques seront résolues par les méthodologies présentées à travers ce chapitre.

Dans une troisième partie, nous avons traité la méthodologie de choix et de paramétrage du moyen de fabrication, méthodologie divisée en trois étapes :

- choix et paramétrage des effecteurs additifs ;
- choix et paramétrage du porteur ;
- réalisation d'une passe de dérisquage.

Les deux premières étapes de la méthodologie ont fait l'objet de méthodologies génériques. Pour le choix et le paramétrage des effecteurs additifs, nous avons d'abord choisi un procédé de fabrication en adéquation avec les propriétés du composant à réaliser (géométrie et dimensions, résolution, matériaux) et les caractéristiques intrinsèques aux procédés de fabrication additifs à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus (matériaux utilisables, débit massique, épaisseur des couches déposées, dimensions des cordons déposés). Ensuite, nous avons paramétré les effecteurs additifs pour chacune des stratégies de fabrication en tenant compte des éléments suivants :

- respect et conservation des dimensions des cordons déposés pendant le suivi des trajectoires de fabrication ;
- prise en compte des propriétés du matériau déposé et notamment de la présence de fibres continues ;
- optimisation de la mise en contact des cordons déposés afin d'améliorer l'adhésion entre les couches de matière ;
- prise en compte de l'accessibilité afin d'éviter les collisions entre l'effecteur additif et des éléments extérieurs.

Pour finir, nous avons simulé le parcours de l'effecteur par l'intermédiaire d'un logiciel de FAO afin de s'assurer de l'absence de collisions entre les effecteurs et les éléments extérieurs (plateau de fabrication, entités précédemment réalisées, sections non planes).

Pour le choix et le paramétrage d'un porteur, nous avons d'abord choisi une architecture cinématique en fonction de l'orientation des effecteurs précédemment paramétrés (axe de l'effecteur \vec{O} et rection d'avance \vec{V}). Nous avons ensuite déterminé l'espace de travail nécessaire à la réalisation du composant en fonction de ses dimensions (tel que positionné sur le plateau de fabrication), de son éventuelle structure de maintien et de l'encombrement des effecteurs utilisés. Puis nous avons paramétré le porteur pour chacune des stratégies de fabrication, procédé spécifique à l'architecture cinématique précédemment choisie, avec des stratégies de fabrication simulées par l'intermédiaire d'un logiciel de FAO afin de vérifier l'absence de collisions et de singularités le long des trajectoires.

Dans la dernière partie du chapitre, nous avons appliqué la méthodologie précédente aux cas d'application de la méthodologie de préparation à la fabrication. Nous avons choisi et paramétré l'effecteur additif afin de réaliser des stratégies volumiques et de renforcement : nous avons retenu le procédé « Dépôt de fil fondu » et utilisé des buses d'injection axisymétriques avec des diamètres allant de 0,4 à 2,85 mm afin de s'adapter aux différentes épaisseurs de couches et aux largeurs de cordons paramétrés lors de la mise en place des stratégies de sectionnement ; nous avons paramétré l'orientation de l'effecteur en fonction des stratégies de sectionnement et de renforcement. Puis, nous avons illustré le choix et le paramétrage d'un porteur : un bras robotisé Stäubli TX90, a été positionné sur une chaise mécano soudée et le jumeau numérique de la cellule robotisée a été implémenté au sein d'un logiciel de FAO. Nous avons alors énoncé et appliqué des règles spécifiques au paramétrage d'un bras robotisé 6-axes : positionnement des composants au sein de la cellule robotisée, choix et paramétrage d'une posture du robot, priorisation et dépriorisation des différentes articulations. Une étape de simulation cinématique a finalement confirmé l'absence de limites d'axes, de singularités, de collisions et de mouvements articulaires le long du parcours des stratégies de fabrication. Enfin, une passe de dérisquage a permis de valider la bonne réalisation des éléments des cas d'application jugés à risque : motifs de remplissage et contour extérieur de la chaise, pointe des pales de l'hélice, condyle et tête du fémur. Pour finir, nous avons réalisé les cas d'applications de la méthodologie. Leur fabrication a été correctement réalisée et ils se sont montrés conformes à leurs cahiers des charges respectifs.

Pour conclure, les procédés additifs basés sur l'extrusion de matériaux polymères thermoplastiques fondus présentent des problématiques d'ordre mécanique, géométrique et thermique qui leur sont inhérentes. Dans ce chapitre, nous nous proposons de leur apporter une solution via le développement de stratégies de fabrication adaptées. Si la mise en place de stratégies volumiques n'est pas un fait nouveau, notre méthodologie incorpore des outils de simulation numérique, imagine la génération de surépaisseurs et anticipe la problématique de décollement, ce qui n'est nullement mentionné dans la littérature scientifique. L'approche choisie afin de pallier l'anisotropie est, quant à elle, novatrice : elle propose de résoudre cette problématique par le développement de stratégies de renforcement, basées sur les trajectoires multiaxes et les matériaux renforcés de fibres continues. Enfin, ce chapitre propose une vision globale et synthétique des trajectoires de fabrication (additives, soustractives) dissociées en stratégies de fabrication et agencées les unes par rapport aux autres, ce dont la littérature scientifique n'a jamais parlé.

Le chapitre suivant présentera une synthèse des travaux et des apports scientifiques de ce manuscrit. Il traitera également des axes de développement relatifs à la méthodologie présentée.

CHAPITRE 5 - CONCLUSION ET PERSPECTIVES

5.1. SYNTHÈSE DES TRAVAUX

On a longtemps cantonné les procédés additifs basés sur l'extrusion de polymères thermoplastiques fondus à la réalisation de composants destinés aux loisirs et au prototypage rapide. Ces procédés ont été appelés « impression 3D », ce qui, faute de considération, a retardé leur entrée dans le domaine des pièces fonctionnelles. De ce fait, à l'heure actuelle, leur niveau de maturité technologique a pris du retard par rapport aux procédés additifs réalisés à partir de fils et de poudres métalliques.

Cependant, nous avons montré dans le premier chapitre que l'arrivée de matériaux innovants aux propriétés mécaniques intrinsèques fortes a ouvert la voie à de nouveaux champs d'applications que les laboratoires de recherche et industriels se sont empressés de conquérir : ces dernières années, des démonstrateurs de grandes dimensions, structuraux ou non structuraux, ont vu le jour (moules et outillages de grandes dimensions, équipements sportifs, ponts pédestres, ...). En effet, les procédés additifs basés sur l'extrusion de matériaux thermoplastiques fondus présentent de nombreux avantages : fabrication de composants en fonction de critères à respecter ou sur mesure, réduction des coûts et des délais d'obtention, évolution des composants facilitée ou encore réduction du nombre de composants présents au sein d'un système. Cependant, il ressort de la littérature scientifique que la façon de fabriquer ces composants est de type « essais - erreurs – corrections », coûteuse en temps, en ressources et en argent. De plus, des problématiques scientifiques demandent à être résolues :

- génération de trajectoires de fabrication permettant la tenue mécanique des composants face à des sollicitations pendant leur service ;
- respect des contraintes géométriques, dimensionnelles et d'état de surface incluses dans le cahier des charges ;
- gestion des problématiques thermiques ;
- choix et paramétrage d'un moyen de fabrication.

Fort de ce constat, nous avons décidé de réaliser dans le cadre de ces travaux une méthodologie de préparation à la fabrication générique, qui a pour objectif de s'affranchir du mode de fonctionnement « essais - erreurs – corrections » afin d'évoluer vers un cheminement étape après étape, intégrant des règles métier spécifiquement développées, des méthodes numériques et l'utilisation de matériaux thermoplastiques renforcés de fibres continues. La méthodologie a été décomposée en trois étapes, chacune développée dans un chapitre spécifique : mise en position et sectionnement du composant à fabriquer (étape A1), mise en place des stratégies de fabrication (étape A2), choix et paramétrage du moyen de fabrication (étape A3). Afin de mettre en lumière les éléments présentés, nous avons choisi de réaliser des démonstrateurs de grandes dimensions : chaise, pale d'éolienne, fémur, lame de sabre, hyperboloïde et hélice de bateau.

