Méthodologie de conception pour la réalisation de pièces en Fabrication Additive

Nicolas Boyard

▶ **To cite this version:**

Nicolas Boyard. Méthodologie de conception pour la réalisation de pièces en Fabrication Additive. Génie mécanique [physics.class-ph]. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2015. Français. NNT : 2015ENAM0015 . tel-01176962

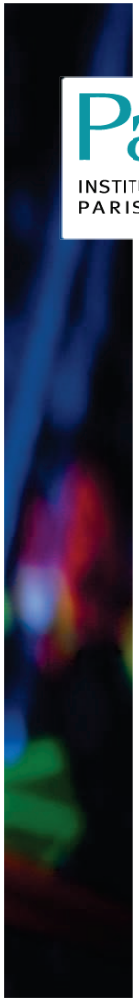
HAL Id: tel-01176962

https://pastel.hal.science/tel-01176962

Submitted on 16 Jul 2015

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.



ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

ARTS ET MÉTIERS ParisTech

2015-ENAM-0015

École doctorale n° 432 : Science des Métiers de l'ingénieur

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité " Génie mécanique - procédés de fabrication "

présentée et soutenue publiquement par

Nicolas BOYARD

le 29 juin 2015

Méthodologie de conception pour la réalisation de pièces en Fabrication Additive

Directeur de thèse : **Simon RICHIR**

Co-encadrement de la thèse : **Olivier Christmann et Mickaël RIvette**

Jury

M. Emmanuel Caillaud, Professeur des Universités, Laboratoire ICUBE, Université de Strasbourg	Président
M. Pascal Mognol, Professeur des Universités, ENS Rennes	Rapporteur
M. François Villeneuve, Professeur des Universités, G-Scop, Université Joseph Fourier	Rapporteur
M. Simon Richir, Professeur des Universités, LAMPA, Arts et Métiers ParisTech	Examinateur
M. Olivier Christmann, Maître de Conférences, LAMPA, Arts et Métiers ParisTech	Examinateur
M. Mickaël Rivette, Maître de Conférences, LCFC, Arts et Métiers ParisTech	Examinateur
M. Olivier Kerbrat, Maître de Conférences, ENS Rennes	Invité

T H È S E

Arts et Métiers ParisTech - Centre de Xxxx
Nom de l'Unité de recherche

Remerciements

Si le travail réalisé à l'issue des trois années de thèse m'est propre, les résultats que j'ai pu obtenir l'ont été grâce au soutien et à la participation de beaucoup de personnes, que ce soit de mon entourage proche ou dans la sphère professionnelle.

Je tiens donc à remercier chaleureusement mes parents, Michèle et Pascal, pour m'avoir soutenu depuis que j'ai mis le pied dans ma première salle de cours et de m'avoir permis de pousser mes études aussi loin que possible. J'ajoute également ma sœur, Charlotte, qui, avec mes parents, ont montré une curiosité continue à l'intention des mes travaux et grâce à qui j'ai pu développer à la fois un discours technique et en même temps vulgarisé. J'ajoute un grand merci pour les WE de détente à la maison, à profiter de l'air pur et du bord de mer, avant de reprendre les travaux el lundi matin.

Je remercie très chaleureusement Carolyn, qui se reconnaitra, pour m'avoir supporté au quotidien durant mes deux dernières années de thèse et pour m'avoir apporté son soutien et son réconfort lors de la phase de rédaction via une multitude de petites attentions. Un petit ou un carré de chocolat à minuit passé, ça fait toujours très plaisir. Maintenant que la part la plus importante des travaux a été réalisée, j'espère passer plus de temps à concrétiser toutes les promesses faites durant ces trois années.

A mi-chemin entre les sphères personnelle et professionnelle, je tiens à remercier Mickaël et Olivier. Mickaël tout d'abord, car c'est en partie grâce à lui que j'ai pu amorcer mes travaux de recherche via mon stage de fin d'études à l'Ecole Polytechnique Montréal où j'ai reçu un accueil chaleureux et rencontré un formidable encadrant. En effet, la grande confiance qui m'a été donnée durant ce stage m'a permis d'évoluer librement suivant mes points d'intérêt, mais toujours avec un encadrement pertinent pour affiner mes travaux. J'ai retrouvé le même encadrant et les même méthodes de travail durant ma thèse ce qui m'a permis de satisfaire ma curiosité et mes envies d'expérimentation tout en menant un travail de qualité. Si je devrait faire une seconde thèse sous la direction de Mickaël, ce serait avec plaisir.

Olivier également car il a su se montrer très patient et à mon écoute durant ma thèse. Nos thématiques de recherches étant assez éloignées au lancement de la thèse, Olivier m'a cependant toujours donné son appui pour la rédaction d'articles et le traitement des données scientifiques. Grâce à lui, j'ai beaucoup appris sur la compilation des information et, le temps passant, j'ai également pu avoir un second interlocuteur aux conseils pertinents pour le domaine de la fabrication additive. Je remercie également Olivier pour tous les bons moments passés durant la thèse, du covoiturage pour se rendre aux séminaire au soutien psychologique lors des nuits blanche à fabriquer des éprouvette en passant par les passages à l'Atoll.

La fin de la thèse me fait quitter le statut de doctorant, mais j'espère continuer à publier à leurs côtés.

Sur le plan professionnel, je remercie également toutes les personnes du laboratoire qui m'ont accompagné durant ces trois années et demi : Emilie, Franck et Pierrick, ex-doctorant et désormais docteur, qui m'ont révélé de nombreux aspects du domaine de la recherche à travers leurs conseils, leurs thèses, leurs soutenance, Rémy, qui est un peu mon co-doctorant de durée de contrat, et qui apporte une touche piquante au quotidien

et qui, je l'espère, réussira également très prochainement, Rose-Lys, l'assistante de direction de l'équipe, pour son éternelle et inconditionnelle bonne humeur et pour tous les petits services rendu le long de ma thèse et enfin, Simon, mon directeur de thèse; qui 'a accueilli dans son laboratoire et qui m'a offert un cadre de travail assez exceptionnel.

Je remercie grandement mon jury de thèse, Mrs. Caillaud, Kerbrat, Mognol et Villeneuve, qui sont des experts dans le domaine de la Conception de pièce et de la Fabrication additive, pour avoir pris le temps de lire mon manuscrit, pour l'avoir commenté et pour être venu évaluer ma soutenance de thèse. Je prends note de tous les retours constructifs dont ils m'ont fait part et qui me serviront dans les années à venir.

Je remercie également mes ami(e)s pour avoir su se montrer très patient de mon long silence radio durant les mois de rédaction de mon manuscrit. Je remercie tout particulièrement Céline Heuzé, docteur, et Isabelle Baconnais, doctorante, pour tous les mails et les cartes postales envoyés du bout du monde ainsi que pour tous les conseils et encouragements.

Je remercie également chaleureusement le club nantais 6-trouille qui m'a apporté un soutien psychologique durant les premiers mois de thèses assez solitaires sur la petite ville de Laval.

Enfin, je remercie pour leur patience toutes les personnes qui auraient souhaité voir terminées les repartions de ma coccinelle avant que ma thèse ne s'achève.

Résumé

Le but de cette thèse est de proposer une méthodologie de conception pour la réalisation de pièces en fabrication additive (FA). Par rapport aux familles de procédés de fabrication standard que sont l'enlèvement de matière, la déformation plastique et la fusion, les procédés de FA présentent des caractéristiques nouvelles permettant la fabrication de pièces en multimatériaux, d'assemblages indémontables ou encore de formes complexes. L'arrivée de cette nouvelle technologie implique un changement de paradigme nécessitant l'accompagnement des concepteurs dans leurs missions de développement de produits de qualité. De plus les caractéristiques mécaniques et l'état de surfaces des pièces obtenues en FA dépendent de leur orientation au moment de la réalisation. Par ailleurs, en fonction du procédé, de la géométrie souhaitée et de cette orientation, il peut être nécessaire d'intégrer du support afin d'assurer la fabricabilité de la pièce.

Nous avons donc défini une méthodologie de conception, qui respecte l'intégrité de la chaine numérique et dont la finalité est la production d'un modèle numérique tranché prêt à être fabriqué sur une machine de FA. Pour ceci, notre méthodologie se base sur les données du cahier des charges fonctionnel (CDCF) et les connaissances métier du procédé renseignées par le concepteur afin de lui proposer automatiquement un premier solide dont la géométrie satisfait toutes ces contraintes. Une étape d'optimisation topologique vient ensuite restreindre le volume de matière utile de la pièce afin de limiter son poids, son coût et le temps de fabrication. Enfin, si nécessaire, un support optimisé assurant la fabricabilité de la pièce est généré selon ces mêmes critères.

Cette méthodologie s'accompagne d'un cas d'étude industriel ainsi que de deux expérimentations visant à observer la possibilité d'un parachèvement à l'acétone sur des pièces réalisée en ABS. La première expérimentation est un plan d'expérience mesurant l'état de surface obtenu en s'appuyant sur la température de l'acétone, le temps d'opération, l'inclinaison des surfaces de la pièce et son épaisseur. La seconde expérimentation est un test de traction visant à observer une modification de la tenue mécanique de pièces soumises à ce traitement.

Indépendamment du type de machine et du procédé de FA, la méthodologie que nous proposons est un premier pas concret vers l'obtention de pièces directement conformes, que ce soit pour des besoins industriels ou domestiques.

Mots-clés : méthodologie de conception, fabrication additive, fabrication rapide, support, CAO

The aim of this thesis is to propose a design methodology to produce parts using additive manufacturing (AM). Compared to standard manufacturing processes, as machining, forming, casting or molding, AM processes have new features for manufacturing multi-material parts, nondetachable assemblies or complex shapes. The arrival of this new technology involves a paradigm shift that requires support to designers to develop quality products. Also the mechanical and finishing specifications of the parts obtained by AM depend on their orientation during the manufacturing. Furthermore, depending on the process, the desired geometry and the orientation, it could be necessary to integrate a support in order to ensure manufacturability of the part.

We define a design methodology that respects the integrity of the digital channel and whose purpose is to produce a sliced numerical model ready to be manufactured on an AM machine. For this, our methodology is based on data from functional specification and business knowledge of the process indicated by the designer, to automatically propose a first solid geometry which satisfies all these requirements. After this first step, a step of topological optimization restricts the volume of the part in order to reduce its weight, cost and manufacturing time. Finally, if necessary, optimized support ensuring the manufacturability of the part is generated according to the same criteria.

This methodology is accompanied by an industrial case study as well as of two experiments to observe the possibility to finish parts made of ABS with acetone. The first experiment is an experimental design which measures the obtained surface finish based on the temperature of the acetone, the operating time, the inclination of the surfaces of the piece and its thickness. The second experiment is a tensile stress test designed to observe a change in the mechanical resistance of the part.

Regardless of the type of machine and the AM process, the methodology we propose is a first concrete step towards obtaining directly compliant parts, whether for industrial or domestic use.

Keywords : design methodology, additive manufacturing, rapid manufacturing, support, CAD

Glossaire

ABS : polymère thermoplastique (Acrylonitrile Butadiène Styrène) le plus couramment utilisé dans les procédés FDM.

Angle minimum de support α : il s'agit de l'inclinaison maximale que peut accepter la matière, lors du dépôt de fil, au dessus du vide. Au delà de cet angle, il est nécessaire d'apporter du support pour éviter un effondrement.

Assemblage indémontable : nous qualifierons d'assemblage indémontable tout ensemble de pièces mobiles les unes par rapport aux autres réalisées durant une même phase de fabrication additive qui, après fabrication, ne peuvent être démontées : liaison rotule, chaine, roulement à bille,...

CAO : Conception Assistée par Ordinateur

DFA : conception pour l'assemblage

DFM : conception pour la fabrication

DFX : conception pour l'X, X pouvant s'apparenter à l'assemblage, la fabrication, le recyclage,...

FA : acronyme pour la Fabrication Additive. Ce procédé de fabrication permet de réaliser des pièces couche par couche par addition de matière.

MMT : machine de mesure tridimensionnelle

PLA : polymère thermoplastique (Acide PolyLactique)

SDK : Software Development Kit. Il 'agit d'un outil logiciel permettant de réaliser ses propres programmes pour utiliser un périphérique de réalité virtuelle ou pour créer des routines spécifiques sur un logiciel.

Sldprt : fichier pièce de SolidWorks. Ce type de fichier contient le modèle d'une pièce.

Sldasm : fichier d'assemblage SolidWorks. Ce type de fichier permet de créer un assemblage à partir de plusieurs fichiers sldprt.

Tranchage : opération réalisée sur ordinateur qui consiste à découper le modèle numérique d'une pièce en tranches successives d'épaisseur constante. Ces tranches correspondent à chaque couche de dépôt de matière réalisée par la machine de FA lors de la fabrication de la pièce.

Vitesse de production en FA : il s'agit de la vitesse moyenne de fabrication d'une machine de fabrication additive en mm/h. Cette vitesse combine à la fois la vitesse de déplacement dans le plan XY ainsi que la vitesse de déplacement suivant la direction de fabrication.

Sommaire

Chapitre I Introduction 1

Chapitre II Etat de l'art 7

Section 1 Présentation de la fabrication additive 8

1.1 Procédés de FA 8

1.2 Spécificités de la fabrication additive 12

1.3 Comparaison avec les procédés de fabrication actuels 15

1.4 Synthèse 19

Section 2 Génération des modèles numériques 20

2.1 Chaine numérique 20

2.2 Scan 3D et Modélisation libre 22

2.3 CAO 24

2.4 Synthèse 25

Section 3 Méthodologies de conception et de reconception 27

3.1 Structure d'une méthodologie de conception de pièce 27

3.2 Cadre de la méthodologie : choix de l'ingénierie intégrée 29

3.3 Du DFX, DFA et DFM... 30

3.4 ...vers le DFAM 31

3.5 Optimisation topologique 33

3.6 Synthèse 34

Section 4 Objectifs et motivations 36

Section 5 Synthèse 39

Chapitre III Méthodologie de conception 41

Section 1 Cas d'étude 43

Section 2 Schéma de synthèse de la méthodologie 45

Section 3 Etude du Solide de départ 48

3.1 Matériau 48

3.2 Machines potentielles 52
3.3 Graphe des fonctions 55
3.4 Définition du solide de départ 62
3.5 Sélection de la machine 64
3.6 Analyse par Eléments Finis 67
Section 4 Optimisation du Solide de départ 73
4.1 Préorientation de la pièce 73
4.2 Stratégie adaptée 75
4.3 Module d'Young 78
4.4 Optimisation topologique 78
4.5 Pièce optimisée et orientée 79
Section 5 Préparation de la pièce à la fabrication 80
5.1 Angle minimum de support 80
5.2 Supports 83
Section 6 Synthèse 85
Chapitre IV Génération automatique du support 87
Section 1 Outils actuels de génération de support 88
Section 2 Spécificités du support dans le cadre du procédé FDM 92
Section 3 Géométrie idéale du support 94
3.1 Conditions de fabrication 94
3.2 Section du pilier 96
3.3 Forme de la tête et disposition des piliers 98
3.4 Géométrie sélectionnée 101
Section 4 Méthode d'optimisation du support 103
4.1 Modèle CAO de la pièce 105
4.2 Discrétisation du modèle CAO 106
4.3 Représentation du modèle sous forme matricielle 108
4.4 Déduction du support 111
4.5 Représentation du support sous forme matricielle 116
4.6 Modélisation du support 118
4.7 Intégration du support à la pièce 120
4.8 Analyse critique du support obtenu 121
Section 5 Synthèse 123

Chapitre V Parachèvement à l'acétone 125
Section 1 Choix du procédé 126
Section 2 Essais préliminaires 128
2.1 Etat de surface 128
2.2 Essai de traction 132
Section 3 Plan d'expérience pour l'état de surface 133
3.1 Définition des critères 133
3.2 Table du plan d'expérience 134
3.3 Définition de la pièce 134
3.4 Résultats obtenus 135
3.5 Analyse 135
3.6 Conclusion 138
Section 4 Tests de traction 139
4.1 Définition des conditions expérimentales 139
4.2 Résultats obtenus 139
4.3 Analyse 139
4.4 Conclusion 140
Chapitre VI Conclusion 143
Annexe 1 - Mise en plan 149
Annexe 2 – Documentation technique des machines de FA 151
Bibliographie 153

Chapitre I Introduction

La fabrication additive (FA) est une famille de procédés de fabrication très récente qui a émergé au début des années 1980 avec la stéréolithographie permettant de fabriquer une pièce par ajout de couches de matière. Bien qu'il existe une large gamme de critères permettant de classifier les procédés de FA comme le type de procédé, les matériaux mis en œuvre (polymères, métaux, céramiques,...), le secteur d'application,... les procédés de FA se distinguent surtout selon leur utilisation soit industrielle, on parle alors de fabrication rapide, soit domestique, on parle alors d'impression 3D. La plupart de ces procédés ont davantage une portée industrielle : CLAD (construction laser additive directe), EBM (electron beam modeling), SLS (selective laser sintering), Polyjet, SLA (stereolithography apparatus). Mais le procédé de type FDM (fused deposition modelling), actuellement le plus répandu dans le secteur domestique et parmi les procédés de dépôt de matière industriels, présente des avantages à la fois pour un usage professionnel et domestique. Bien qu'il existe un gap en terme de qualité de pièce produites entre ces deux domaines d'utilisation, les problématiques liées à la fabrication de pièces en FA restent les même dans tous les cas : obtenir une pièce conforme aux attentes du client.

Le concept même de FA est également très innovant et en rupture avec les procédés de fabrication conventionnels d'enlèvement de matière (perçage, fraisage, tournage,...) et de déformation plastique (matriçage, forgeage, estampage,...) qui partent d'un brut et donc, d'un volume de matière fini. De même, la FA s'éloigne également des procédés de fusion (moulage par coulée, soudage, injection,...) car l'outil de fabrication n'impose pas une forme et un volume de départ prédéfinis. En effet, la fabrication d'une pièce par addition successive de couches de matière permet la réalisation de géométries internes et externes complexes difficilement réalisables avec les procédés conventionnels. Pour des machines de FA fonctionnant en dépôt de matière et disposant de plusieurs buses de fabrication, il est également possible de réaliser des pièces en multimatériaux. Enfin, pour la plupart des procédés de FA, il est également possible de réaliser des assemblages indémontables, autrement dit des pièces assemblées dès leur fabrication et présentant des mobilités internes. Pour la plupart des cas, et en particulier dans le cas d'assemblages indémontables, il est également nécessaire d'intégrer du support lors de l'étape de fabrication de la pièce. Le rôle du support est de soutenir la pièce aux endroits nécessaires pour éviter un effondrement de matière. Une fois la pièce réalisée, le support est retiré manuellement ou par un procédé automatisé. Cependant, bien que le temps de mise en place soit très réduit, les temps de fabrication pour la FA sont encore nettement supérieurs à ceux des procédés conventionnels. La FA apporte donc une alternative très intéressante aux autres procédés de fabrication dans le cas de pièces unitaires, de très petites séries et de pièces à formes internes complexes. Ce procédé est enfin très pertinent dans le contexte actuel de personnalisation de masse car l'absence d'outil rend ce procédé extrêmement flexible.

Ces spécificités propres à la FA impliquent un changement de paradigme pour les concepteurs : en effet, la conception d'une pièce se fait pour un but donné. Hormis le respect des spécifications du Cahier des charges Fonctionnel, les objectifs les plus courants pris en compte lors de la conception sont la conception orientée fabrication et la conception orientée assemblage. Pour ceci, le concepteur se contraint volontairement en fonction des procédés de fabrication et/ou d'assemblage qu'il a à sa disposition : forge, usinage, fonderie, soudage, rivetage, boulonnage,... La géométrie des pièces conçues est donc fortement liée à ces procédés. Or nous venons de voir que la

FA permettait de nouvelles pistes de réflexions en termes de fabrication, d'assemblage et de géométries de pièces. Elle impose également de nouvelles contraintes liées à la notion de support. Il est donc nécessaire de faire évoluer les schémas de pensée des concepteurs afin qu'ils puissent réellement mettre à profit les spécificités de la FA lors de la conception de pièces.

A ce jour, toutes les machines de FA sont à commande numérique. Il existe également des dispositifs portatifs permettant de générer des formes en trois dimensions en se basant sur le procédé FDM, mais ils ne peuvent être réellement considérés comme des outils de FA. Ainsi, la fabrication d'une pièce nécessite la création d'une maquette numérique, la plupart du temps à l'aide d'un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO). D'autres moyens permettent d'obtenir un modèle numérique, tels que le scan 3D ou les logiciels de modélisation libre, mais la CAO reste l'outil le plus utilisé dans le milieu industriel. La maquette numérique intègre à la fois les dimensions idéales de la pièce mais également les matériaux associés aux formes de celle-ci. Cependant, il n'existe pas encore de lien direct entre un fichier CAO et une machine de FA. Pour réaliser la pièce, il est nécessaire d'effectuer un tranchage du modèle numérique à partir d'un fichier au format .stl, qui permet de représenter la pièce de manière facettée à l'aide de triangles. La conversion impose de figer définitivement la forme de la pièce et implique une approximation linéaire par parties des surfaces gauches. Le tranchage, qui s'effectue généralement à l'aide d'un logiciel dédié, permet de déterminer le contour des différentes couches de matière en réalisant l'intersection du modèle au format .stl avec une suite de plan parallèles à espace constant. Une fois cette opération effectuée, en fonction des paramètres renseignés par le concepteur, le logiciel de tranchage analyse les différentes couches afin de proposer automatiquement un support ainsi qu'une stratégie de fabrication. Le résultat du tranchage est alors enregistré dans un nouveau fichier, interprétable par la machine utilisée pour la fabrication de la pièce.

Ce processus implique plusieurs ruptures dans la chaîne numérique qui nuisent à la conception. En effet, les conversions successives du modèle numérique ne permettent pas des modifications en temps réel. Par exemple, si le support proposé par le logiciel de tranchage comporte des erreurs, il est nécessaire de revenir au format CAO du fichier afin d'éditer la pièce puis de convertir à nouveau ce fichier au format .stl pour réaliser une nouvelle opération de tranchage. Ainsi, le temps gagné sur la mise en place du procédé peut rapidement être consommé en modifications du modèle. En limitant le nombre de ruptures de la chaîne numérique, il serait donc possible de réduire le temps nécessaire à ces modifications tout en assurant un meilleur contrôle sur le résultat de l'opération de tranchage. En complément, il est également nécessaire de proposer au concepteur des formes et des volumes répondant aux contraintes du cahier des charges tout au long de la conception. En effet, si les ruptures dans la chaîne numérique peuvent entrainer un allongement des temps de conception, les retours sont principalement dus à une prise en compte tardive des erreurs de conception. Or, en validant la maquette numérique pas à pas, tout au long de la conception, cela permettrait de garantir la conformité de la pièce avant de passer à l'étape suivante. Pour ceci, une méthode proactive où le logiciel de CAO se charge de proposer des solutions conformes semble la plus pertinente. Ainsi, le travail de prise en compte des contraintes métier et des contraintes du cahier des charges serait automatique, ce qui permettrait au concepteur de se concentrer davantage sur un travail de réflexion et de décision que sur un travail de modélisation.

Ainsi, le travail que nous allons présenter au cours de ce mémoire de thèse s'intègre à la croisée des problématiques que nous venons d'exposer : prise en compte des différents niveaux d'utilisation de la FA, réflexion sur le changement de paradigme apporté par les spécificités de ces nouveaux procédés de fabrication et limitation des ruptures de la chaîne numérique. Pour répondre à ces problématiques, nous proposons une méthodologie de conception pour la réalisation de pièces en FA qui respecte l'intégrité de la chaîne numérique et dont la finalité est la production d'un modèle numérique tranché prêt à être fabriqué. Pour ceci, notre méthodologie se base sur les données du Cahier des Charges Fonctionnel (CDCF) et les connaissances métier du procédé renseignées par le

concepteur afin de lui proposer automatiquement un premier solide dont la géométrie satisfait toutes ces contraintes. Une étape d'optimisation topologique vient ensuite restreindre le volume de matière utile de la pièce afin de limiter sa masse, son coût et le temps de fabrication. Enfin, si nécessaire, un support optimisé assurant la fabricabilité de la pièce est généré selon ces mêmes critères. Indépendamment du type de machine et du procédé de FA, la méthodologie que nous proposons est un premier pas concret vers l'obtention de pièces directement conformes, que ce soit pour des besoins industriels ou domestiques. Le but est également de fournir un outil de travail fonctionnel, aussi bien pour une utilisation industrielle que pour une utilisation domestique. Il ne s'agit pas uniquement d'une réflexion théorique sur les possibilités d'une telle méthodologie de conception, mais également d'une réflexion sur la mise en place technique de cette méthodologie afin de permettre aux concepteurs de l'utiliser de manière pratique. Ainsi, nous proposons un outil qui, à partir du cahier des charges, doit fournir un modèle numérique, prêt à être tranché, d'une pièce conforme, fabricable et utilisable. Le mémoire que nous présentons est organisé autour de 6 chapitres dont le premier est l'introduction.

Au cours du deuxième chapitre, nous effectuerons un état de l'art qui présentera les différentes catégories des procédés de FA, les processus de création des maquettes numériques ainsi que les différentes méthodologies existantes pour la conception de pièce. La première partie de notre état de l'art vise à définir plus précisément les spécificités des procédés de FA. Pour ceci, nous nous appuierons sur la mise en œuvre de la matière première : photopolymérisation, dépôt de matière et fabrication sur lit de poudre. Une fois les spécificités de la FA établies, nous effectuerons un comparatif avec les procédés de fabrication standard afin de mettre en évidence la nécessité d'un accompagnement du changement de paradigme du concepteur. La seconde partie de notre état de l'art permettra de révéler les limitations de la chaîne numérique actuelle, indépendamment des méthodes employées pour la création du modèle numérique. Enfin, bien qu'il existe des propositions de méthodologies de conception orientées FA, nous montrerons en quoi ces méthodologies ne permettent pas de répondre avec complétude aux problématiques que nous avons exposées.

Le chapitre 3 présente et détaille la méthodologie que nous avons établie. Comme nous l'avons indiqué précédemment, cette méthodologie s'appuie sur les données du cahier des charges et sur les connaissances métier afin de proposer au concepteur un modèle de pièce valide, prêt à être tranché, pour que cette dernière soit réalisée par une machine de FA. Cette méthodologie est composée de onze étapes regroupées en trois sections. La première section de la méthodologie a pour but de fournir un premier solide, fonctionnel, répondant aux contraintes mécaniques et d'état de surface et aux matériaux imposés par le cahier des charges. Cette étape est réalisée grâce à un logiciel de CAO unique qui doit intégrer un module d'analyse par éléments finis. La seconde section de la méthodologie vise à orienter et optimiser ce solide en fonction de l'état de surface souhaité et des efforts imposés afin de limiter les quantités de matière nécessaires à la fabrication. Cela permet également de réduire le temps et le coût financier de fabrication de la pièce. Cette optimisation s'effectue dans le même logiciel de CAO que précédemment et sur le même fichier. La dernière section de notre méthodologie a pour but d'assurer la fabricabilité de la pièce. Toujours dans le même logiciel, en s'appuyant sur la définition de la surface de la pièce, notre méthodologie vient déterminer les zones nécessitant du support. A partir de cette analyse, le concepteur peut choisir, si cela est possible, de modifier la géométrie de la pièce afin de limiter le volume de support. Une fois les zones de support fixées, celui-ci est généré de manière automatique par le logiciel de CAO afin d'être intégré à la pièce. Cela permet donc au concepteur de travailler sur un modèle unique apportant l'assurance du respect du cahier des charges ainsi que la fabricabilité de la pièce. Nous illustrerons chaque étape de notre méthodologie par l'étude d'un cas d'usage réel basé sur une pièce industrielle.

Après avoir souligné dans l'état de l'art et dans le chapitre précédent que la notion de support était fondamentale dans le cadre de la FA, nous avons donc intégré dans le quatrième chapitre une réflexion concernant l'intégration

des supports lors de l'édition de la maquette CAO. Nous détaillerons donc les travaux que nous avons effectués sur la constitution d'un modèle générique de support dans le but d'une génération et d'une intégration au modèle de la pièce automatiques. Pour ceci, nous présenterons un exemple de logiciel, parmi plusieurs autres, permettant l'intégration de support optimisé afin de montrer les limitations de ce type d'outil. En effet, nous verrons que la géométrie du support ne respecte pas forcément la surface de la pièce, que le retrait manuel ou mécanique du support n'est pas pris en compte lors de sa génération et que l'utilisation de cette catégorie de logiciels impose une rupture dans la chaîne numérique. La problématique liée au retrait du support étant complexe à aborder, nous restreindrons notre étude aux pièces réalisées par le procédé FDM. En effet, les procédés de dépôt de matière permettent la réalisation du support dans un matériau différent de celui de la pièce, dont des matériaux solubles. Nous étudierons ensuite la géométrie la plus adaptée pour un support optimisé dans le cadre du procédé FDM en nous basant sur les critères suivants : temps de fabrication, volume de matière nécessaire à la réalisation du support, assurance de la fabricabilité de la pièce, adaptabilité du support aux géométries complexes et surface d'échange entre le support et le solvant. Une fois la géométrie définie, nous proposerons une méthode simple permettant, au sein d'un logiciel de CAO, d'intégrer automatiquement du support en nous basant sur la discrétisation du modèle CAO par décomposition en *octree* afin d'obtenir un maillage régulier, fin et orthonormé de la pièce. A partir du modèle discrétisé et du matériau de fabrication choisi, le logiciel détermine automatiquement les zones où le support est nécessaire. Le logiciel se base ensuite sur la topologie de la pièce et sur les zones calculées afin de générer des volumes de support dont la géométrie est conforme à celle que nous avons étudiée. Ce support est alors intégré à la pièce initiale par le biais d'un fichier assemblage afin que le concepteur puisse valider visuellement la proposition faite par le logiciel.