Nous avons consacré le chapitre 2 à la première étape de la méthodologie au sein de laquelle la maquette numérique du composant à fabriquer est tour à tour mise en position par rapport à un plateau de fabrication générique puis sectionnée suivant des critères liés à ses géométries et à sa mise en position. Nous avons décidé d'orienter la mise en position du composant de façon à limiter les surfaces en porte-à-faux, choix motivé par le souhait de bâtir sans supports de fabrication, ce qui limite le recours à des opérations de parachèvement, diminue le temps de cycle de fabrication et le coût global d'un composant. De plus, des considérations d'ordre écologique font également éviter le recours à des structures sacrificielles. Lorsqu'on ne peut envisager une orientation qui n'excède pas la limite de porte-à-faux admissible, le composant est décomposé en entités. On a également recours à une modification de la maquette numérique afin d'implémenter des structures de soutien ou de maintien. Le sectionnement du composant est, quant à lui, réalisé en fonction de ses géométries, de sa mise en position et en fonction de contraintes relatives au procédé utilisé. Des cas d'applications de la méthodologie ont mis en évidence les éléments présentés. La fin du chapitre a appliqué notre méthodologie aux maquettes numériques des démonstrateurs, chaise, fémur, pale d'éolienne, hyperboloïde, lame de sabre et hélice. Les cinq premiers démonstrateurs ont été mis en position par rapport au plateau de fabrication sans dépasser la limite de

porte-à-faux admissible. Le fémur étant positionné à la verticale, nous lui avons attribué deux structures, l'une de soutien et l'autre de maintien, qui ont été implémentées à la maquette numérique du composant. L'hélice a, quant à elle, été décomposée en quatre entités car ses géométries ne lui permettent pas d'être orientée par rapport au plateau de fabrication sans outrepasser la limite de porte-à-faux admissible.

Le chapitre 3 a traité de la deuxième étape de la méthodologie de préparation à la fabrication qui consiste à mettre en place les stratégies de fabrication du composant. Dans un premier temps nous avons développé les notions relatives à la mise en place de stratégies de fabrication : trajectoires de fabrication, type et ordonnancement des stratégies de fabrication. Nous avons ensuite traité les problématiques scientifiques en lien avec la fabrication additive de composants de grandes dimensions, problématiques mécaniques, thermiques, géométriques et chimiques. Des stratégies de fabrication, stratégies volumiques, de renforcement et de parachèvement ont permis de les résoudre. Puis, nous avons proposé deux méthodologies de mise en place des stratégies de fabrication :

- une méthodologie de mise en place des stratégies volumiques prenant en considération les problématiques thermiques, géométriques et les sollicitations mécaniques « dans le plan » ;
- une méthodologie de mise en place des stratégies de renforcement, afin de pallier la problématique d'anisotropie des propriétés mécaniques par une approche de type « génération de trajectoires multiaxes » et l'utilisation de matériaux renforcés de fibres continues.

Par la suite, nous avons appliqué ces différentes stratégies aux cas d'application mis en position et sectionnés lors de la première étape de la méthodologie. En ce qui concerne la chaise et la lame de sabre, nous avons retenu la méthodologie de mise en place des stratégies volumiques et utilisé des outils de simulation par éléments finis. L'hyperboloïde a, quant à elle, été renforcée suivant la méthodologie de mise en place des stratégies de renforcement. Ces cas d'application ont permis de démontrer la pertinence des éléments présents au sein des méthodologies.

Enfin, le chapitre 4 a porté sur la troisième et dernière étape de la méthodologie de préparation qui consiste à choisir et à paramétrer un moyen de fabrication. Dans une première partie, nous avons explicité les notions nécessaires à la compréhension du chapitre : moyen de fabrication, effecteurs soustractifs, effecteurs additifs, différentes catégories de porteurs. Dans un second temps, nous avons développé les problématiques scientifiques relatives à cette étape de la méthodologie : optimisation de l'adhésion entre les couches de matière déposées, paramétrage de l'effecteur et de la buse d'injection en fonction des trajectoires de fabrication et du matériau déposé. Puis, dans une troisième partie, nous avons proposé une méthodologie de choix et de paramétrage du moyen de fabrication divisée en trois étapes : choix et paramétrage des effecteurs additifs, choix et paramétrage d'un porteur et dérisquage du composant à fabriquer. Finalement, nous avons appliqué aux démonstrateurs la méthodologie proposée dans ce chapitre. Nous avons choisi d'utiliser le procédé « Dépôt de fil fondu » car sa forte résolution est nécessaire à l'obtention des géométries relatives au fémur et à l'hélice. Il permet également d'utiliser des matériaux renforcés de fibres continues. Nous avons développé un effecteur additif adapté au procédé. Pour réaliser les démonstrateurs pour lesquels il faut contrôler l'orientation de l'axe et la direction d'avance de l'effecteur, nous avons choisi d'utiliser un bras robotisé 6-axes. Nous avons testé et validé la capacité à réaliser les démonstrateurs de ce bras robotisé disponible sur la plateforme RapidManufacturing. Nous avons ensuite dérisqué et validé les parties les plus sensibles de la lame de sabre et du fémur. Finalement, nous avons réalisé les démonstrateurs et leur fabrication s'est montrée conforme à leur cahier des charges respectif.

5.2. APPORTS DES TRAVAUX

L'apport principal de nos travaux est de proposer une méthodologie générique et synthétique pour la réalisation de composants de grandes dimensions à partir de matériaux thermoplastiques fondus en fabrication additive. Ainsi, il est possible de réaliser n'importe quel composant sans restriction sur ses géométries, son cahier des charges et le matériau le constituant. Notre méthodologie revêt toute son importance car elle apporte des éléments qui nous ont semblé pertinents et qui sont absents de la littérature scientifique.

Notre parti pris méthodologique est le suivant : les choix réalisés s'adaptent au composant à fabriquer. Prenons l'exemple du choix d'un porteur : ce dernier sera adapté aux dimensions du composant à réaliser et aux orientations paramétrées des effecteurs le long des trajectoires de fabrication. La cinématique et les dimensions de son espace de travail seront alors choisies en conséquence. Ce raisonnement peut se généraliser à l'ensemble des étapes de la méthodologie : choix d'une stratégie de tranchage, choix des stratégies de fabrication, choix du procédé. Nous avons choisi cette façon de procéder car elle nous a semblé adaptée et en adéquation avec la résolution nécessaire des verrous liés aux composants de grandes dimensions, notamment la problématique d'anisotropie des propriétés mécaniques, les considérations liées à la baisse de la quantité de matière utilisée et la baisse du temps de cycle de fabrication. De plus, il n'est pas fait mention au sein de la littérature de travaux similaires et il nous a semblé juste de combler cette absence.

La méthodologie de préparation à la fabrication propose des étapes de modifications de la maquette numérique, pour ajouter des structures de soutien et / ou de maintien ou pour anticiper certaines stratégies de fabrication. Cette façon de procéder n'a pas été abordée dans la littérature mais nous l'avons trouvée adaptée au procédé et validée de manière empirique. La méthodologie propose également une approche de la génération de trajectoires qui s'affranchit du fonctionnement « 2.5D » traditionnellement utilisé dans le cadre des procédés basés sur l'extrusion de matériaux polymères thermoplastiques fondus, afin d'évoluer vers des trajectoires de fabrication multiaxes (générées suivant toutes les directions de l'espace) qui permettent de :

- fabriquer des composants fidèles à leurs maquettes numériques ;
- orienter la génération de trajectoires vers la recherche de propriétés mécaniques optimales ;
- limiter le recours à des post opérations.

Dans un autre registre, nous avons développé un axe de recherche concernant l'utilisation de matériaux renforcés de fibres continues. Si les résultats obtenus n'ont pas été à la hauteur des objectifs que nous nous étions fixés, ils montrent cependant la marche à suivre pour disposer d'un matériau fonctionnel. Dès lors qu'un tel matériau sera disponible, des stratégies de renforcement seront mises en place.

La troisième étape de la méthodologie propose, quant à elle, une démarche globale sur le choix et le paramétrage d'un moyen de fabrication. Ce raisonnement, absent de la littérature, nous a semblé nécessaire afin de rendre possible la fabrication additive de composants via notamment l'emploi de stratégies de sectionnement non planaires. Si le choix et le paramétrage d'un moyen de fabrication sont une thématique de recherche fortement développée dans le domaine de l'usinage de pièces métalliques, dans le domaine des procédés additifs basés sur l'extrusion de matériaux polymères thermoplastiques fondus, il reste encore des lacunes que ces travaux se proposent de combler.

De plus, nous avons intégré des méthodes numériques à la mise en place des stratégies de fabrication ce qui permet d'adapter les trajectoires de fabrication aux sollicitations que le composant se voit appliquer lors de son service. Si ces travaux n'ont pas la prétention d'apporter à la communauté le développement d'un nouveau modèle numérique, c'est à notre connaissance la première fois que des outils de simulation par éléments finis sont intégrés à une démarche globale de préparation à la fabrication en lien avec le procédé.

Enfin, les nombreux cas d'applications présentés à travers le manuscrit permettent de rendre compte de la pertinence des éléments développés :

- les règles métier introduites dans la méthodologie ont été étayées d'exemples concrets ;
- les démonstrateurs de grandes dimensions se sont vu appliquer les différentes étapes de la méthodologie à la fin de chaque chapitre. Leur fabrication a été réalisée et présentée à la fin du chapitre 4.

Les démonstrateurs de grandes dimensions permettent également de mettre en avant les potentielles applications réalisables avec le procédé.

5.3. PERSPECTIVES

L'aspect générique de la méthodologie, combiné à la multiplicité des problématiques traitées, ouvre la voie à de nombreux axes de développement. Tout d'abord, il est important de noter que la méthodologie doit évoluer dans le temps. Ce qui nous a semblé pertinent lors de ces travaux évoluera et pourra être remplacé par des éléments nouveaux. En cela, les étapes de la méthodologie constituent une structure qui sera amenée à changer afin de rester en phase avec les avancées scientifiques.

En amont de la méthodologie, on pourra implanter une étape relative à la conception pour la fabrication additive adaptée aux procédés basés sur l'extrusion de matériaux polymères fondus. En aval de la méthodologie pourront être ajoutées les étapes de fabrication et de validation du composant :

- l'étape de fabrication intégrera des outils de contrôle en temps réel (contrôle géométrique et thermique) permettant de notifier et de corriger en direct les problématiques liées à la température matière ou des déviations par rapport aux géométries de la maquette numérique ;
- les composants une fois réalisés pourront être l'objet d'une étape de validation dimensionnelle, mécanique et microstructurale. En cas de déviations avec le cahier des charges du composant, on réalisera des rebouclages avec les étapes de préparation à la fabrication.

L'axe de recherche concernant les matériaux renforcés de fibres continues doit être poursuivi : des règles spécifiques à la génération des trajectoires de fabrication doivent être créées, des démonstrateurs réalisés et des essais mécaniques doivent valider l'apport de ces matériaux. Si on les intègre aux stratégies de renforcement, il y a fort à parier que le verrou concernant l'anisotropie des propriétés mécaniques sera résolu. L'utilisation d'outils de simulation thermomécanique pourra être intégrée au paramétrage des stratégies de remplissage, ce qui permettra d'anticiper les déformations du composant sous l'effet des contraintes résiduelles et de mettre en place des stratégies adaptées. Les données thermomécaniques relatives aux matériaux utilisés, pour l'instant absentes de la littérature scientifique, seront alors nécessaires. Nous avons évoqué les stratégies de parachèvement dans le cadre de la méthodologie sans toutefois les traiter complètement. Il faudra les développer de manière à obtenir des composants ayant des surfaces fonctionnelles.

De plus, il faudra approfondir les étapes de simulation par éléments finis introduites lors du paramétrage des stratégies volumiques et de renforcement. En premier lieu, la définition des matériaux utilisés lors des stratégies volumiques devra tenir compte de l'interface entre les couches de matière. La paramétrisation des stratégies de renforcement devra également être développée afin de choisir avec pertinence les paramètres liés à l'épaisseur, au nombre et à l'orientation des couches ainsi qu'au matériau à utiliser.

Pour finir, nous avons identifié un axe de recherche concernant la conception des effecteurs additifs. En effet, nous avons mentionné au sein du chapitre 4 que leurs empreintes avaient un impact sur l'accessibilité aux trajectoires de fabrication, notamment dans le cadre de stratégies de renforcement. Cette problématique nous semble pertinente et sera l'objet de futurs travaux.

LISTE DES REFERENCES

- [1] P. Muller, “Thèse de Doctorat - Fabrication additive de pièces multimatériaux,” 2013.
- [2] PIPAME, “Prospective - Futur de la fabrication additive,” 2017. [Online]. Available: https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions_services/etudes-et-statistiques/prospective/Industrie/2017-Fabrication-additive.pdf.
- [3] J. Norman, “François Willème Invents Photosculpture: Early 3D Imaging,” 2020. <https://www.historyofinformation.com/detail.php?id=3876>.
- [4] J. Gall, “Photo / sculpture : L’invention de François Willème,” *Etudes Photogr.*, vol. 3, p. 12, 2005.
- [5] J. E. Blather, “Manufacture of contour relief maps,” 1892.
- [6] Eric Le Braz, “On a retrouvé les vrais inventeurs de l’imprimante 3D,” *Capital*, 2014. <https://www.capital.fr/economie-politique/on-a-retrouve-les-vrais-inventeurs-de-l-imprimante-3d-912430>.
- [7] C. W. Hull, “Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography,” 1984.
- [8] 3Dnatives, “3D Systems,” 2021. <https://www.3dnatives.com/annuaire-impression-3d/3d-systems/>.
- [9] C. R. Deckard, “Apparatus for producing parts by selective sintering,” 1997.
- [10] A. Pearson, “The history of 3D printing.” <https://www.stratasys.com/explore/article/3d-printing-history>.
- [11] S. Scott Crump, “Apparatus and method for creating three-dimensional objects,” 1989.
- [12] 3Dnatives, “L’impression 3D par liage de poudre, on vous explique tout !,” 2019. <https://www.3dnatives.com/impression-3d-liage-poudre-08062016/>.
- [13] “Material jetting.” <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/material-jetting/>.
- [14] W. Meiners, K. Wissenbach, and A. Gasser, “US Patent 6,215,083 Selective Laser Sintering at Melting Temperature,” vol. 1, no. 12, 2001.
- [15] “About RepRap.” <https://reprap.org/wiki/About>.
- [16] N. Mann, “La France, troisième pays d’Europe à innover dans l’impression 3D,” 2020. <https://www.usinenouvelle.com/editorial/la-france-troisieme-pays-d-europe-a-innover-dans-l-impression-3d.N985019>.
- [17] G. Magistrelli, “Rapport Wohlers 2021 : une croissance constante, les projets européens et les ventes de machines en France,” 2021. <https://www.a3dm-magazine.fr/news/toutes-industries/fa-croissance-malgre-pandemie-rapport-wohlers-2021>.
- [18] A. Moussion, “Infographie : Le marché de l’impression 3D en France en 7 chiffres clefs,” 2020. <http://www.primante3d.com/donnees-francaises-31012020/>.
- [19] “ISO 17296-2:2015 Fabrication additive — Principes généraux — Partie 2: Vue d’ensemble des catégories de procédés et des matières premières,” 2015. <https://www.iso.org/fr/standard/61626.html>.
- [20] G. Pechet, J.-Y. Hascoet, M. Rauch, G. Ruckert, and A.-S. Thorr, “Manufacturing of a hollow propeller blade with WAAM process - from the material characterisation to the achievement,” *Ind. 4.0 – Shap. Futur. Digit. World*, pp. 155–160, 2020, doi: 10.1201/9780367823085-28.
- [21] “Comment baisser la consommation de carburant des avions est devenue une nécessité,” 2020. <https://www.rtl.fr/actu/economie-consommation/comment-baisser-la-consommation-de-carburant-des-avions-est-devenue-une-necessite-7800671695>.
- [22] “Safran et SLM Solutions testent la technologie de fabrication additive SLM® pour la réalisation de caisson d’atterrisseur avant d’avion d’affaires,” 2021. <https://www.safran-landing-systems.com/fr/media/safran-et-slm-solutions-testent-la-technologie-de-fabrication-additive-slmr-pour-la-realisation-de-caisson-datterrisseur-avant-davion-daffaires-20210329>.
- [23] V. Querard, J.-Y. Hascoët, and M. Rauch, “Thèse de doctorat - Réalisation de pièces aéronautiques de grandes dimensions par fabrication additive WAAM,” 2019.
- [24] M. Ronb, “Quel est le rôle de la fabrication additive dans le secteur automobile?,” 2021. <https://www.3dnatives.com/fabrication-additive-automobile-11022021/#!>
- [25] M. Ronb, “La fabrication additive médicale évaluée à \$3,6 milliards en 2026,” 2019. <https://www.3dnatives.com/fabrication-additive-medecale-croissance-30092019/>.