Dans le chapitre traitant de notre méthodologie, nous avons souligné l'importance du respect de l'état de surface imposé par le cahier des charges lors de l'étape d'optimisation topologique. Cependant, il est nécessaire d'envisager un cas de figure où aucune orientation de la pièce ne permet d'assurer le respect de cette contrainte. Au sein du chapitre 5, nous élargirons donc le champ de nos travaux en étudiant les possibilités de parachèvement de pièces réalisées par le procédé FDM. Ce chapitre prend appui sur le précédent en proposant un procédé permettant, par exemple, de rectifier des surfaces en contact avec le support, ainsi que des surfaces dont l'orientation impose un effet d'escalier. En effet, la fabrication additive procédant par l'addition de couches de matière d'épaisseur constante, les surfaces inclinées présentent un aspect crénelé après fabrication. Ce défaut de surface est d'autant plus important pour le procédé FDM que l'épaisseur des couches est de l'ordre du dixième de millimètre. Tout d'abord, nous exposerons les différentes catégories de procédés de parachèvement afin de déterminer celui qui est le plus adapté à des pièces aux géométries internes complexes fabriquées en polymères, en l'occurrence une conversion chimique par attaque à l'acétone. Nous présenterons ensuite les résultats d'essais préliminaires sur des pièces étalon afin de qualifier visuellement une amélioration de l'état de surface. En complément nous exposerons également les résultat d'essais de traction réalisés sur 10 éprouvettes fabriquées horizontalement et verticalement afin de quantifier une modification éventuelle de la tenue mécanique des pièces en fonction de leur orientation. A partir de ces essais préliminaires, un plan d'expérience a été réalisé afin de proposer un modèle prédictif de l'état de surface après parachèvement de la pièce. Ce plan d'expérience prendra comme facteur le temps d'exposition, la température de l'acétone, l'orientation de la surface à rectifier ainsi que l'épaisseur des parois de la pièce et mesurera le Ra des surfaces exposées afin d'obtenir une valeur représentative de l'aspect lissé de la surface. Les résultats de ce plan montrent que le meilleur état de surface ($Ra = 6\ \mu m$) est obtenu pour des surfaces inclinées de 20° à 40° par rapport à la verticale. En complément de ce plan d'expérience, nous avons également mené une série d'essais de traction sur des éprouvettes standard soumises au même temps et à la même température d'exposition que les pièces servant à mesurer l'état de surface. Les résultats de ces essais montrent que la tenue mécanique dans le sens

des fibres est atténuée d'environ 17% tandis que la tenue mécanique dans la direction d'impression est améliorée de 33%.

Enfin, le sixième et dernier chapitre consistera en une synthèse critique de nos travaux permettant d'ouvrir notre recherche à des voies d'explorations futures. La méthodologie que nous présentons s'appuie sur des travaux existants mais ne saurait être une synthèse exclusive de ceux-ci. Nous reviendrons donc sur les choix théoriques et pratiques qui sont exposés dans ce manuscrit ainsi que sur les apports de notre méthodologie par rapport au contexte actuel de la FA. Nous expliquerons également en quoi les travaux que nous avons effectués répondent aux problématiques que nous avons soulevées. Nous soulignerons les apports de notre méthode de génération automatique de support ainsi que les débouchés industriels et domestiques du parachèvement de pièces à l'acétone. Enfin, nous donnerons des pistes d'amélioration et de réflexion possibles pour motiver une poursuite de nos travaux visant à l'élaboration d'une méthodologie de conception pour la réalisation de pièces en fabrication additive.

Chapitre II Etat de l'art

Ce chapitre va nous permettre de nous focaliser sur les procédés de fabrication additive (FA), puis d'explorer toute la chaîne de création numérique et enfin de présenter les méthodologies de conception et de reconception pour en établir une analyse comparative et critique en vue de la conception de pièces en FA. Cette dernière partie sera le point de départ de nos travaux qui visent à proposer une méthodologie de conception pour la réalisation de pièces en FA.

Dans un premier temps, nous allons définir ce qui caractérise les différents procédés de FA. Nous présenterons les différentes catégories de procédés de FA ainsi que leurs spécificités et les différents types de matériaux qu'ils peuvent mettre en œuvre au regard des procédés de fabrication standards. Quel que soit le procédé de FA mis en œuvre, la chaîne numérique reprend largement celle des autres procédés (scan, modélisation, CAO), mais apporte de nouvelles étapes en vue du transfert du modèle vers la machine de FA. Dans un second temps, nous aborderons donc les différentes techniques permettant la création d'une pièce physique à l'aide des outils informatiques existants. Nous présenterons enfin l'impact des spécificités de la FA lors de la phase de conception d'une pièce, indépendamment du procédé de conception afin d'étudier la pertinence des méthodologies de conception et reconception actuelles par rapport aux procédés de FA.

Section 1 Présentation de la fabrication additive

La Fabrication Additive correspond à une famille de procédés de fabrication relativement nouvelle. La stéréolithographie, qui date de 1986, est le premier procédé de fabrication additive permettant de réaliser des pièces fonctionnelles ("Company set up for stereolithography," 1987). Bien qu'il existe différents procédés de FA, tous permettent la réalisation de pièce par ajouts successifs de couches de matière.

De plus, La dénomination du procédé change en fonction de l'usage des pièces réalisées. On parle ainsi de *fabrication rapide* ou *fabrication directe* dans le cas de fabrication de pièces fonctionnelles, d'*outillage rapide* dans le cas de la fabrication additive d'outils ou encore de *prototypage rapide* ou d'*impression 3D* lors de la réalisation de pièces de démonstration ou de prototypes. D'un point de vue technique, le passage du prototypage rapide à la fabrication rapide s'est effectué dès lors que la précision des machines a été suffisante pour permettre la production des pièces fonctionnelles, aussi bien en termes d'état de surface et de tolérances géométriques que de contraintes mécaniques. Ainsi, bien que chaque procédé de FA ne permette que la mise en œuvre d'une gamme restreinte de matériaux, la différentiation réside dans l'utilisation de la pièce fabriquée et non dans le procédé mis en place.

Dans cette partie, nous présenterons les trois grandes catégories de procédés de fabrication rapide : la photopolymérisation, le dépôt et la projection de matière et la fabrication additive sur lit de poudre. Nous avons basé cette classification, qui englobe tous les procédés de FA, sur le processus de génération de pièce et sur la mise en place de la matière première. Nous écartons donc les procédés de stratoconception (Barlier, Gasser, & Cunin, 1995) et LOM (laminated objet manufacturing) (Mueller & Kochan, 1999) qui sont limités en terme fabrication de pièces aux formes internes complexes et qui correspondent davantage à des procédés d'enlèvement de matière et d'assemblage. Ainsi, nous considèrerons uniquement les procédés de FA permettant de réaliser des pièces complexes, éventuellement avec support, par addition de matière sous forme liquide ou de particules.

1.1 Procédés de FA

1.1.a Photopolymérisation

Le procédé de photopolymérisation le plus répandu est la stéréolithographie (SLA) qui permet d'obtenir une pièce solide à partir d'un bac de résine liquide. Il s'agit d'un des premiers procédés de fabrication rapide à avoir été intégré dans des processus industriels. Ce procédé repose sur la capacité de la résine à polymériser sous l'effet de la lumière. Une machine de stéréolithographie est composée d'une cuve de fabrication, d'un plateau mobile et d'une source lumineuse. Le plateau de la machine se situe horizontalement à l'intérieur de la cuve et se déplace verticalement (Figure 1 – plateau mobile). Lors de la fabrication, la cuve est remplie de résine. La source laser envoie un faisceau dans un plan parallèle à la plateforme. Sous l'effet de la lumière et/ou de la chaleur, la résine polymérise au point d'impact du laser (Figure 1 - Zone de photopolymérisation). En déplaçant ce point, le système optique vient créer une première couche de résine solide sur le plateau. Une fois cette couche réalisée, celui-ci se déplace d'un incrément vers le bas afin de permettre l'ajout d'une couche de matière sur celle qui vient d'être réalisée. Une fois la pièce entièrement fabriquée, la plateforme sort du bac afin que l'utilisateur puisse la récupérer. Une phase de nettoyage est ensuite nécessaire afin d'extraire la résine non polymérisée présente dans la pièce.

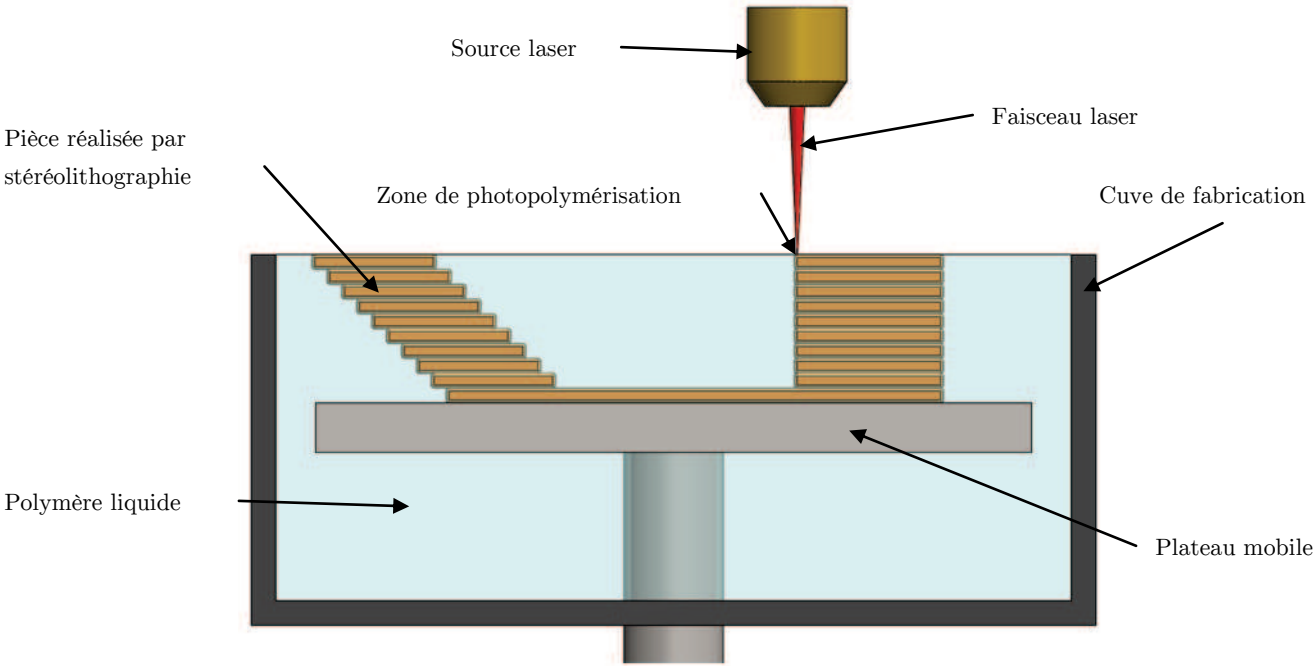


Figure 1 - Schéma de principe pour la stéréolithographie

En ce qui concerne les matériaux utilisables, comme nous l'avons indiqué, seules des résines photopolymérisables peuvent être mises en œuvre via ce procédé.

Les avantages de ce procédé sont la possibilité de créer des assemblages indémontables (Boyard, Rivette, Christmann, & Richir, 2012) ainsi que des formes aux géométries internes complexes (Vayre, Vignat, & Villeneuve, 2012a). De plus, il est possible d'intégrer des particules métalliques dans la résine afin la rendre électriquement conductrice (Leigh, Bradley, Purssell, Billson, & Hutchins, 2012) ou magnétique. De manière générale, la résolution apportée par ce procédé est de l'ordre de la dizaine de microns. En revanche, suivant l'orientation de la pièce, il peut être nécessaire d'intégrer du support afin d'éviter des déformations de la pièce lors de la fabrication.

Il faut également noter que le développement de ce procédé a permis la mise en place du format d'échange standard .stl, dont la stéréolithographie est le procédé éponyme. Bien que ce format pose quelques problèmes actuellement, notamment pour la fidélité de modélisation de surfaces non-planes ainsi que pour la représentation de pièces en multimatériaux, il reste majoritairement utilisé pour la représentation de pièces destinées à être réalisées en FA.

Dans le cas du procédé DLP (Digital Light Processing) (Pham & Gault, 1998), la source laser est remplacée par un vidéoprojecteur. Cela permet la photopolymérisation simultanée de chaque point d'une couche de matière. Bien que le procédé DLP soit plus rapide que le SLA, ce dernier est encore très utilisé car la précision de la pièce dépend de la position du faisceau laser et non de la résolution du vidéoprojecteur utilisé.

1.1.b Dépôt de matière

Nous considèrerons ici tous les procédés de FA permettant la fabrication de pièces par dépôt de matière, tels que les procédés de Laser Cladding (Nowotny, Scharek, Beyer, & Richter, 2007), Material Jetting[1] (Sachs, Cima, & Cornie, 1990) et FDM (Pham & Gault, 1998). Bien que la technologie mise en place soit différente (respectivement, la projection métallique, la projection de polymère liquide et le dépôt de fil de polymère fondu), l'approche pour la fabrication d'une pièce reste identique. Il s'agit de la génération d'un volume ab nihilo.

[1] http://www.stratasys.com/3d-printers/technologies/polyjet-technology

De manière générale, la machine se compose d'un plateau mobile horizontal sur lequel est construite la pièce, ainsi que de plusieurs buses situées au dessus de ce plateau (Figure 2). Ces buses sont toutes fixées sur un chariot mobile qui se translate parallèlement au plateau. Durant la phase d'impression, le plateau vient se placer à quelques dixièmes de millimètre des buses. La première buse vient alors déposer un type de matériau. En déplaçant le chariot, on génère ainsi un premier cordon de matière. Selon le même principe, la seconde buse vient alors déposer un second matériau. Une fois tous les dépôts de chaque buse effectués, la première couche de matière est terminée. Le plateau s'éloigne des buses d'un incrément vers le bas puis l'étape de dépôts recommence. La pièce est fabriquée lorsque toutes les couches de matière sont déposées. Dans des cas plus spécifiques, il existe des machines pour lesquelles toute la mobilité est donnée à la buse, soit par le biais d'une architecture sérielle[2], soit par le biais d'une architecture parallèle[3] . De plus, le cas général veut que la mobilité soit réduite à trois translations. Il existe également des machines 5 axes dont le plateau ou la buse peut être orienté en X et en Y, l'axe Z étant la direction d'impression[4].

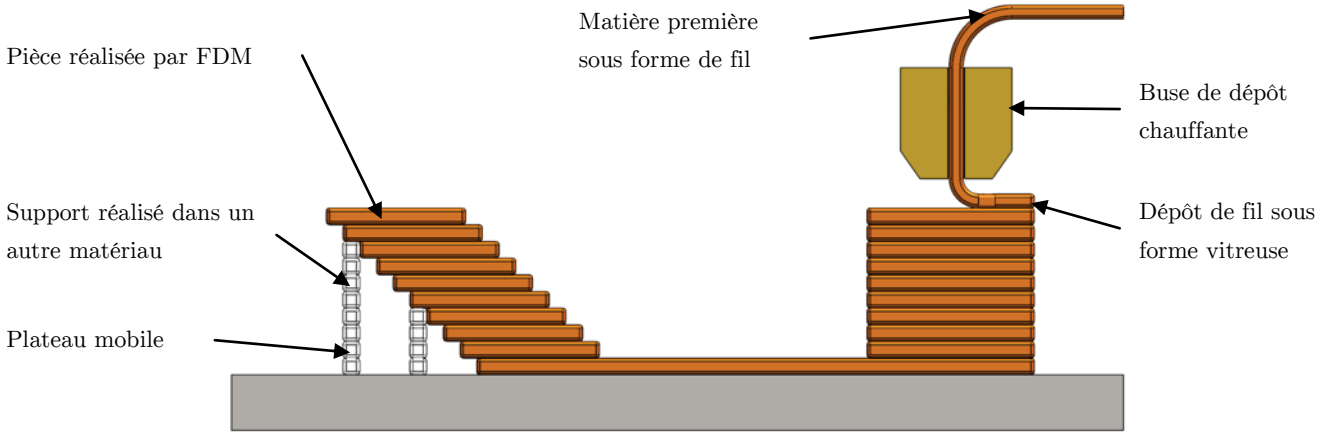


Figure 2 – Schéma de principe pour le dépôt de matière selon le procédé FDM

Dans le cas du FDM, le matériau utilisé est du polymère présent sous forme de fil solide, le plus souvent enroulé autour d'une bobine. Dans le cas du Polyjet, la matière première est du polymère liquide enfermé dans une cartouche, de la même manière qu'une imprimante à jet d'encre. Dans le cas du procédé CLAD, le matériau est exclusivement métallique ou céramique et présent sous forme de poudre. Il est amené jusqu'à la buse pour être fondu par un rayonnement laser. La buse vient donc déposer de fines gouttes de métal en fusion (Vayre, Vignat, & Villeneuve, 2012b).