- [26] M. Ronb, “La bio-impression, futur de la médecine sur-mesure ?,” 2019. <https://www.3dnatives.com/bio-impression-18052017/#!>
- [27] G. Magistrelli, “La fabrication additive peut-elle s’imposer dans le secteur du bâtiment ?,” 2018. <https://www.a3dm-magazine.fr/magazine/toutes-industries/fabrication-additive-secteur-batiment-construction>.
- [28] “Comment la fabrication additive accélère l’industrie du futur,” 2018. <https://www.theagilityeffect.com/fr/article/comment-la-fabrication-additive-accelere-lindustrie-du-futur/>.
- [29] T. Bertrand, “L’importance de l’impression 3D dans l’industrie 4.0,” 2021. <https://www.3dnatives.com/impression-3d-industrie-4-0-180220219/>.
- [30] N. Li, Y. Li, and S. Liu, “Rapid prototyping of continuous carbon fiber reinforced polylactic acid composites by 3D printing,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 238, pp. 218–225, 2016, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.07.025.
- [31] W. Zhong, F. Li, Z. Zhang, L. Song, and Z. Li, “Research on rapid-prototyping/part manufacturing (RP&M) for the continuous fiber reinforced composite,” *Mater. Manuf. Process.*, vol. 16, no. 1, pp. 17–26, 2001, doi: 10.1081/AMP-100103694.
- [32] W. C. Lee, C. C. Wei, and S. C. Chung, “Development of a hybrid rapid prototyping system using low-cost fused deposition modeling and five-axis machining,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 214, no. 11, pp. 2366–2374, 2014, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2014.05.004.
- [33] D. Mendis, “‘Clone Wars’ episode II—The next Generation: The copyright implications relating to 3D printing and Computer-Aided Design (CAD) files,” *Law, Innov. Technol.*, vol. 6, no. 2, pp. 265–281, 2014, doi: 10.5235/17579961.6.2.265.
- [34] “Qu’est-ce qu’un Fab Lab ?,” 2017. <http://carrefour-numerique.cite-sciences.fr/wiki/doku.php?id=charte>.
- [35] S. M. F. Kabir, K. Mathur, and A. M. Seyam, “A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites : History , mechanism , materials and properties,” *Compos. Struct.*, vol. 232, no. August 2019, p. 111476, 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111476.
- [36] G. D. Goh, Y. L. Yap, S. Agarwala, and W. Y. Yeong, “Recent Progress in Additive Manufacturing of Fiber Reinforced Polymer Composite,” *Adv. Mater. Technol.*, vol. 4, no. 1, 2019, doi: 10.1002/admt.201800271.
- [37] L. Love, B. Post, V. Kunc, and A. Roschli, “Commercialization of Big Area Additive Manufacturing,” 2020.
- [38] L. J. Love, “Cincinnati Big Area Additive Manufacturing (BAAM) - CRADA N°1 technical report.” [Online]. Available: <https://www.ornl.gov/content/solving-big-problems>.
- [39] L. Love and A. Roschli, “Commercialization of Big Area Additive Manufacturing,” no. March, 2020.
- [40] S. Fathizadan, F. Ju, K. Rowe, A. Fiechter, and N. Hofmann, “A novel real-time thermal analysis and layer time control framework for large-scale additive manufacturing,” *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, vol. 143, no. 1, 2021, doi: 10.1115/1.4048045.
- [41] B. Brenken, E. Barocio, A. Favaloro, V. Kunc, and R. B. Pipes, “Fused filament fabrication of fiber-reinforced polymers: A review,” *Addit. Manuf.*, vol. 21, no. January 2019, pp. 1–16, 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.01.002.
- [42] A. Chang, “New 3D Printer by MarkForged Can Print With Carbon Fiber,” 2014. [Online]. Available: <https://www.popularmechanics.com/technology/gadgets/a10025/new-3d-printer-by-markforged-can-print-with-carbon-fiber-16428727/>.
- [43] R. Matsuzaki *et al.*, “Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation,” *Sci. Rep.*, vol. 6, pp. 4–5, 2016, doi: 10.1038/srep23058.
- [44] P. Hanaphy, “AREVO and Superstrata reveal custom 3D printed unibody carbon fiber e-Bikes,” 2020. <https://3dprintingindustry.com/news/arevo-and-superstrata-reveal-custom-3d-printed-unibody-carbon-fiber-e-bikes-173572/>.
- [45] D. Sher, “WHAM, there’s a new ‘largest 3D printer in the world’ in town,” 2018. <https://www.3dprintingmedia.network/wham-theres-a-new-largest-composite-3d-printer-in-the-world-in-town/>.
- [46] BigRep, “BigRep One.” <https://bigrep.com/fr/bigrep-one/>.
- [47] 3D Printing Industry, “Modix launches extra large MAMA 3D printer, capable of making parts

- up to 5m tall,” 2019. <https://3dprintingindustry.com/news/modix-launches-extra-large-mama-3d-printer-capable-of-making-parts-up-to-5m-tall-164806/>.
- [48] Tobeca, “TOBECA HT - Machine haute température.” <https://www.tobeca.fr/gamme-haute-temperature/>.
- [49] A. Bonne, “Caractérisation de l’effet des composants non structuraux sur les propriétés dynamiques des bâtiments,” 2018.
- [50] V. Kunc, A. A. Hassen, J. Lindahl, S. Kim, and B. Post, “Large scale additively manufactured tooling for Composites,” in *15th Japan international sampe symposium and exhibition*, 2017, no. September, pp. 1–6.
- [51] M. A. Ryan Hahnen, Ben Hoffman, “Additive Manufacturing for Sheet Metal Forming Tools.” <https://ahssinsights.org/forming/additive-manufacturing/additive-manufacturing-for-sheet-metal-forming-tools/>.
- [52] “3D printed tool for building aircraft achieves Guinness World Records title,” 2016, [Online]. Available: <https://www.ornl.gov/news/3d-printed-tool-building-aircraft-achieves-guinness-world-records-title>.
- [53] “Boeing and Thermwood Partnership to Demonstrate New 3D Printing Technology,” 2018. <https://additivemanufacturing.com/2018/10/10/boeing-and-thermwood-partnership-to-demonstrate-new-3d-printing-technology/>.
- [54] L. Love, M. Noakes, B. Post, B. Rhyne, and K. Gaul, “Feasibility of Using Additive Manufacturing to Produce Automotive Tooling,” 2018.
- [55] B. K. Post, P. C. Chesser, and L. J. Love, “Using Big Area Additive Manufacturing to directly manufacture a boat hull mould,” *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 14, no. 2, pp. 123–129, 2019, doi: 10.1080/17452759.2018.1532798.
- [56] T. Boissonneault, “Thermwood and Bell 3D print 20 ft helicopter blade mold using LSAM,” 2019. <https://www.3dprintingmedia.network/thermwood-bell-3d-print-helicopter-mold/>.
- [57] L. J. Love, B. K. Post, A. C. Roschli, P. C. Chesser, and D. E. Hun, “Feasibility of Using BAAM for Mold Inserts for the Precast Concrete Industry,” 2019.
- [58] M. University, “3Dirigo: The World’s Largest 3D Printed Boat,” 2020. <https://composites.umaine.edu/3dirigo-the-worlds-largest-3d-printed-boat/>.
- [59] Benedict, “3D printed submarine built with ORNL’s BAAM 3D printer suggests additive future for Navy,” 2017. <http://www.3ders.org/articles/20170721-3d-printed-submarine-built-with-ornls-baam-3d-printer-suggests-additive-future-for-navy.html>.
- [60] M. Tyson, “Polymaker & XEV Launch First Mass Produced 3D Printed Electric Car,” 2018. <https://www.3dprintingsolutions.com.au/News/Australia/polymaker-xev-launch-mass-produced-3d-printed-electric-car>.
- [61] L. J. Love, “Utility of big area additive manufacturing (baam) for the rapid manufacture of customized electric vehicles,” 2014. doi: 10.1126/science.109.2828.245.
- [62] S. Curran *et al.*, “Big Area Additive Manufacturing and Hardware-in-the-Loop for Rapid Vehicle Powertrain Prototyping: A Case Study on the Development of a 3-D-Printed Shelby Cobra,” 2016. doi: 10.4271/2016-01-0328. Copyright.
- [63] T. Vialva, “AREVO creates 3D Printed carbon fiber Unibody Frames for Emery EBike, partners with Franco Bicycles,” 2019. <https://3dprintingindustry.com/news/arevo-creates-3d-printed-carbon-fiber-unibody-frames-for-emery-ebike-partners-with-franco-bicycles-153301/>.
- [64] H. Mason, “Arevo debuts custom, 3D-printed composite scooter,” 2021. <https://www.compositesworld.com/news/arevo-debuts-custom-3d-printed-composite-scooter>.
- [65] “wyvesurf.” <https://www.wyvesurf.com/>.
- [66] M. Tyson, “Worlds largest single 3D printed pedestrian bridge,” 2019. <https://www.3dprintingsolutions.com.au/News/Australia/worlds-largest-single-3d-printed-pedestrian-bridge>.
- [67] D. Edwards, “‘World’s first 3D printed fiber reinforced polymer footbridge paves way for circular composites’, say designers,” 2020. <https://roboticsandautomationnews.com/2020/07/09/worlds-first-3d-printed-fiber-reinforced-polymer-footbridge-paves-way-for-circular-composites/33903/>.
- [68] J. Um, M. Rauch, and J. Y. Hascoët, “STEP-NC compliant process planning of additive manufacturing: remanufacturing,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 88, no. 5–8, pp. 1215–1230,