Tout comme pour le SLA, cette catégorie de procédés permet la réalisation de pièces aux géométries complexes et la fabrication d'assemblages indémontables. Cependant, l'avantage principal de la fabrication par dépôt de matière réside dans la réalisation de pièces en multimatériaux, le nombre de matériaux étant dépendant du nombre de buses disponible. De plus, dans le cas du Polyjet ou du procédé CLAD, chaque buse peut être alimentée en parallèle par différents matériaux. Ainsi, il est également possible de modifier la composition du matériau déposé en jouant sur les débits de matière des matériaux de base. Ceci permet la réalisation de pièces dites *Functionnaly Graded Material* (Figure 3) pour lesquelles la répartition de composition de matière est pilotée mathématiquement (Muller, Mognol, & Hascoët, 2010).

[2] Exemple de machines 3 axes à architecture sérielle : https://eu.makerbot.com/produkte.html
[3] Exemple de machines 3 axes à architecture parallèle : http://www.spiderbot.eu/en
[4] Exemple de machines 5 axes à architecture sérielle : http://beam-machines.fr/uk/images/presse/CLAD%20Unit

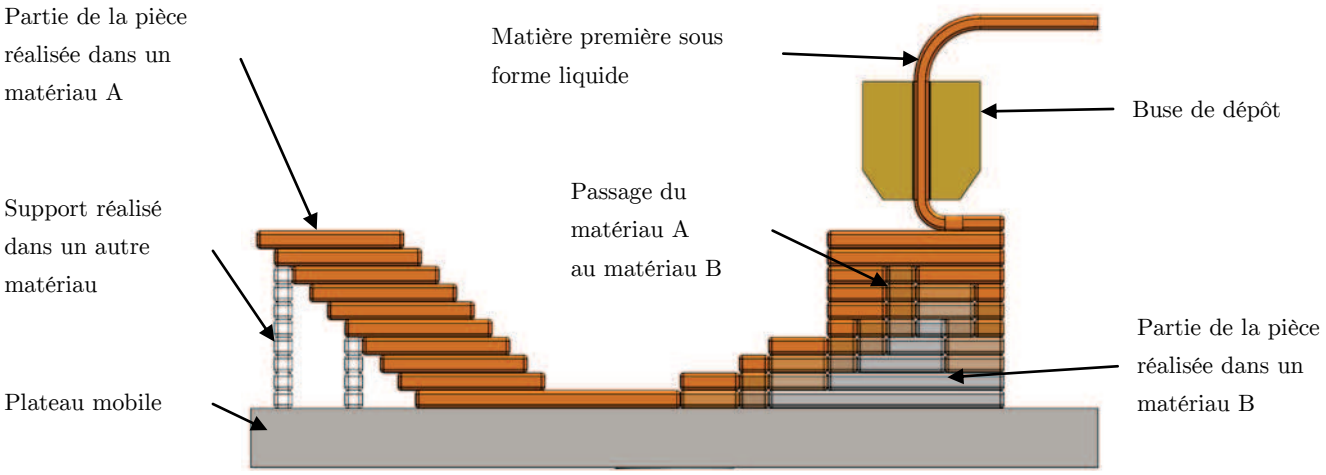


Figure 3 – Schéma de principe pour la fabrication de pièces FGM selon le procédé Polyjet/CLAD

En revanche, les couches de matière déposées sont soumises à la gravité terrestre. Dans le cas de la réalisation de pièces creuses, il est donc nécessaire d'intégrer du support afin d'assurer leur maintien lors de leur fabrication. Cela nécessite d'anticiper le retrait de ce support solide une fois l'impression terminée. Le support peut être réalisé dans un matériau différent de celui de la pièce, ce qui est intéressant s'il existe un solvant permettant d'attaquer le support et non la pièce (Wang, Evans, Dharmasena, & Wadley, 2003).

1.1.c Fabrication sur lit de poudre

La fabrication sur lit de poudre englobe, entre autres, les procédés SLS, SLM et fabrication sur plâtre ou PP (Plaster-base 3D Printing) (Pham & Gault, 1998). Pour ces procédés, la machine intègre deux bacs rectangulaires disposés côte à côte au dessus desquels se trouve une buse mobile (Figure 4). A l'intérieur de chaque bac, un plateau horizontal peut se déplacer verticalement. A l'initialisation de la machine, le premier bac est rempli de la poudre qui va servir à la réalisation de la pièce. Le second bac correspond à l'espace de travail dans lequel la pièce va être fabriquée. Le premier plateau est donc en position basse tandis que le second plateau est en position haute. Un rouleau horizontal permet de transvaser une couche de poudre du premier bac vers le second.

Dans le cas du SLS ou du SLM, la buse envoie un faisceau laser qui vient chauffer localement la matière. Dans le cas du PP, la buse vient déposer un liant sous forme liquide dans une zone restreinte. Dans les deux cas la matière impactée est agglomérée. En déplaçant la buse parallèlement au second plateau, un premier cordon de matière est généré sur la première couche. Une fois cette couche terminée, le second plateau descend d'un incrément tandis que le premier plateau monte du même incrément. Le rouleau déplace alors une seconde couche de matière vers le bac de fabrication et l'impression reprend. Lorsque la pièce est terminée, il suffit de retirer la poudre non agglomérée afin de récupérer la pièce.

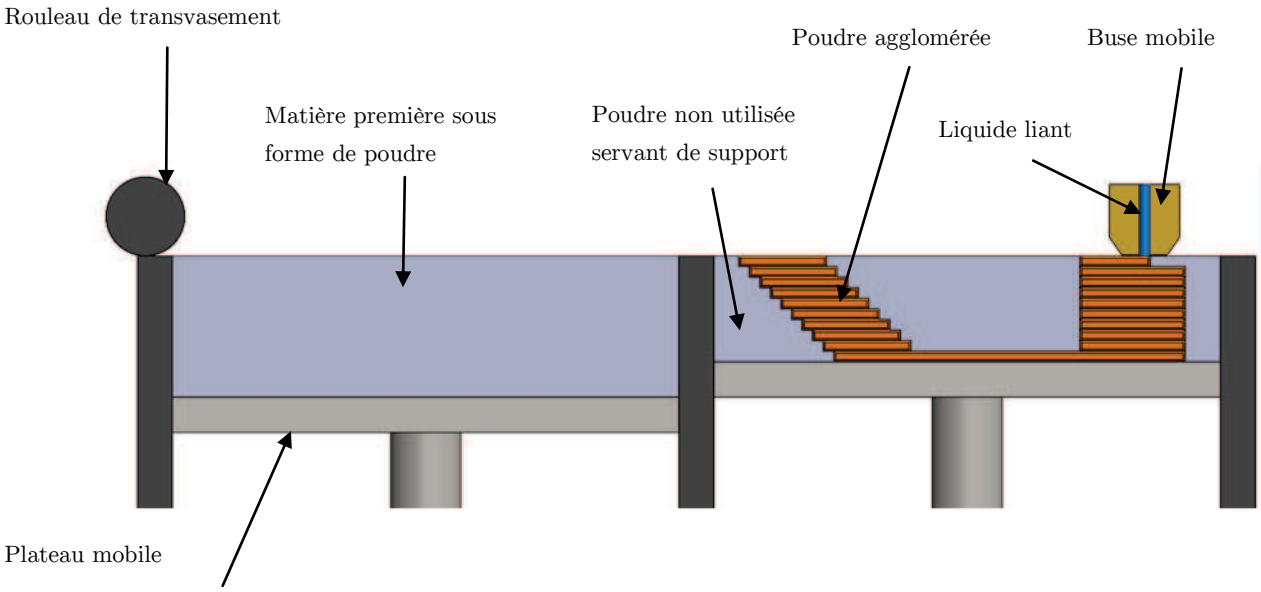


Figure 4 – Schéma de principe pour la fabrication sur lit de poudre dans le cas du Plaster-Based 3D printing

Dans le cas du SLM, les poudres utilisées sont d'origine métallique. Dans le cas du SLS, il est possible d'étendre la gamme des matériaux aux céramiques ainsi qu'aux polymères. En revanche, la poudre doit nécessairement intégrer un liant qui sera consommé lors du procédé. Dans le cas du PP, la matière utilisée est obligatoirement minérale et de type *plâtre*.

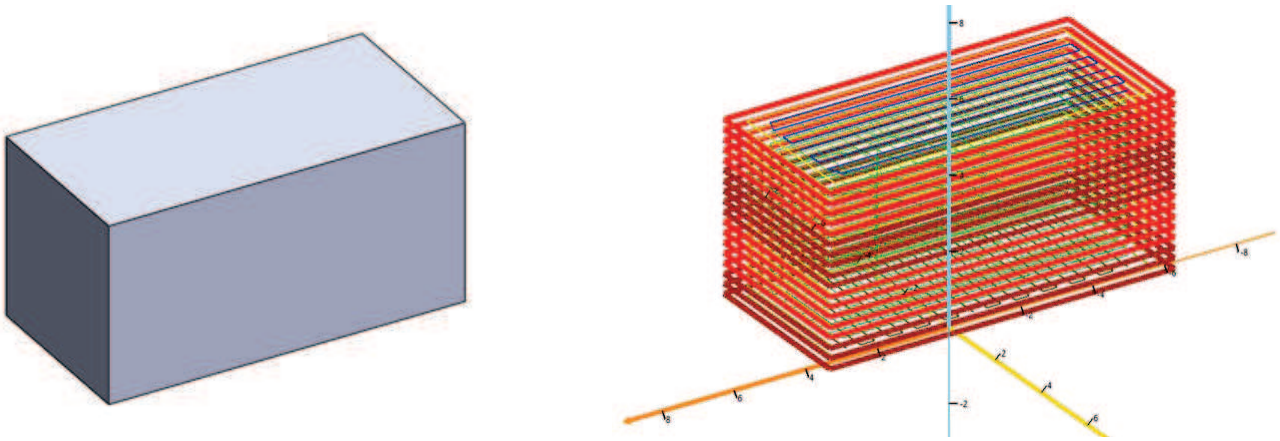
Tout comme pour les procédés vus précédemment, il est possible de réaliser des assemblages indémontables ainsi que des pièces aux formes complexes. De plus, l'avantage de ce procédé est de construire les couches de matière sur de la poudre. Cela permet donc, dans le cas du SLS et du PP de ne pas prendre en compte de support. En revanche, de même que pour le SLA, la matière utilisée est unique et sa composition ne peut pas évoluer lors de la fabrication. De plus, puisque le procédé SLM fait fondre le métal des différentes couches, il est nécessaire d'intégrer du support afin que la pièce ne s'effondre pas dans le lit de poudre. Cela est d'autant plus contraignant que le support est réalisé dans le même matériau que la pièce et ne peut donc pas être dissous de manière indépendante. Il est donc très important d'anticiper son retrait avant la fabrication de la pièce.

1.2 Spécificités de la fabrication additive

La fabrication additive amène de nouvelles spécificités par rapport aux procédés de fabrication conventionnels. La réalisation de formes libres et complexes, la fabrication de pièces en multimatériaux et d'assemblages indémontables apportent une réelle plus-value au concepteur. Mais celui-ci est soumis à de nouvelles contraintes concernant principalement la nécessité de support lors de la fabrication de certaines pièces, mais également la prise en compte du choix de l'orientation de la pièce à imprimer. Ces différents points sont détaillés dans les parties ci-après.

1.2.a Formes et volumes complexes

Nous avons établi que le procédé de FA est basé sur l'empilement de couches de matières. La définition de ces couches est décrite par une opération de tranchage, qui correspond à la somme des intersections entre le volume à construire et une suite de plans parallèles équidistants (Figure 5). Nous reviendrons plus en détail sur cette opération dans une prochaine partie.



Pièce initiale

Pièce tranchée

Figure 5 - Exemple de tranchage d'un parallélépipède

La géométrie de cette pièce peut être la plus complexe possible, l'intersection entre cette pièce et un plan donnera toujours un nombre entier de contours fermés définissants des zones de présence de matière ou de vide. Ainsi, du point de vue de la FA, la complexité de fabrication d'une pièce ne dépend pas de sa géométrie puisqu'il s'agit d'un empilement de couches de matière. De plus, le temps de fabrication d'une pièce ne dépend pas de la géométrie de celle-ci mais de la quantité de matière nécessaire à sa réalisation ainsi que du nombre de couches générées (Kulkarni, Marsan, & Duta, 2000). Dépendamment de la technologie de FA utilisée, une pièce de 10 cm^3 peut nécessiter plusieurs heures de fabrication.

1.2.b Nécessité de support

Si la FA permet de réaliser toutes sortes de pièces indépendamment de leur complexité, il y a quelques réserves à observer quant aux formes creuses. Nous venons de voir que la stéréolithographie et le dépôt de matière sont des procédés pour lequel chaque couche repose sur la matière générée pour la précédente. Or, ces couches de matière sont soumises à la gravité. Si une couche ne repose sur aucune matière, elle s'effondre. Pour ces catégories de procédés, il est nécessaire d'intégrer du support à la pièce. Le support correspond à de la matière, qui peut être différente ou la même que celle de la pièce et qui est déposée en même temps que les couches de la pièce (Dolenc & Makela, 1994), (Franck & Fadel, 1994). La structure du support est volontairement friable ou soluble (Yagnik, 2014) afin pouvoir le détacher de la pièce une fois la phase de fabrication terminée.

Dans le cas de la fabrication sur lit de poudre, la matière non-agglomérée peut faire office de support. Dans le cas du procédé CLAD, la machine utilisée dispose d'axes lui permettant d'orienter la pièce pour que chaque couche soit déposée sur de la matière (Liou et al., 2007).

1.2.c Orientation des pièces

Un corollaire au principe de FA est la nécessité d'orienter la pièce à fabriquer. Lors de la phase d'impression, la jonction entre les couches de matière fait apparaître des défauts qui détériorent l'état de surface de la pièce ainsi que ses caractéristiques mécaniques (Mercelis & Kruth, 2006), (Tolosa, Garcianda, Zubiri, Zapirain, & Esnaola, 2010). Ces défauts, qui portent le nom d'effet d'escalier, sont dus à la discrétisation de la surface de la pièce par des couches parallèles d'épaisseur constante (Arni & Gupta, 2001), (Ma, 2004). Puisque les couches de matières sont toujours déposées selon le même plan, il est facile de prévoir les défauts qui apparaitront sur la pièce, celle-ci ayant

un comportement globalement orthotrope. Une orientation adéquate de la pièce permet donc de limiter l'impact de ces défauts (Ahn, Montero, Odell, Roundy, & Wright, 2002), (Ziemian, Sharma, & Ziemian, 2012).