- 2017, doi: 10.1007/s00170-016-8791-1.
- [69] P. Dépincé, H. Amara, and J. Y. Hascoët, “Multi-agent environment for process planning elaboration,” *IEEE Int. Conf. Emerg. Technol. Fact. Autom. ETFA*, vol. 2, pp. 783–786, 2001, doi: 10.1109/etfa.2001.997782.
- [70] R. Ahmad, S. Tichadou, and J. Y. Hascoët, “A knowledge-based intelligent decision system for production planning,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 89, no. 5–8, pp. 1717–1729, 2017, doi: 10.1007/s00170-016-9214-z.
- [71] J.-P. Zanin, “Cahier des charges fonctionnel,” in *Techniques de l’ingénieur*, 1997.
- [72] “Mécanique pour l’enseignement technique industriel : Surfaces fonctionnelles et liaisons composées,” .
- [73] R. Ponche, J. Y. Hascoët, O. Kerbrat, and P. Mognol, “A new global approach to design for additive manufacturing,” *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 7, no. 2, pp. 93–105, 2012, doi: 10.1080/17452759.2012.679499.
- [74] F. Laverne, N. Anwer, M. L. E. Coq, and F. Laverne, “Conception pour la fabrication additive : un état de l’art,” 2015.
- [75] R. Ponche, “Méthodologie de conception pour la fabrication additive , application à la projection de poudres,” 2013.
- [76] N. Boyard, “Méthodologie de conception pour la réalisation de pièces en Fabrication Additive,” 2015.
- [77] T. Zegard and G. H. Paulino, “Bridging topology optimization and additive manufacturing,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 53, no. 1, pp. 175–192, 2016, doi: 10.1007/s00158-015-1274-4.
- [78] A. T. Gaynor and J. K. Guest, “Topology optimization for additive manufacturing: Considering maximum overhang constraint,” *AIAA Aviat. 2014 -15th AIAA/ISSMO Multidiscip. Anal. Optim. Conf.*, no. June, pp. 1–8, 2014, doi: 10.2514/6.2014-2036.
- [79] F. L. Yves Bréchet, Michael F. Ashby, Michel Dupeux, “Choix et usage des matériaux,” in *Techniques de l’ingénieur*, 1996.
- [80] Y. Fu, A. Downey, L. Yuan, A. Pratt, and Y. Balogun, “In situ monitoring for fused filament fabrication process: A review,” *Addit. Manuf.*, vol. 38, no. July 2020, p. 101749, 2021, doi: 10.1016/j.addma.2020.101749.
- [81] L. J. L. D. W. Nuttall, A. M. Elliott, B. K. Post, “Surface scanning methods and large-scale FDM printing for the replication of watercraft layup tooling,” 2016, [Online]. Available: <http://utw10945.utweb.utexas.edu/sites/default/files/2016/185-Nuttall.pdf>.
- [82] C. E. Duty *et al.*, “Structure and mechanical behavior of Big Area Additive Manufacturing (BAAM) materials,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 23, no. 1, pp. 181–189, 2017, doi: 10.1108/RPJ-12-2015-0183.
- [83] G. Boutillier, “Fémur,” 2021. <https://www.anatomie-humaine.com/Femur.html>.
- [84] M. Vaezi and S. Yang, “Extrusion-based additive manufacturing of PEEK for biomedical applications,” *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 10, no. 3, pp. 123–135, 2015, doi: 10.1080/17452759.2015.1097053.
- [85] J. L. James I. Novak, Mark Zer-Ern Liu, *Designing Thin 2.5D Parts Optimized for Fused Deposition Modeling*. 2019.
- [86] V. Kandemir, O. Dogan, and U. Yaman, “Topology optimization of 2.5D parts using the SIMP method with a variable thickness approach,” in *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 17, pp. 29–36, doi: 10.1016/j.promfg.2018.10.009.
- [87] J. Jiang, J. Stringer, X. Xu, and R. Y. Zhong, “Investigation of printable threshold overhang angle in extrusion-based additive manufacturing for reducing support waste,” *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 31, no. 10, pp. 961–969, 2018, doi: 10.1080/0951192X.2018.1466398.
- [88] T. Llewellyn-Jones, R. Allen, and R. Trask, “Curved Layer Fused Filament Fabrication Using Automated Toolpath Generation,” *3D Print. Addit. Manuf.*, vol. 3, no. 4, pp. 236–243, 2016, doi: 10.1089/3dp.2016.0033.
- [89] A. Roschli, B. K. Post, and L. J. Love, “Designing for Big Area Additive Manufacturing,” *Addit. Manuf.*, vol. 25, pp. 275–285, 2019, doi: 10.1016/j.addma.2018.11.006.
- [90] M. P. Zwier and W. W. Wits, “Design for Additive Manufacturing: Automated Build Orientation Selection and Optimization,” in *Procedia CIRP*, 2016, vol. 55, pp. 128–133, doi: 10.1016/j.procir.2016.08.040.