De plus, nous avons vu que la pièce peut nécessiter du support pour sa réalisation. Or, la présence du support, ainsi que les caractéristiques mécaniques et l'état de surface, dépendent uniquement de l'orientation de la pièce (Figure 7) (Canellidis, Giannatsis, & Dedoussis, 2009).

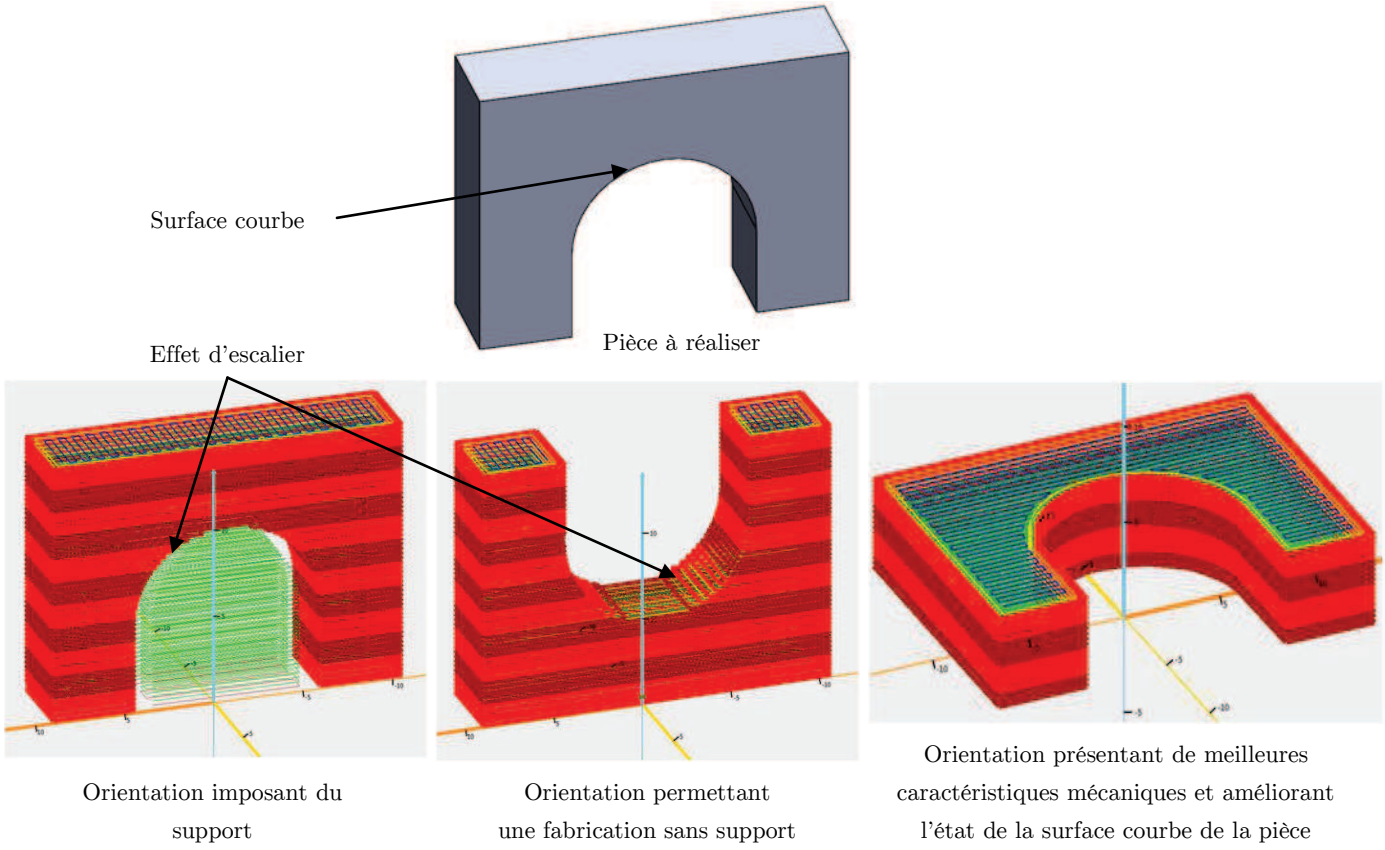


Figure 6 - Nécessité du support et orientation de la pièce

Nous voyons donc que l'orientation de la pièce joue un triple rôle sur la réalisation de pièce en FA :

- Modification de l'état de surface ;
- Modification des contraintes mécaniques ;
- Nécessité de la présence de support.

Dans ce dernier cas, l'enjeu est très important puisque le temps de fabrication d'une pièce est directement lié à la quantité de matière à générer. De plus, la présence de support implique une phase de nettoyage de la pièce ainsi que de la matière consommée à perte. Enfin, les zones de contact entre la pièce et le support présentent des défauts d'état de surface, venant s'ajouter aux défauts dus aux effets d'escalier. Il est donc nécessaire de bien orienter une pièce avant de la fabriquer.

1.2.d Réalisation de pièces en multimatériaux

Dans le cas du dépôt de matière, certaines machines sont équipées de plusieurs têtes d'impression (El-Katatny, Masood, & Morsi, 2010). Le cas d'utilisation le plus simple correspond à la fabrication d'une pièce composée d'un même matériau mais de couleurs différentes (Figure 7).

Figure 7 - Exemple de pièce réalisée en multimatériaux via procédé PolyJet[5]

Puisque chaque buse permet de déposer un matériau particulier, il est envisageable qu'une telle machine produise des pièces composées cette fois de matériaux différents afin de jouer sur les propriétés mécaniques ou physiques (Vaezi, Chianrabutra, Mellor, & Yang, 2013), (Gaynor, Meisel, C. B. Williams, & Guest, 2014). Cela suppose que les plages de température d'extrusion des matériaux soient compatibles entre elles ; nous reviendrons sur ce point dans le chapitre suivant. Comme nous l'avons évoqué précédemment, les cas des procédés CLAD et Polyjet sont à part puisqu'ils permettent également de changer la composition, durant la phase d'impression, des matériaux de chaque buse. Les possibilités de réalisation de pièces en multimatériaux en FA sont nombreuses et n'ont de cesse de se développer.

1.2.e Fabrication d'assemblages indémontables

Une des opportunités très intéressantes offertes par la FA est la possibilité de réaliser des assemblages indémontables en une seule phase de fabrication. La définition d'un assemblage est le fait de joindre plusieurs pièces distinctes afin de réaliser une liaison mécanique avec mouvement (Mavroidis, DeLaurentis, Won, & Alam, 2001).

Le cas d'une liaison encastrement est peu intéressant puisque, comme nous venons de le voir, il est possible de rassembler plusieurs pièces en une seule grâce à la FA multimatériaux. En revanche, le fait de fabriquer des pièces couche par couche permet d'intégrer une pièce dans une autre directement lors de la phase de fabrication. Dès lors, on peut commencer à envisager la fabrication de systèmes vis-écrou, de liaisons rotules ou pivot grossières sur mesure directement en FA. La seule contrainte est la nécessité de laisser un jeu entre les différentes pièces afin que celles-ci ne fusionnent pas lors de leur fabrication (Rejagopalan & Cutkosky, 1998). Cette contrainte ne permet donc pas de réaliser des liaisons mécaniques de précision pour l'instant (engrenages, douille à bille, roulement) mais la notion d'assemblage indémontable reste exploitable dans le cas de produits destinés au grand public.

1.3 Comparaison avec les procédés de fabrication actuels

Après avoir présenté les procédés de fabrication additive et leurs spécificités, nous allons clore la première partie de notre état de l'art en mettant en concurrence la FA avec les procédés de fabrication conventionnels. Actuellement, il existe trois grandes familles de procédés de fabrication conventionnels auxquels vient s'ajouter la FA (Figure 8). Dans cette section, nous allons voir que la FA n'est pas un procédé concurrentiel qui remplacera à long terme les procédés conventionnels mais qui vient les compléter en apportant des alternatives pour les pièces complexes. Nous allons donc, pour chaque famille de procédé, effectuer une analyse comparative avec la FA.

[5] Source : objective3d.com

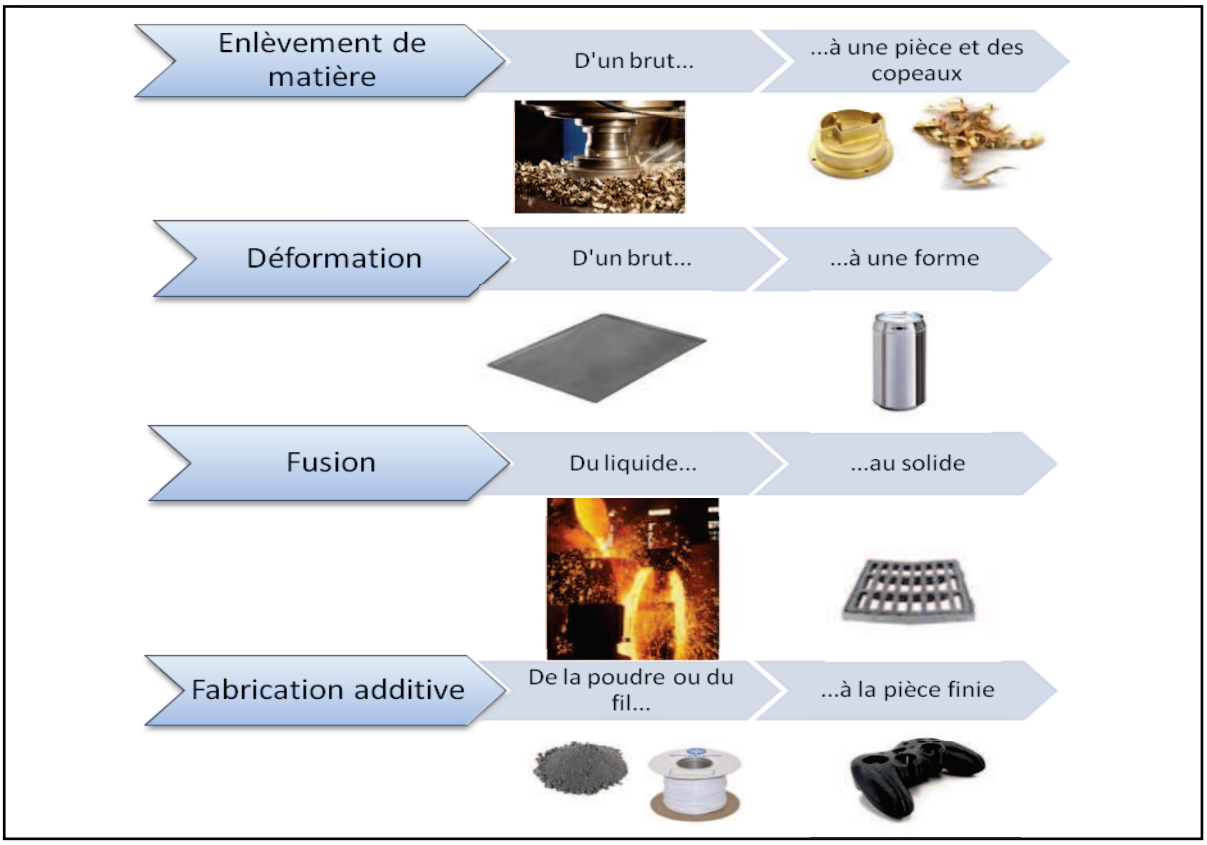


Figure 8 - Récapitulatif des grandes familles de types de procédés de fabrication

1.3.a FA vs Déformation plastique

Il existe divers procédés de déformation plastique tels que le matriçage[6], l'emboutissage[7], le fluotournage[8]. Cependant, tous ces procédés ont en commun le fait de partir d'un brut métallique (respectivement, un lingot, une feuille et un cylindre). Ce brut est ensuite déformé (à chaud ou à froid) afin de générer la forme de la pièce finale en épousant la forme d'une matrice (Figure 9). Ce procédé est donc particulièrement adapté aux pièces fines et ne disposant pas de surfaces fonctionnelles internes complexes. En effet, pour récupérer la pièce, il est nécessaire d'en extraire les outils. Il n'est donc pas possible de fabriquer des pièces aux formes internes complexes.

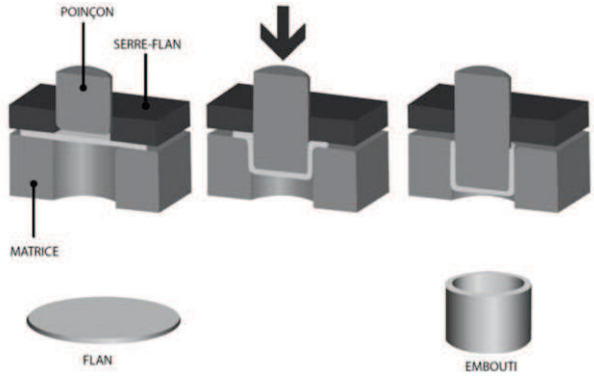
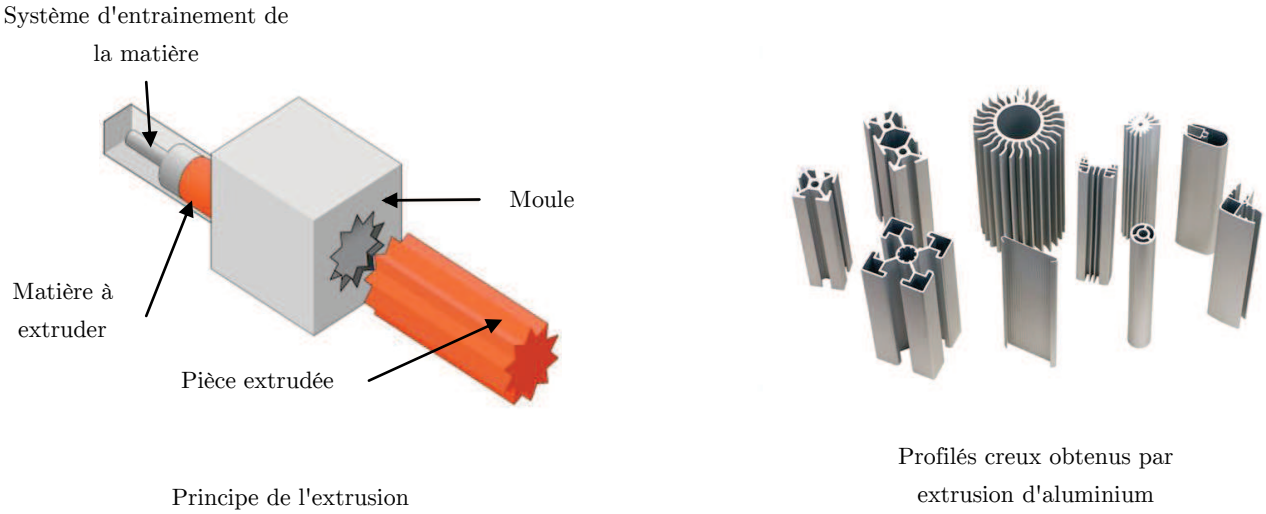


Figure 9 - Déformation plastique, cas de l'emboutissage[9]

[6] http://www.aubertduval.fr/process/matricage.html
[7] http://www.snop.fr/decoupage---emboutis_p_84.html
[8] http://www.genthial.com/fr/repoussage-et-fluotournage/repoussage-fluotournage.php
[9] Principe de l'emboutissage des métaux : http://mediamef.utt.fr/modules/P1/M1-1/EXPORTS_S111.publi/web/co/module_S111_2.html

L'extrusion est un procédé de déformation plastique qui fait exception[10]. En effet, ce procédé permet de mettre en forme des pièces métalliques, composites ou minérales. De plus, il est possible de réaliser des formes creuses, mais celles-ci sont nécessairement basées sur des surfaces réglées et parallèles (Figure 10).