- [91] A. S. Nezhad, M. Vatani, F. Barazandeh, and A. Rahimi, "Build time estimator for determining optimal part orientation," in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2010, vol. 224, no. 12, pp. 1905–1913, doi: 10.1243/09544054JEM1913.
- [92] D. S. Ingole, T. R. Deshmukh, A. M. Kuthe, and K. M. Ashtankar, "Build orientation analysis for minimum cost determination in FDM," in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2011, vol. 225, no. 10, pp. 1925–1938, doi: 10.1177/0954405411413694.
- [93] C. Heslouin, V. Perrot-Bernardet, A. Cornier, and N. Perry, "A User Oriented Framework to Support Environmental Performance Indicators Selection," in *Procedia CIRP*, 2017, vol. 61, pp. 709–714, doi: 10.1016/j.procir.2016.11.211.
- [94] P. Mognol, D. Lepicart, and N. Perry, "Rapid prototyping: Energy and environment in the spotlight," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 12, no. 1, pp. 26–34, 2006, doi: 10.1108/13552540610637246.
- [95] B. Kataya, "Modélisation des tolérances géométriques des mécanismes pour leur intégration en conception assistée par ordinateur Bassam Kataya To cite this version : HAL Id : tel-00419316," 2009.
- [96] D. André, *Résistance des matériaux*, no. 8. 2020.
- [97] C. Bellehumeur, L. Li, Q. Sun, and P. Gu, "Modeling of bond formation between polymer filaments in the fused deposition modeling process," *J. Manuf. Process.*, vol. 6, no. 2, pp. 170–178, 2004, doi: 10.1016/S1526-6125(04)70071-7.
- [98] V. Kuznetsov, A. Solonin, O. Urzhumtcev, A. Tavitov, and R. Schilling, "Strength of PLA Components Fabricated with Fused Deposition Technology Using a Desktop 3D Printer as a Function of Geometrical Parameters of the Process," *J. Mater. Sci. Eng.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–7, 2018, doi: 10.20944/preprints201803.0036.v1.
- [99] C. Duty, J. Failla, S. Kim, T. Smith, J. Lindahl, and V. Kunc, "Z-Pinning approach for 3D printing mechanically isotropic materials," *Addit. Manuf.*, vol. 27, no. March, pp. 175–184, 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.03.007.
- [100] P. G. De Gennes, "Reptation of a polymer chain in the presence of fixed obstacles," *J. Chem. Phys.*, vol. 55, no. 2, pp. 572–579, 1971, doi: 10.1063/1.1675789.
- [101] C. T. Bellehumeur, M. K. Bisaria, and J. Vlachopoulos, "An experimental study and model assessment of polymer sintering," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 36, no. 17, pp. 2198–2207, 1996, doi: 10.1002/pen.10617.
- [102] Q. Sun, G. M. Rizvi, C. T. Bellehumeur, and P. Gu, "Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 14, no. 2, pp. 72–80, 2008, doi: 10.1108/13552540810862028.
- [103] L. Li, A. Haghghi, and Y. Yang, "A novel 6-axis hybrid additive-subtractive manufacturing process: Design and case studies," *J. Manuf. Process.*, vol. 33, no. March, pp. 150–160, 2018, doi: 10.1016/j.jmapro.2018.05.008.
- [104] PR-CUBE, "GT-001 Règles de conception et résolutions dimensionnelles pour les pièces imprimées en 3D," 2019. [Online]. Available: www.pr-cube.com.
- [105] G. Sossou, F. Demoly, G. Montavon, and S. Gomes, "An additive manufacturing oriented design approach to mechanical assemblies," *J. Comput. Des. Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 3–18, 2018, doi: 10.1016/j.jcde.2017.11.005.
- [106] PR-CUBE, "Tolérances applicables aux pièces moulées en plastiques et aux pièces fabriquées par impression 3D (Norme NFT 58-000)," 2019.
- [107] M. R. Talagani, S. Dormohammadi, R. Dutton, C. Godines, H. Baid, and F. Abdi, "Numerical Simulation of Big Area Additive Manufacturing (3D Printing) of a Full Size Car," *SAMPE J.*, vol. 51, no. July, pp. 27–36, 2015.
- [108] M. Borish *et al.*, "In-situ thermal imaging for single layer build time alteration in large-scale polymer additive manufacturing," *Procedia Manuf.*, vol. 34, pp. 482–488, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.06.202.
- [109] Y. K. Bandari, Y. S. Lee, P. Nandwana, B. S. Richardson, A. I. Adediran, and L. J. Love, "Effect of inter-layer cooling time on distortion and mechanical properties in metal additive manufacturing," *Solid Free. Fabr. 2018 Proc. 29th Annu. Int. Solid Free. Fabr. Symp. - An Addit.*

- Manuf. Conf. SFF 2018*, no. Lmd, pp. 425–437, 2020.
- [110] V. Kishore *et al.*, “Infrared preheating to improve interlayer strength of big area additive manufacturing (BAAM) components,” *Addit. Manuf.*, vol. 14, pp. 7–12, 2017, doi: 10.1016/j.addma.2016.11.008.
- [111] A. Barasinski, A. Leygue, E. Soccarrd, and A. Poitou, “In situ consolidation for thermoplastic tape placement process is not obvious,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1353, pp. 948–953, 2011, doi: 10.1063/1.3589638.
- [112] A. Leon, A. Barasinski, E. Nadal, and F. Chinesta, “High-resolution thermal analysis at thermoplastic pre-impregnated composite interfaces,” *Compos. Interfaces*, vol. 22, no. 8, pp. 767–777, 2015, doi: 10.1080/09276440.2015.1060734.
- [113] S. Shaffer, K. Yang, J. Vargas, M. A. Di Prima, and W. Voit, “On reducing anisotropy in 3D printed polymers via ionizing radiation,” *Polymer (Guildf.)*, vol. 55, no. 23, pp. 5969–5979, 2014, doi: 10.1016/j.polymer.2014.07.054.
- [114] B. Hu *et al.*, “Improved design of fused deposition modeling equipment for 3D printing of high-performance PEEK parts,” *Mech. Mater.*, vol. 137, no. August, p. 103139, 2019, doi: 10.1016/j.mechmat.2019.103139.
- [115] A. J. Hardikkumar Prajapati, Swapnil S. Salvi, Darshan Ravoori, Momen Qasaimeh, Ashfaq Adnan, “Improved print quality in fused filament fabrication through localized dispensing of hot air around the deposited filament,” *Addit. Manuf.*, vol. 40, no. 101917, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101917>.
- [116] P. Geng *et al.*, “Effect of thermal processing and heat treatment condition on 3D printing PPS properties,” *Polymers (Basel)*, vol. 10, no. 8, 2018, doi: 10.3390/polym10080875.
- [117] R. B. Dinwiddie, L. J. Love, and J. C. Rowe, “Real-time process monitoring and temperature mapping of a 3D polymer printing process,” *Thermosense Therm. Infrared Appl. XXXV*, vol. 8705, p. 87050L, 2013, doi: 10.1117/12.1518454.
- [118] I. S. P. d’Alençon-E. (ISPA), “Méthodes d’assemblage de thermoplastiques renforcés fibres courtes ou longues : Technologies de collage et de soudage,” 2014. [Online]. Available: https://www.nae.fr/wp-content/uploads/2018/04/EB_Assemblage_TP.pdf%0A%0A.
- [119] M. Hsueh, C. Lai, K. Liu, C. Chung, and S. Wang, “Effects of Printing Temperature and Filling Percentage on the Mechanical Behavior of Fused Deposition Molding Technology Components for 3D Printing,” *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 2910, 2021.
- [120] M. Fernandez-Vicente, W. Calle, S. Ferrandiz, and A. Conejero, “Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing,” *3D Print. Addit. Manuf.*, vol. 3, no. 3, pp. 183–192, 2016, doi: 10.1089/3dp.2015.0036.
- [121] S. Korga, M. Barszcz, and L. Zgryza, “The effect of the 3D printout filling parameter on the impact strength of elements made with the FDM method,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 710, no. 1, doi: 10.1088/1757-899X/710/1/012027.
- [122] J. C. Parra Mena, E. R. Gallardo Vizuete, and E. D. Torres Peñaloza, “Effect of the filling percentage on tensile strength in 3D desktop printing for different printing patterns, using a randomized design of experiments,” *Enfoque UTE*, vol. 10, no. 4, pp. 13–27, 2019, doi: 10.29019/enfoque.v10n4.503.
- [123] C. Duty *et al.*, “Reducing mechanical anisotropy in extrusion-based printed parts,” *Solid Free. Fabr. 2017 Proc. 28th Annu. Int. Solid Free. Fabr. Symp. - An Addit. Manuf. Conf. SFF 2017*, no. Figure 1, pp. 1602–1611, 2020.
- [124] S. A. Hinchcliffe, K. M. Hess, and W. V. Srubar, “Experimental and theoretical investigation of prestressed natural fiber-reinforced polylactic acid (PLA) composite materials,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 95, pp. 346–354, 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.03.089.
- [125] C. Y. Liaw, J. W. Tolbert, L. W. Chow, and M. Guvendiren, “Interlayer bonding strength of 3D printed PEEK specimens,” *Soft Matter*, vol. 17, no. 18, pp. 4775–4789, 2021, doi: 10.1039/d1sm00417d.
- [126] Shimadzu, “Tensile Test Methods for Plastics: ASTM D638 - Specs.” <https://www.shimadzu.com/an/products/materials-testing/uni-ttm-system/tensile-test-methods-for-plastics-astm-d638/spec.html>.
- [127] Markforged, “Composite material datasheet.” pp. 0–1, 2021.
- [128] P. W. Danning Zhang, Natalie Rudolph, “Reliable Optimized Structures with High Performance