Principe de l'extrusion

Profilés creux obtenus par extrusion d'aluminium

Figure 10 - Déformation plastique, cas de l'extrusion[11,12]

Bien que les géométries des pièces qu'il est possible d'obtenir soient limitées, les procédés de déformation plastique permettent une cadence de fabrication très élevée et une automatisation assez facile du processus d'obtention de pièce. Dans le cas de l'emboutissage, toute la surface de la pièce est générée en une seule passe de la matrice. Le temps de fabrication (de l'ordre de la seconde) est donc indépendant de la taille de la pièce. Dans le cas de l'extrusion, la vitesse d'obtention du profilé est de l'ordre de la dizaine de mètres par minutes et, là encore, cette vitesse est indépendante de la forme du profilé. En comparaison avec la FA, nous voyons donc que ces deux procédés sont complémentaires en tous points. Les procédés de déformation plastique permettent l'obtention de pièces simples avec une grande cadence de fabrication et donc l'orientation du brut impact peu ou nullement les caractéristiques de la pièce. En revanche, la FA permet la réalisation de pièces complexes dont les caractéristiques mécaniques varient en fonction de leur orientation et avec des temps de fabrication assez long.

1.3.b FA vs Fusion

Nous considèrerons ici uniquement les procédés de frittage et de moulage. Nous ne considèrerons pas le procédé de soudage/rechargement qui est est à la limite entre un procédé d'assemblage et un procédé de FA. En effet, le rechargement de matière s'apparente au procédé FDM mais en mettant en œuvre des matériaux métalliques.

Le moulage est un procédé qui, par le refroidissement dans un moule d'une matière en fusion, permet l'obtention d'une pièce solide à la géométrie donnée. La matière utilisée peut être d'origine métallique ou polymère. Il existe différentes techniques spécifiques de moulage, mais toutes ont en commun l'utilisation d'un moule. La qualité du moule impacte l'état de surface de la pièce. Dans le cas d'un moulage au sable, la surface obtenue aura un aspect granuleux. Dans le cas d'un moulage par injection, il est possible d'obtenir un état de surface fonctionnel

[10] http://fr.wikipedia.org/wiki/Extrusion
[11] Principe de l'extrusion : www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/design/resistantmaterials/processtechniquesrev8.shtml
[12] Exemple de profilés d'aluminium obtenus par extrusion : https://www.pa-international.com.au/index.php?option=com_content&view=article&id=128&Itemid=173

directement en sortie du moule. De plus, le moule peut comporter des noyaux (moulage au sable) ou des tiroirs (moulage par injection) permettant de générer des géométries internes complexes à l'intérieur des pièces. Cette complexité est limitée par les dimensions et l'orientation des noyaux.

Dans le cas du moulage au sable, il est souvent nécessaire d'ajouter de la matière (on parle alors de masselottes) dont le but est de compenser la rétraction des zones massives de la pièce lors de leur refroidissement. Les masselottes doivent ensuite être découpées de la pièce. L'orientation de la pièce impacte donc sur la quantité et le placement des masselottes ainsi que sur la forme et les propriétés mécaniques finales.

Le procédé de frittage est semblable au moulage à la différence près que la matière utilisée est une poudre dont la taille et la densité des grains est connue. Cette poudre est chauffée de manière à ce que les grains se soudent entre eux, mais sans fusion de la matière. On obtient ainsi une pièce poreuse dont la géométrie est celle du moule et des éventuels noyaux utilisés. Puisque la matière n'est pas fondue, le frittage ne nécessite pas de masselottes.

Les procédés de fusion se rapprochent très fortement de la fabrication additive pour ce qui est du principe physique de génération de volume, notamment par le frittage de la matière pour la fabrication sur lit de poudre ou la fusion des polymères pour le dépôt de matière. De plus, tout comme pour la FA, les procédés de fusion ne consomment, dans l'idéal, que la quantité de matière nécessaire à la mise en forme du volume final de la pièce. La fonderie est un procédé beaucoup plus rapide, l'obtention d'une pièce ne dépendant que de l'injection de la matière et du temps de refroidissement. En revanche, bien que ce procédé permette la réalisation d'assemblages indémontables, il n'est pas possible de réaliser de pièces en multimatériaux. De plus, le prix d'un moule, pouvant aller de 10 000 à 100 000 euros, et la nécessité de la lourde mise en place d'une ligne de production font des procédés de fusion un concurrent compétitif à la FA uniquement dans le cadre d'une production de pièces en grande série. Le prix du moule est justifié par la complexité de mise en œuvre, la durée de vie souhaitée et la qualité de surface nécessaire. En comparaison, une machine de type SLA ou FDM, dont la flexibilité de production est bien plus élevée, ne coûte que quelques milliers d'euros.

1.3.c FA vs Enlèvement de matière

Le procédé d'enlèvement de matière permet d'obtenir une pièce à partir d'un brut en enlevant de la matière sous forme de copeaux ou de particules. Nous considèrerons ici les procédés de fraisage[13], de tournage[14] et de découpage[15] qui permettent de mettre en forme tous les types de matériaux, l'électroérosion étant réservée aux matériaux conducteurs d'électricité[16]. On constate donc une rupture avec les familles de procédés précédents où le principe adopté consiste à mettre en forme un volume de matière, soit par déformation, soit par fusion, soit par frittage. Nous avons ici un premier aspect de la complémentarité de la FA avec l'enlèvement de matière. La FA procédant par ajout de couches, les pertes de matière première sont minimisées. Cependant, la précision de la pièce dépendant de la résolution de la machine, il n'est donc pas possible de rectifier l'état de surface directement avec ce procédé. En revanche, l'enlèvement de matière procède par la génération de copeaux à l'aide d'un outil de coupe. Dépendamment de la fiabilité de la machine et de l'usure de l'outil, il est ainsi possible d'obtenir des surfaces fonctionnelles avec une précision de l'ordre du micromètre (Vasile, Friedrich, Kikkeri, & McElhannon, 1996). Il est également possible d'obtenir des géométries libres, sous réserve d'accessibilité pour l'outil de coupe. La limite se

[13] http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/procedes-d-usinage-42190210/fraisage-bm7082/

[14] http://fr.wikipedia.org/wiki/Tournage_m%C3%A9canique

[15] http://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9coupage

[16] http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89lectro-%C3%A9rosion

pose dans le cas de formes intérieures complexes. De plus, l'orientation de la pièce conditionne sa vitesse de fabrication en fonction de la facilité d'usinage des différentes surfaces.

En revanche, l'enlèvement de matière procédant à partir d'un brut, il n'est pas possible d'obtenir une pièce en multimatériaux. Néanmoins, le fait d'enlever de la matière dans un volume déjà présent rend obsolète la notion de support. Ce procédé permet également, pour un même matériau et une même pièce, d'obtenir des caractéristiques mécaniques bien supérieures à celles des pièces obtenues par la plupart des procédés de FA. L'enlèvement de matière est également un procédé de fabrication tout à fait adapté aux pièces simples de révolution et/ou intégrant des perçages. Dans ces cas d'utilisation, cette famille de procédés permet d'obtenir de pièces plus rapidement qu'en FA (Gibson, Rosen, & Stucker, 2010).

Les principales différences entre la FA et l'enlèvement de matière résident dans la précision des surfaces et sur les types de matériaux qu'il est possible de mettre en forme. Les procédés d'enlèvement de matière présentent donc une bonne alternative aux procédés de FA dans le cas de pièces aux formes simples. De plus, il est possible de réaliser des formes libres par le biais d'usinage à grande vitesse sur des machines 5 axes. Bien que le temps de mise en œuvre soit plus long que pour un procédé de FA, la vitesse de fabrication et la qualité de la pièce obtenue font de l'UGV un procédé de fabrication très compétitif.

1.4 Synthèse

Dans cette première partie de notre état de l'art, au regard des procédés actuellement utilisés, nous avons vu que la FA était un procédé de fabrication très jeune permettant de mettre en œuvre une large gamme de matériaux, mais dépendamment des machines utilisées. De plus, ce procédé permet de réaliser par un principe d'empilement de couches des pièces aux formes complexes qui peuvent être composées de plusieurs types de matériaux.

Malgré tous ces avantages, la réalisation de certaines pièces en FA n'est pas toujours pertinente. Il est nécessaire de concevoir les pièces avec une attention toute particulière afin d'obtenir le meilleur état de surface possible, des caractéristiques mécaniques satisfaisantes et une nécessité minimale de support dépendant, notamment, de l'orientation de la pièce, ce qui n'est pas le cas des autres procédés. De plus, certains matériaux tels que le bois ou le verre ne peuvent pas être mis en forme en FA. La FA est également un procédé de fabrication lent qui convient particulièrement bien aux pièces unitaires ou aux très petites séries et de dimensions restreintes à l'ordre du décimètre (Weller, Kleer, & Piller, 2015).

Cependant, et c'est le point le plus important, la philosophie de la FA est très différente des autres familles de fabrication. Bien que les procédés de fusion et de déformation plastiques viennent donner forme à de la matière, le volume initial est figé soit par le brut initial, tout comme pour l'enlèvement de matière, soit par la taille du moule. Ainsi, ces procédés restreignent nativement le volume de travail, soit par les outils utilisés, soit par le type de matière première. En revanche, dans le cas de la FA, la pièce est générée ab nihilo. On vient ajouter de la matière à celle déjà présente. Il n'y a donc théoriquement pas de limite à la forme de la pièce ni à sa complexité, bien qu'en pratique les dimensions de la machine imposent une taille limite à la pièce. Il s'agit donc d'un important changement de paradigme par rapport aux procédés conventionnels qu'il est nécessaire d'intégrer afin de pouvoir profiter au maximum des avantages de la FA. Nous reviendrons sur ce dernier point lors de la mise en relation des différentes méthodologies de conception existantes et des spécificités de la FA.

Section 2 Génération des modèles numériques

Dans la partie précédente, nous avons effectué un état de l'art sur les différents procédés de FA pour lesquels les avantages et les inconvénients ont été définis par rapport aux familles de procédés de fabrication conventionnels. Nous avons ainsi conclu que la FA venait apporter un nouvel éventail de solutions pour la fabrication de pièces complexes dans le cadre de très petites séries.

Dans cette partie, nous allons aborder la méthode de génération du modèle numérique de la pièce. En effet, du fait de la complexité des pièces à réaliser et des machines de FA, celle-ci sont à commande numérique. Il existe un format standard d'échange de données de pièce capable d'être généré par la majorité des logiciels permettant d'obtenir des modèles en trois dimensions : le format .stl. Ce format d'échange permet une transformation rapide du modèle de la pièce en un langage interprétable par la machine définissant chacune des couches de matière à générer.

2.1 Chaine numérique

La chaîne numérique est la même quelque soit le procédé de FA (Figure 11).

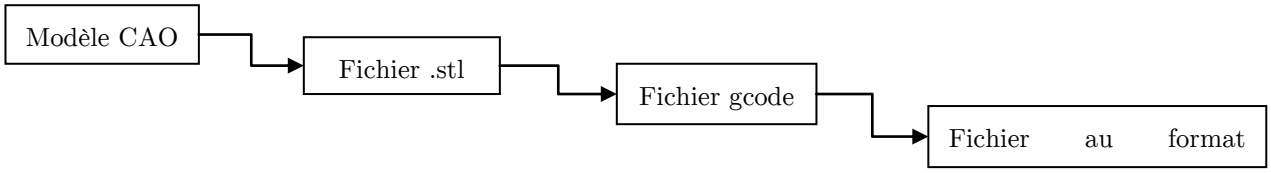


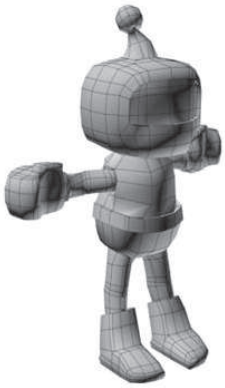
Figure 11 – Etapes de pour la réalisation d'une pièce en FA à partir d'un modèle numérique

La pièce est tout d'abord modélisée à l'aide d'un logiciel. La plupart sont des logiciels PC[17], mais certains logiciels commencent à apparaître sur tablette[18]. Le modèle obtenu doit impérativement être constitué d'un ou plusieurs corps volumiques dont la surface est une variété topologique[19] pour être intégré lors de l'opération de tranchage. Il n'y a aucune restriction sur la complexité de la pièce (Figure 12). En revanche, la pièce ne doit pas comporter de parties plus fines que l'épaisseur minimale d'une couche de matière que la machine peut déposer. Dans le cas contraire, soit ces volumes ne seront pas fabriqués par manque de précision, soit ils apparaitront avec des surépaisseurs liées à la résolution minimum de la machine, qui est une caractéristique physique imposée. Si la pièce à fabriquer est un assemblage indémontable, il faut également que le modèle numérique comporte des jeux entre les différents volumes.

[17] SolidWorks; Autodesk 123D Catch; Autodesk 3DS Max

[18] MakerBot Printshop (pour appareil mobile IOS) ; Autodesk 123D Sculpt+ (pour appareil mobile IOS et Android)

[19] Une variété est définie de la manière suivante : Soit V un espace topologique séparé à base dénombrable, on dit que V est une variété topologique si pour tout point x de V il existe un voisinage ouvert U de x, un entier naturel n et un ouvert U' de $\mathbb{R}^n$, tels que U et U' soient homéomorphes. Un fichier CAO validant cette définition présente donc une surface pour laquelle chaque point possède une sphère englobant contenant un unique volume de matière (la surface ne se recoupe pas en un point ou suivant une arête).



Personnage réalisé sous Autodesk 3DS Max

Modèle d'embrayage réalisé sous SolidWorks

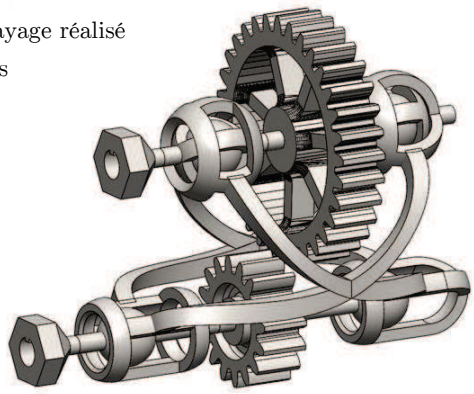


Figure 12 – Modèles 3D (modèle gauche réalisé par C. Cramard)

Une fois l'étape de conception/modélisation terminée, la pièce est exportée au format .stl. Bien que d'autres types de format soient disponibles en fonction du logiciel de modélisation utilisé (le .obj par exemple), il s'agit du format d'échange standard pour les logiciels de tranchage. Ce format convertit les surfaces de la pièce en triangles tout en conservant la normale extérieure. Les surfaces gauches sont donc facettées (Figure 13). Lors de la conversion au format stl, il est possible de régler le degré de discrétisation de la pièce afin d'obtenir une surface la plus proche possible du modèle initial. Bien qu'historique et défini comme un standard de fait (Jamieson & Hacker, 1995), ce format est toujours utilisé pour des raisons pratiques.