- Continuous Fiber Thermoplastic Composites from Additive Manufacturing (AM),” 2019.
- [129] R. Matsuzaki *et al.*, “Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation,” *Sci. Rep.*, vol. 6, no. December 2015, pp. 1–7, 2016, doi: 10.1038/srep23058.
- [130] X. Tian, T. Liu, C. Yang, Q. Wang, and D. Li, “Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 88, pp. 198–205, 2016, doi: 10.1016/j.compositesa.2016.05.032.
- [131] R. Omuro, M. Ueda, R. Matsuzaki, A. Todoroki, and Y. Hirano, “Three-dimensional printing of continuous carbon fiber reinforced thermoplastics by in-nozzle impregnation with compaction roller,” *ICCM Int. Conf. Compos. Mater.*, vol. 2017-Augus, no. August, pp. 20–25, 2017.
- [132] H. Prüß and T. Vietor, “Design for Fiber-Reinforced Additive Manufacturing,” *J. Mech. Des.*, vol. 137, no. 11, p. 111409, 2015, doi: 10.1115/1.4030993.
- [133] C. Yang, X. Tian, T. Liu, Y. Cao, and D. Li, “3D printing for continuous fiber reinforced thermoplastic composites: Mechanism and performance,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 23, no. 1, pp. 209–215, 2017, doi: 10.1108/RPJ-08-2015-0098.
- [134] F. Baumann, J. Scholz, and J. Fleischer, “Investigation of a New Approach for Additively Manufactured Continuous Fiber-reinforced Polymers,” in *Procedia CIRP*, 2017, vol. 66, pp. 323–328, doi: 10.1016/j.procir.2017.03.276.
- [135] T. Wang *et al.*, “Load-dependent path planning method for 3D printing of continuous fiber reinforced plastics,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 140. 2021, doi: 10.1016/j.compositesa.2020.106181.
- [136] F. Wang, G. Wang, F. Ning, and Z. Zhang, “Fiber–matrix impregnation behavior during additive manufacturing of continuous carbon fiber reinforced polylactic acid composites,” *Additive Manufacturing*, vol. 37. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2020.101661.
- [137] W. de Backer, M. J. L. van Tooren, and A. P. Bergs, “Multi-axis multi-material fused filament fabrication with continuous fiber reinforcement,” *AIAA/ASCE/AHS/ASC Struct. Struct. Dyn. Mater. Conf. 2018*, no. 210049, 2018, doi: 10.2514/6.2018-0091.
- [138] Toglefritz, “Why a Consistent Diameter is Important for 3D Printer Filament,” 2019. <https://toglefritz.com/why-a-consistent-diameter-is-important-for-3d-printer-filament/>.
- [139] P. 3D Filament, “Filament Tolerances,” 2014. <https://precision3dfilament.com/blogs/news/15202543-filament-tolerances>.
- [140] M. Eichenhofer, J. C. H. Wong, and P. Ermanni, “Experimental investigation of processing parameters on porosity in continuous lattice fabrication,” *ICCM Int. Conf. Compos. Mater.*, vol. 2017-Augus, no. August, pp. 20–25, 2017.
- [141] S. L. Hafsaoui and E. M. Polytechnique, “Etude et modélisation de la stabilité thermique et des propriétés des polyamides au cours du rotomoulage,” 2016.
- [142] P. C. Chesser, R. F. Lind, B. K. Post, A. Roschli, L. J. Love, and K. T. Gaul, “Using post-tensioning in large scale additive parts for load bearing structures,” *Solid Free. Fabr. 2018 Proc. 29th Annu. Int. Solid Free. Fabr. Symp. - An Addit. Manuf. Conf. SFF 2018*, pp. 556–567, 2020.
- [143] L. Grandguillaume, S. Lavernhe, and C. Tournier, “Optimal tool orientation in 3 + 2-axis machining considering machine kinematics,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 115, no. 9–10, pp. 2765–2783, 2021, doi: 10.1007/s00170-021-07036-z.
- [144] B. Jousselin, Y. Quinsat, and C. Tournier, “A 5-axis pocket roughing strategy reducing the remaining material volume,” in *Procedia CIRP*, 2019, vol. 82, pp. 368–373, doi: 10.1016/j.procir.2019.04.146.
- [145] J. Baptiste, Q. Yann, and C. Tournier, “Méthodologie pour la Génération d’opérations d’ébauche 5 axes,” in *MUGV & Manufacturing’21*, 2018, p. 11.
- [146] C. Chaabani, “Composites à fibres de carbone : récupération des fibres,” 2018.
- [147] Y. P. Shaik, J. Schuster, and A. Shaik, “A Scientific Review on Various Pellet Extruders Used In 3D Printing FDM Processes,” *OALib*, vol. 08, no. 08, pp. 1–19, 2021, doi: 10.4236/oalib.1107698.
- [148] F. Knoop and V. Schoeppner, “Geometrical accuracy of holes and cylinders manufactured with fused deposition modeling,” *Solid Free. Fabr. 2017 Proc. 28th Annu. Int. Solid Free. Fabr. Symp. - An Addit. Manuf. Conf. SFF 2017*, pp. 2757–2776, 2020.
- [149] Filament2print, “Quel diamètre de filament est meilleur: 1.75 mm ou 3 mm?,” 2021. https://filament2print.com/fr/blog/31_difference-filament-175mm-3mm.html.

- [150] Makershop, “Bobine filament XL.” <https://www.makershop.fr/534-bobine-filament-xl#/page-2>.
- [151] Markforged, “How Wärtsilä Created the First CE-Certified Lifting Tool,” 2018.
- [152] Markforged, “End-Use Product : 3D Printed 7-Axis Robotic Arm Dexter,” 2020.
- [153] M. Ronb, “AREVO commercialise son premier cadre de vélo électrique imprimé en 3D,” 2019. <https://www.3dnatives.com/cadre-de-velo-imprime-en-3d-110420193/>.
- [154] E. 3D, “L’achat d’une imprimante 3D est-il rentable face aux services d’impression ?,” 2015. <https://www.makershop.fr/blog/rentabilite-imprimante-3d-rentable-service-impression/>.
- [155] Makershop, “Filament Onyx Markforged 800cm3,” 2021. <https://www.makershop.fr/markforged/1586-markforged-filament-onyx.html>.
- [156] “Meet Typhoon™ Extruder.” <https://dyzedesign.com/typhoon-extruder/>.
- [157] C. Incorporated, “MAAM (Medium Area Additive Manufacturing),” 2021. <https://www.e-ci.com/maam>.
- [158] M. Taufik and P. K. Jain, “A study of build edge profile for prediction of surface roughness in fused deposition modeling,” *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, vol. 138, no. 6, pp. 1–11, 2016, doi: 10.1115/1.4032193.
- [159] B. K. Post, R. F. Lind, P. D. Lloyd, V. Kunc, J. M. Linhal, and L. J. Love, “The economics of big area additive manufacturing,” in *Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2016*, 2016, pp. 1176–1182.
- [160] P. Chesser, B. K. Post, R. Lind, P. Lloyd, and L. J. Love, “Changing print resolution on BAAM via selectable nozzles,” *Solid Free. Fabr. 2017 Proc. 28th Annu. Int. Solid Free. Fabr. Symp. - An Addit. Manuf. Conf. SFF 2017*, pp. 1684–1695, 2020.
- [161] Benoît Jellimann, *L’impression 3D DFM - Le guide complet pour vos impressions 3D*. 2020.
- [162] J.-R. Fontaine et al., *Atelier de plasturgie*, vol. 21. 2013.
- [163] J.-P. Cordebois and M. Colombié, *Fabrication par usinage*. 2013.
- [164] C. Incorporated, “Medium Area Additive Manufacturing.” <https://www.e-ci.com/maam>.
- [165] S. I. AG, “Staubli TX Family 90 Series Instruction Manual,” 2018.
- [166] “COSINE - The AM1.” <https://www.cosineadditive.com/en/am1>.
- [167] T. Boissonneault, “15-meter-long 3D printed footbridge opens in Shanghai,” 2019. <https://www.3dprintingmedia.network/3d-printed-footbridge-shanghai/>.
- [168] R. M. G. Gokberk Serin, Hakki Ozgur Unver, “Design and fabrication of large-size fff 3d printer,” in *18th International conference on machine design and production*, 2018, no. July.
- [169] Thornsberry, “PEEK 3D Printing,” 2018. <https://3space.com/blog/peek-3d-printing/>.
- [170] S. L. Rida T.Faroukia, Chang Yong Han, “Inverse kinematics for optimal tool orientation control in 5-axis CNC machining,” *Comput. Aided Geom. Des.*, vol. 31, no. 1, pp. 13–26, 2014, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016783961300099X>.
- [171] S. M. Le Van Dang, K. Vacharanukul, “Compact radial zigzag for five-axis machining of STL surfaces,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 105, no. 5–6, pp. 1–30, 2019.
- [172] X. Pessoles, “Aide au choix du posage en usinage 5 axes continus par la modélisation du comportement cinématique des machines - outils,” 2010.
- [173] S. Robotique, “Le guide de la robotique,” 2020.
- [174] M. Oueslati, “Contribution à la modélisation dynamique , l’identification et la synthèse de lois de commande adaptées aux axes flexibles d’un robot industriel,” 2013.
- [175] I. Bonev, “What are Singularities in a Six-Axis Robot Arm?,” 2019. <https://www.mecademic.com/en/what-are-singularities-in-a-six-axis-robot-arm>.
- [176] P. Wenger, “Cuspidal and noncuspidal robot manipulators,” *Robotica*, vol. 25, no. 6, pp. 677–689, 2007, doi: 10.1017/S0263574707003761.
- [177] P. F. Yuan, H. Meng, L. Yu, and L. Zhang, “Robotic Multi-dimensional Printing Based on Structural Performance,” *Robot. Fabr. Archit. Art Des. 2016*, 2016, doi: 10.1007/978-3-319-26378-6.
- [178] “L’IMT Lille Douai présente Lascala,” 2019. <https://www.plastiques-caoutchoucs.com/L-IMT-Lille-Douai-presente-Lascala.html>.
- [179] “Drawn.” <https://www.drawn.fr/>.
- [180] S. J. Grunewald, “Arevo Labs Takes 3D Printing 3D with New 6-Axis Composite Part Additive Manufacturing Platform,” 2015. <https://3dprint.com/105787/arevo-labs-6-axis-ram-platform/>.