Figure 13 – Conversion d'une pièce CAO (gauche) au format .stl (droite)

Après la conversion du modèle au format .stl, ce nouveau fichier peut être analysé par un logiciel de tranchage. De même que pour les logiciels de modélisation, il existe aujourd'hui un panel de logiciels de tranchage disponibles sur ordinateur (MakerWare, ReplicatorG, Materialize). La pertinence varie selon le type de procédé utilisé. Ainsi, les logiciels MakerWare et ReplicatorG sont orientés FDM tandis que le logiciel Materialize est davantage adapté à la fabrication sur lit de poudre. La première étape du tranchage consiste à orienter la pièce par rapport à la direction de fabrication. La pièce est alors découpée par des plans parallèles équidistants perpendiculaires à la direction de fabrication. Chaque intersection entre un plan et le modèle définit le contour d'une couche de matière. Puisque les surfaces du modèle sont normées, il est facile de remplir les zones de matière. Dans le cas où la surface de la pièce n'est pas une variété topologique ou n'est pas close et comporte des trous, le tranchage peut conduire à des erreurs de reconstruction. Une fois toutes les couches de matière générées, le logiciel de tranchage propose nativement, si nécessaire, l'intégration de supports en vérifiant que la matière de chaque couche repose sur la matière de couche la précédente : celle de la pièce ou celle du support (Figure 6). Une fois l'opération de tranchage effectuée, un dernier fichier au format compatible avec la machine de FA est également exporté par le logiciel de tranchage. Certains logiciels imposent la génération intermédiaire d'un fichier au format Gcode entre le tranchage et l'export final vers la machine. A l'issue du tranchage, le concepteur dispose d'un retour visuel des différentes couches de la pièce afin de vérifier la conformité de la stratégie de fabrication. Les conversions successives de fichiers induisent des ruptures

dans la chaîne numérique qui nuisent au processus de conception de la pièce (Figure 14). Seul le modèle 3D est éditable, ainsi toute erreur sur les fichiers .stl ou Gcode nécessite une modification de la maquette numérique ainsi que de nouveaux exports qui ne sont pas toujours fiables. Des travaux sont menés sur des formats standards d'échange, tels que le STEP AP224, ayant pour but de rassembler à la fois les données de CAO et de FAO afin de limiter au maximum les ruptures de la chaîne numérique. On peut espérer que, dans les années à venir, les concepteurs auront à disposition des outils permettant le traitement intégré de toutes ces étapes.

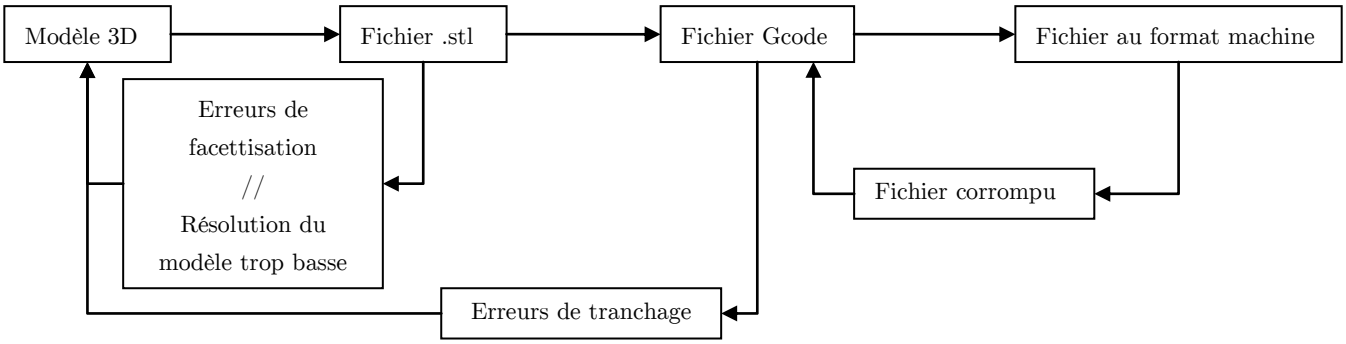


Figure 14 – Retours dans la chaine numérique

Les deux techniques de création de modèles pour la fabrication rapide sont la modélisation libre, dans un cadre artistique, et la conception assistée par ordinateur (CAO), dans un cadre industriel. Ces deux techniques peuvent être accompagnées du scan 3D qui permet l'acquisition numérique d'un objet physique. Il existe également des outils permettant la fabrication de pièces à main levée mais ce type de procédé ne permet pas de garantir le respect de la volonté du créateur en termes de géométrie globale de la pièce ou de tolérances dimensionnelles. Nous présenterons donc brièvement le scan 3D ainsi que la modélisation libre avant de nous intéresser plus particulièrement à la CAO.

2.2 Scan 3D et Modélisation libre

Une première méthode d'obtention du modèle numérique d'un objet consiste à réaliser une photographie en trois dimensions (Luhmann, Robson, Kyle, & Harley, 2006), ou scan 3D (Sagawa, Sakashita, Kasuya, & Kawasaki, 2012), de celui-ci. Cette technique impose de posséder au préalable un objet physique possédant les mêmes caractéristiques extérieures que celui à fabriquer. En effet, les techniques d'obtention du modèle ne permettent d'obtenir qu'une image extérieure de l'objet. Le scan 3D peut ensuite subir des modifications d'échelle ainsi que des modifications de formes, afin de l'adapter à une géométrie voulue.

Dans le cas de la photogrammétrie, qui est la technique de scan 3D la plus simple de mise en œuvre, l'utilisateur doit prendre un grand nombre de clichés de l'objet à modéliser, le but étant de couvrir toute la surface de l'objet tout en insistant sur les parties plus détaillées. Pour une même résolution, le nombre de photos varie proportionnellement avec la taille de l'objet. Une fois les photos réalisées, celle-ci sont traitées par un logiciel de reconstruction, tel que le logiciel 123D Catch d'Autodesk (Figure 15). Ce procédé permet la reconstruction de n'importe quel volume de matière, qu'il s'agisse d'objets ou de personnes, en se basant sur les ombres, les motifs communs et les lignes de la scène. Les textures sont conservées. Le modèle résultant est un ensemble de facettes texturées. Le nombre de facettes dépend de la précision souhaitée lors de la reconstruction et de la qualité des

photographies. Dans le cas du dépôt de matière, l'objet scanné peut donc être fabriqué avec ses couleurs d'origine (ou au moins des teintes proches)[20].

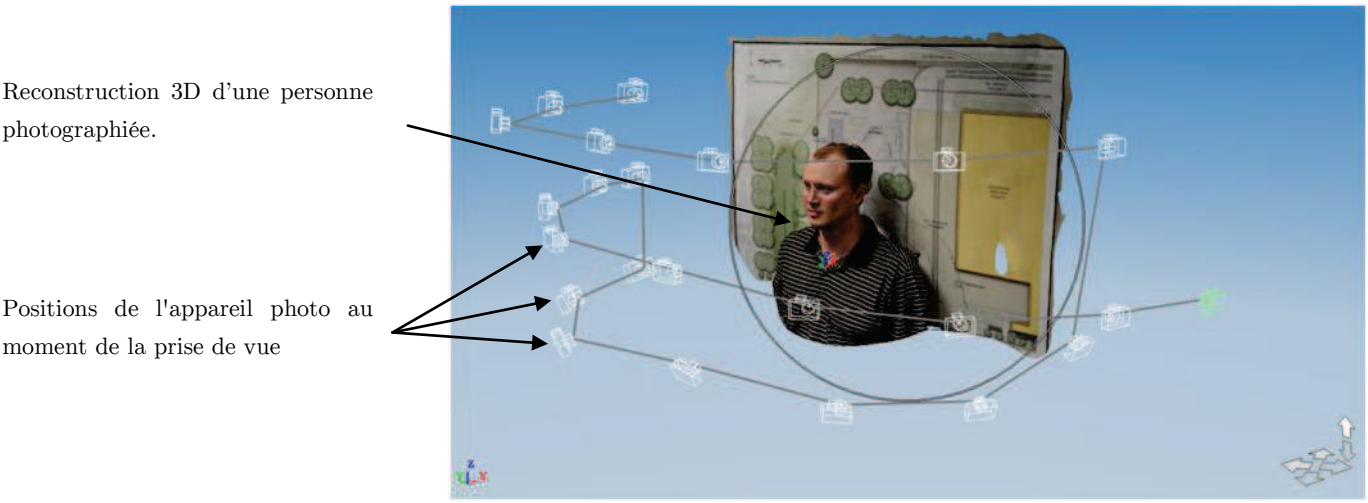


Figure 15 - Personne reconstruite en trois dimensions grâce au logiciel 123D Catch

D'autres techniques, passant par l'utilisation d'une machine à mesurer tridimensionnelle ou par un balayage laser de la pièce, permettent d'obtenir un modèle numérique sous forme de nuage de point, plus fidèle et de meilleure précision.

Les modèles obtenus présentent dans tous les cas des défauts. Une étape intermédiaire de nettoyage est donc nécessaire avant de pouvoir exporter le modèle au format .stl. Il s'agit d'une étape de retopographie. Cette étape peut être réalisée manuellement ou automatiquement. Le but est de restituer aux surfaces du modèle leur forme d'origine. Pour la photogrammétrie, cela consiste principalement à déformer le modèle en déplaçant les sommets des différentes facettes. Pour les autres méthodes de scan 3D, la pièce est construite en interpolant des surfaces à partir des positions des différents points. Afin d'obtenir une pièce conforme, il faut d'abord supprimer les points considérés comme des aberrations. En effet, dans le cas du balayage laser, il est possible que des sources lumineuses externes au procédé viennent perturber le scan. Une fois le nuage préparé, le modèle final est généré en modifiant les conditions d'interpolation suivant les zones de la pièce.

Une fois les surfaces de la pièce générées, celles-ci peuvent soit être exportées directement au format .stl, soit retouchées dans un logiciel de CAO ou de modélisation libre ou de CAO, que nous allons présenter. Un logiciel de modélisation libre se base sur une modélisation B-Rep (Foley, Dam, Feiner, Hughes, & Phillips, 1994). L'élément de référence pour ce type de représentation est le point (vertex). La liaison entre deux points forme un segment (edge). Un ensemble de trois segments reliés par leurs extrémités forme une face (poly) (Figure 16). L'ensemble de plusieurs faces connectées forme des surfaces dont l'assemblage permet la modélisation d'objets et de formes complexes (Figure 12). Nous considérerons donc comme tel tout logiciel permettant de modéliser un objet en éditant directement les coordonnées de chaque point définissant la surface d'un modèle. En théorie, il n'existe aucune restriction sur la méthode de modélisation d'un objet. Les surfaces peuvent donc être simplement disposées les unes à côté des autres ou peuvent s'intersecter de manière à donner l'illusion d'un objet. Pour ce type de logiciel, la notion de volume et de cote reste relativement abstraite. Bien que ce type de logiciel offre l'avantage de pouvoir modéliser très aisément des formes complexes du quotidien (visages, plantes, animaux, vêtements,...), dans la plupart des cas, celles-ci n'ont pas vocation à être fabriquées. En effet, les modèles sont souvent imprécis et sont

[20] http://www.impressions3d.com/2014/02/20/premier-photomaton-3d-a-paris/

surtout utilisés à des fins artistiques : conception de jeu vidéo, génération de rendus visuel, ajouts d'effets spéciaux dans des films,... Cependant, la modélisation s'effectuant sous forme de faces triangulaire, ce type de logiciel est tout à fait adapté à l'export de fichier au format .stl ainsi qu'à l'édition de nuages de points issus d'un scan 3D. Il est donc possible de réaliser, en prototypage rapide, des objets conçus à l'aide de logiciels de modélisation libre, la seule contrainte étant de former un ensemble de surfaces de type variété topologique.

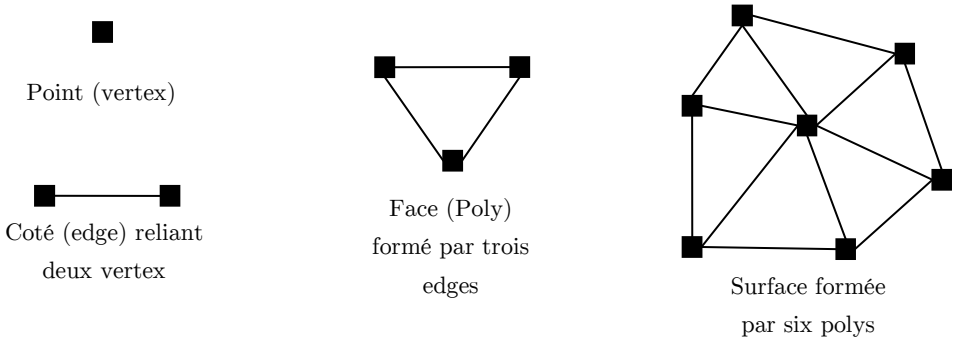


Figure 16 - Eléments de référence de la modélisation libre

2.3 CAO

Bien que le scan 3D et la modélisation libre permettent de générer des maquettes numériques, ces deux techniques ne sont pas adaptée à la conception de pièces pour la fabrication rapide. La dernière méthode de création de modèles numériques que nous traiterons dans cette partie est la conception assistée par ordinateur (CAO). Il s'agit du moyen le plus courant pour la modélisation de pièces dans le secteur industriel. Tout comme pour la modélisation libre, cette méthode requiert l'usage d'un logiciel. En revanche, la philosophie de modélisation est différente car très adaptée aux procédés conventionnels de fabrication de pièce : déformation plastique, fusion ou enlèvement de matière. Contrairement à la représentation B-Rep, les logiciels de CAO adoptent pour la plupart une représentation CSG (Requicha & Voelcker, 1977). Cette représentation se base sur la combinaison de volumes simples : union, intersection, soustraction et apporte plusieurs avantages à ce type de modélisation. Premièrement, les volumes générés sont pilotés par des cotes précises renseignées par l'utilisateur. Il est donc aisé de modéliser une pièce s'adaptant à des éléments existants et de s'assurer de sa fonctionnalité. Deuxièmement, la représentation CSG impose un historique à la modélisation (Figure 17). En effet, la pièce finale est le résultat d'opérations mathématiques non commutatives. Bien que cette construction soit contraignante, elle permet de modifier les formes existantes et les dimensions d'une pièce beaucoup plus simplement qu'en modélisation libre. Troisièmement, puisque la modélisation d'une pièce se base sur des volumes primitifs, la pièce finale sera composée d'un ensemble de volumes. Le cas le plus courant consiste à obtenir une pièce formée d'un unique corps volumique, représentant ainsi parfaitement la pièce physique à fabriquer. Dans le cas où l'utilisateur souhaite réaliser un assemblage indémontable, il est possible de modéliser une pièce composée de plusieurs corps volumiques distincts. En revanche, puisque la CAO utilise des primitives simples, il est plus difficile d'obtenir des surfaces libres si celles-ci ne répondent pas à des lois mathématiques.