- [181] T. Klebe, “IMTS Show Highlights: Robotic Composite 3D Demonstrator,” 2017. <https://blog.trimech.com/international-manufacturing-technology-show-imts-robotic-composite-3d-demonstrator>.
- [182] Filimprimante3d, “Extrusion directe et Bowden, les deux types d’alimentation des imprimantes 3D.” <https://www.filimprimante3d.fr/content/88-extrusion-directe-et-bowden-les-deux-types-d-alimentation-de-l-imprimante-3d>.
- [183] Z. Wang, R. Liu, T. Sparks, and F. Liou, “Large-scale deposition system by an Industrial Robot (I): Design of fused pellet modeling system and extrusion process analysis,” *3D Print. Addit. Manuf.*, vol. 3, no. 1, pp. 39–47, 2016, doi: 10.1089/3dp.2015.0029.
- [184] C. Kitchen, “HOW MUCH abrasive filaments damage your nozzle!,” 2019. <https://www.youtube.com/watch?v=uvlMeTnjriQ>.
- [185] “The Olsson Ruby ONE NOZZLE FOR ALL MATERIALS.” <https://olssonruby.com/the-olsson-ruby/>.
- [186] Arduino, “Arduino Mega 2560 Rev3.” <https://store.arduino.cc/arduino-mega-2560-rev3>.
- [187] RepRap, “RAMPS 1.4.” https://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4.
- [188] E3D-ONLINE, “Titan Extruder.” <https://e3d-online.com/products/titan-extruder#>.
- [189] RepRap, “Moteur pas à pas NEMA 17 48mm.” <https://www.reprap-france.com/produit/312-moteur-pas-a-pas-nema-17-48mm>.
- [190] B. Josiah, “Which Layer Height is Best for 3D Printing?,” 2021. <https://printin3d.com/which-layer-height-is-best-for-3d-printing/>.

Titre : Méthodologie de préparation à la fabrication additive de composants de grandes dimensions à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus

Mots clés : fabrication additive, méthodologie de préparation à la fabrication, extrusion de polymères fondus, trajectoires de fabrication, bras robotisés 6-axes

Résumé : La fabrication additive de composants de grandes dimensions à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus connaît depuis les années 2010 un essor important, l'arrivée de matériaux innovants ayant permis de réaliser un bond en avant en termes de propriétés mécaniques intrinsèques. La réalisation de démonstrateurs de grandes dimensions, développés au sein de la littérature scientifique, a mis en lumière la pertinence de ce procédé pour la réalisation d'applications structurelles (équipements sportifs, ponts pédestres) et non structurelles (moules et outillages de grandes dimensions). En effet, les avantages de ce procédé sont nombreux, comme par exemple la fabrication de composants personnalisés ou la réduction des coûts et des délais d'obtention. Cependant, ressortent de l'analyse de l'état de l'art des verrous scientifiques relatifs à la fabrication de ces démonstrateurs de grandes dimensions :

- la façon de procéder, de type « essais - erreurs - corrections », est coûteuse en temps, en ressources et en argent. Il n'existe pas de consensus concernant une méthode générique qui permette de réaliser des composants de grandes dimensions ;
- des problématiques concernant la génération des trajectoires de fabrication

en vue de respecter un cahier des charges et le choix d'un moyen de fabrication adapté doivent être résolues.

Dans le cadre de ce manuscrit est développée une méthodologie de préparation à la fabrication de composants de grandes dimensions réalisés à partir de matériaux polymères thermoplastiques fondus. Elle propose une préparation à la fabrication générique, basée sur un ensemble de règles métier intégrant la prise en compte des problématiques précédemment mentionnées. Les étapes de la méthodologie sont traitées de manière chronologique au sein des chapitres dans lesquels les problématiques spécifiques et les solutions mises en place pour les résoudre sont explicitées. Un axe de recherche consacré au renforcement des composants à partir de matériaux renforcés de fibres continues afin de pallier la problématique d'anisotropie des propriétés mécaniques, inhérente aux procédés additifs basés sur l'extrusion de polymères fondus, est notamment développé. Pour finir, la réalisation de démonstrateurs de grandes dimensions permet de mettre en lumière la pertinence des éléments présentés au sein de la méthodologie mais aussi les perspectives pouvant lui être apportées.

Title: A generic methodology for large-sized thermoplastic polymer parts in additive manufacturing

Keywords: Additive manufacturing; manufacturing methodology; fused polymer extrusion; multi axis toolpaths; 6-axis robot

Abstract: Large-sized additively manufactured components made of thermoplastic polymer materials has experienced significant growth since the 2010s, the arrival of innovative materials having made possible to achieve a leap forward in terms of intrinsic mechanical properties. Large-scale demonstrators manufacturing, developed within the scientific literature, has highlighted the relevance of this process for the realization of structural (sports equipments, pedestrian bridges) and non-structural (large-dimension molds and tools) applications. Indeed, the advantages of this process are numerous, such as for example personalized components manufacturing or costs and lead times reduction. However, large-scale demonstrators manufacturing scientific obstacles resulting from state-of-the-art analysis emerges:

- "trial - error - correction" procedure is costly in time, resources and money. There is no consensus on a generic method that allows large components manufacturing preparation;

- issues concerning toolpaths generation in order to comply with specifications and the choice of a suitable manufacturing means must be resolved.

Within the framework of this manuscript is developed a preparation methodology for large-sized components manufacturing made from fused thermoplastic polymer materials. It offers preparation for generic manufacturing, based on a set of process specific rules integrating the consideration of the previously mentioned issues. The steps of the methodology are processed chronologically in each chapter of the manuscript in which the specific issues and the solutions put in place to resolve them are explained. A research axis dedicated to components reinforcement from continuous fibers reinforced materials in order to overcome mechanical properties anisotropy, inherent in additive processes based on fused thermoplastic polymer materials is notably developed. Finally, large-scale demonstrators manufacturing makes it possible to highlight the methodology relevance but also the perspectives that can be brought to it.