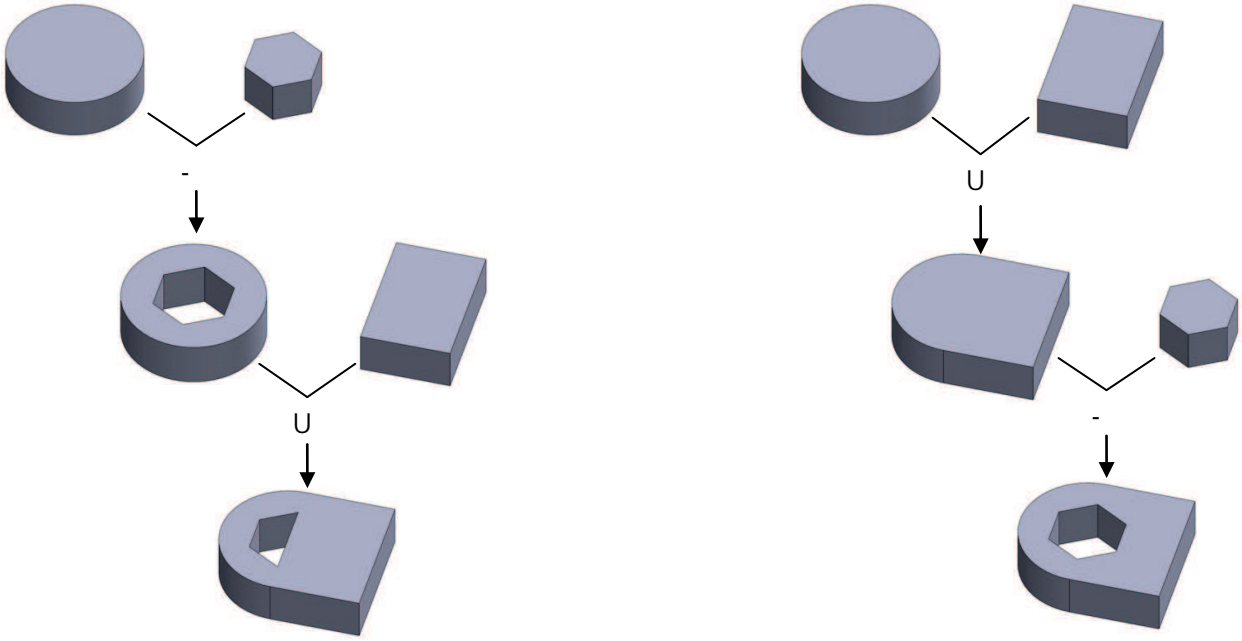


Figure 17 - Importance de l'historique de la représentation CSG

Tout comme pour les logiciels de modélisation libre, chaque logiciel de CAO permet l'export des fichiers au format .stl. La conformité du modèle est très facile à vérifier puisqu'il est composé de corps volumiques, donc d'un ensemble de surfaces closes. En revanche, la conversion d'un fichier CAO au format .stl impose une facettisation du modèle (Yan & Gu, 1996). Bien que le nombre de facettes soit réglable afin de respecter au mieux les courbes de la pièce, cette contrainte aura un impact sur l'état de surface final de la pièce (Figure 13). Dans tous les cas, cette technique permet la modélisation de n'importe quelle pièce dans le but d'une fabrication rapide. Il est toutefois important de noter qu'au delà de la possibilité pour les logiciel CAO de modéliser une pièce ou un assemblage, il est également fondamental de s'intéresser à la manière dont les pièces sont modélisées. En effet, notamment dans le cas qui nous intéresse de pièces complexes, chaque concepteur aura pour la même pièce une stratégie de modélisation différente. Cette situation diminue l'efficacité des systèmes de CAO au cours du développement de produit, car il diminue la réutilisabilité des modèles ainsi que la capacité des concepteurs à travailler sur les mêmes modèles (collaboration). En outre, il est nécessaire d'obtenir des modèles CAO robuste ce qui est une condition nécessaire au respect de la chaine numérique (Bodein, Rose, & Caillaud, 2014). Dans nos travaux nous ne traiterons pas de cet aspect de modélisation mais uniquement de l'aspect conception.

2.4 Synthèse

Au cours de cette partie, nous avons vu qu'une machine de FA réalise une pièce à partir d'un modèle numérique. Ce modèle peut être généré soit par scan 3D, soit par modélisation libre, dans le cas de prototypage rapide, soit par CAO, dans le cas de fabrication rapide, à l'aide d'un logiciel adapté. Une fois le modèle validé, c'est à dire n'étant composé que de corps volumiques, celui-ci est converti au format .stl afin de permettre le tranchage de la pièce par un second logiciel. Une fois la pièce tranchée, elle est enregistrée dans un fichier au format interprétable par la machine. La préparation de la pièce à fabriquer nécessite donc une chaîne numérique présentant plusieurs ruptures pouvant amener à un allongement du temps de conception.

De plus, la FA est un procédé jeune et qui présente des spécificités en rupture avec les procédés de fabrication standard : certains sont des avantages, comme la possibilité de travailler en multimatériaux, de créer des formes complexes et des assemblages indémontables ; d'autres apportent des contraintes supplémentaires, comme la

nécessité d'un support ou l'impact important de l'orientation de la pièce sur son aspect final ou sa résistance mécanique. Or, les logiciels de CAO actuels ne proposent que des outils de modélisation basés sur ces procédés de fabrication (enlèvement de matière, fusion et déformation plastique) et sont donc restreints quant à la représentation d'une pièce pouvant être réalisée par ajout de matière. Par exemple, il n'est pas encore possible d'associer de manière continue plusieurs matériaux à un même corps volumique. De même, l'intégration du support, qui est réalisée lors de l'opération de tranchage, ne peut pas encore s'effectuer de manière simple, lors de la phase de CAO. Bien que les outils de modélisation soient encore limités, le réel défi se place dans la réflexion menée par les concepteurs pour la réalisation de pièce en fabrication rapide.

Ainsi, il semble donc nécessaire d'appliquer une méthodologie de conception stricte lors de la création de la maquette numérique de la pièce afin de prendre en compte les spécificités de la FA dès les premières étapes de la conception, et d'en tirer avantage. Dans la partie qui suit, nous allons donc réaliser un état de l'art des différentes méthodologies de conception pour déterminer quelle méthodologie pourrait être la plus adaptée au procédé de FA.

Section 3 Méthodologies de conception et de reconception

La préparation du modèle numérique en vue de la réalisation d'une pièce par FA nécessite une méthodologie de conception permettant de considérer les spécificités de cette famille de procédés. Nous allons donc analyser et discuter la pertinence des différentes méthodologies de conception de pièce existantes pour lesquelles nous présenterons les avantages et inconvénients par rapport aux contraintes imposées et aux libertés permises par la fabrication additive.

Comme nous l'avons vu précédemment, La fabrication additive (FA) est un procédé de fabrication très prometteur en termes de possibilités de formes et de complexité de pièces. Il est possible de réaliser des pièces en multimatériaux (Muller et al., 2010), des pièces aux formes creuses, des pièces aux formes libres, voire des pièces combinant toutes ces spécificités. D'un point de vue écologique, certains procédés acceptent des matériaux recyclés, comme par exemple, l'ABS, qui peut être mis en forme par FDM et qui est un polymère thermoplastique. De plus, la FA est une famille de procédés qui est aujourd'hui utilisée dans divers secteurs industriels : médecine (Melchels et al., 2012), énergétique(Sun et al., 2013), travaux publics[21], aéronautique[22], joaillerie[23], automobile[24], manufacture d'armes[25], art[26], textile (Peng, Mankoff, Hudson, & McCann, 2015)... Néanmoins, comme nous l'avons vu au chapitre 1.2, l'orientation des pièces durant la phase de fabrication impacte leur résistance mécanique, l'état de surface final, et la nécessité d'intégrer du support. Ces éléments doivent également être pris en compte par la méthodologie de conception.

3.1 Structure d'une méthodologie de conception de pièce

Pour concevoir un produit, il est nécessaire d'adopter une méthodologie précise et cohérente (Segonds, 2011). Actuellement il existe un grand nombre de méthodologies dont la pertinence varie avec le ou les buts de la conception : assemblage, fabrication par usinage, coût de revient, qualité,... (Tomiyama et al., 2009). En fonction du domaine et du cas d'application, le formalisme des outils de conception peut changer, néanmoins, le modèle proposé par Howard et al (Howard, Culley, & Dekoninck, 2008) présente la structure générale du processus de conception de pièce (Figure 18). Ce modèle est basé sur la comparaison et l'analyse de 23 processus de conception. Il reprend notamment les modèles de Pahl et Beitz (Pahl & Beitz, 1984), de Hales (Hales, 1993) et VDI-2222[27].

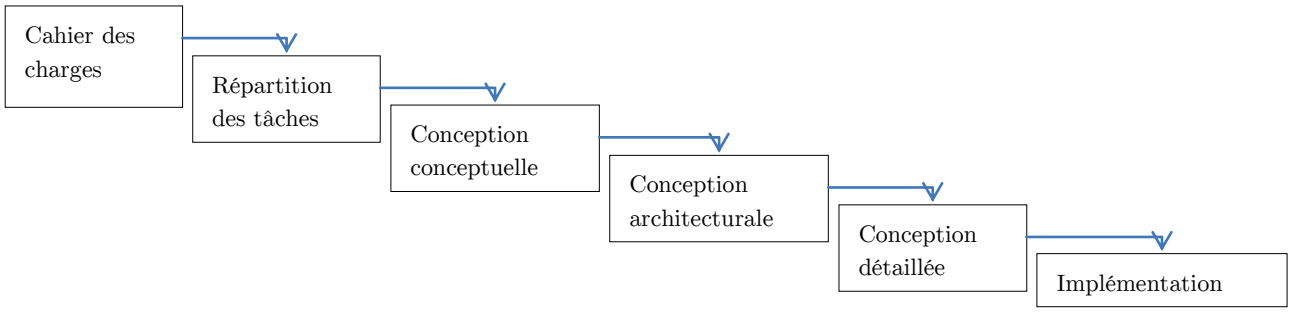


Figure 18 - Modèle général d'un processus de conception

[21] www.3ders.org/articles/20140414-new-photos-of-10-green-3d-printed-houses-in-shanghai-built-in-24-hours.html
[22] http://monash.edu/news/show/research-takes-centre-stage-at-international-air-show
[23] http://3dprintingindustry.com/2015/02/20/protofusione-3dz-3d-systems-jewelry-making/
[24] https://localmotors.com/3d-printed-car/
[25] https://www.solidconcepts.com/news-releases/worlds-first-3d-printed-metal-gun-manufactured-solid-concepts/
[26] www.shapeways.com/blog/archives/1952-revealing-dita-von-teese-in-a-fully-articulated-3d-printed-gown.html
[27] http://www.beuth.de/en/technical-rule/vdi-2222-blatt-2/549878

Le cahier des charges est un recueil des besoins du client. Il recense toutes les fonctionnalités qui seront nécessaires au produit ou à la pièce à concevoir. Chaque fonction est exprimée sous la forme d'un (ou plusieurs) critère(s) à respecter dont le niveau est donné par une ou plusieurs valeurs (une unité physique) ainsi que par une flexibilité. La flexibilité est définie par un niveau correspondant au degré de négociabilité de la valeur du critère :

- Flexibilité nulle F0 : niveau impératif
- Flexibilité faible F1 : niveau peu négociable
- Flexibilité moyenne F2 : niveau négociable
- Flexibilité forte F3 : niveau très négociable

Par exemple, prenons une étagère dont l'un des critères de conception répondant à la fonction principale « porter un charge », est « la charge à supporter ». La valeur associée à ce critère serait alors de « 10 kg maximum » pour une flexibilité F0. Il est également possible de renseigner des fonctions esthétiques pour lesquelles les critères peuvent ne pas avoir d'unité physique. Par exemple, pour la même étagère, on peut considérer la fonction hédonique« plaire à l'œil ». Dans ce cas, la valeur du critère sera : 80% de satisfaction lors d'un sondage demandant si l'objet est esthétique avec une flexibilité F1.

La répartition des tâches est une étape qui consiste à attribuer différents rôles aux personnes chargées de la conception : réalisation de la maquette numérique, validation des contraintes mécaniques, retour avec le client, analyse du marché,... Cela permet d'orienter la conception à partir du cahier des charges.

La conception conceptuelle vise à rechercher des principes de fonctionnement afin de définir un premier principe de solution. A ce stade, aucun choix n'est fait sur le détail des formes ou sur le choix des matériaux. Il s'agit simplement de trouver un concept permettant de répondre au cahier des charges.

La conception architecturale reprend les concepts trouvés précédemment afin de les agencer spatialement. On intègre donc les contraintes liées aux cotes et surfaces fonctionnelles ainsi qu'aux tolérances géométriques. Lors de cette phase, il est possible d'intégrer des éléments standard (vis, courroie, roulement,...) cependant, aucun dimensionnement n'est fait. Cette étape fournit donc l'architecture globale du produit.

La conception détaillée reprend les résultats de la conception architecturale afin de fournir une représentation exacte de chaque élément à concevoir. Les matériaux et les dimensions doivent être indiqués, ainsi que l'état de surface à obtenir. Typiquement, pour la conception d'une pièce, le résultat de la conception détaillée se présente sous la forme d'une maquette numérique complète et détaillée.

L'implémentation correspond à la préparation du système de production et à la fabrication de la pièce. Dans le cas de la FA, ceci regroupe à la fois le choix de la machine ainsi que le tranchage et la fabrication de la pièce.

Cette structure reprend les méthodologies de conception existantes telles qu'elles sont mises en place et utilisées actuellement dans l'industrie. Le cahier des charges est un outil robuste et éprouvé qui constitue un invariant. Il semble tout à fait pertinent de conserver cette brique dans le cas d'une méthodologie de conception orientée FA de manière à ce que celle-ci s'intègre aux processus existants. En revanche, les étapes suivantes correspondent davantage à de la conception réglée dans le cas de pièces simples. Or, les spécificités de la FA font que la conception d'une pièce pour la fabrication rapide ne peut se découper de manière aussi simple. En effet, les principes actuels de conception tendent à limiter le nombre de fonctions prises en compte par une pièce, bien souvent pour des raisons de fabrication ou d'assemblage. La possibilité de réaliser des pièces aux formes complexes, des pièces en multimatériaux et des assemblages indémontables tend à entremêler les phases de conception conceptuelle, architecturales et détaillées. Afin de ne pas restreindre les géométries de pièces à celles qu'il est

possible d'obtenir par les procédés de fabrication standard de conception, il est nécessaire d'apporter des éléments supplémentaires au paradigme actuel du concepteur.

3.2 Cadre de la méthodologie : choix de l'ingénierie intégrée

Nous pouvons distinguer deux grands cadres de mise en place des méthodologies de conception de pièces : l'ingénierie séquentielle et l'ingénierie intégrée (Ettlie, 1997). Ces cadres consistent en l'organisation du matériel et des ressources humaines pour réaliser la conception.

Dans le premier cas, la conception d'une pièce ou d'un produit se fait, comme son nom l'indique, étape par étape en suivant le principe « over the wall » (Figure 19). Chaque étape est réalisée par un service : forme, matériau, contraintes mécaniques,... et ne peut commencer sans que la précédente ne soit terminée. Ce processus de conception est donc relativement long et peu souple, ainsi, les erreurs de conception sont prises en compte seulement à la fin de chaque étape. Le temps de rebouclage entre chaque service pour apporter des modifications à l'objet à concevoir peut donc devenir prédominant sur le temps de conception.

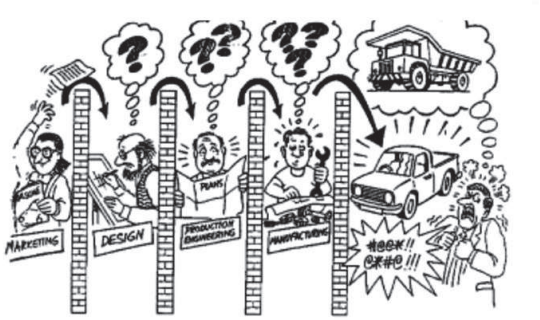


Figure 19 – Effet « Over the Wall » (source : (Ettlie, 1997))

Dans le second cas, la conception s'effectue de manière parallèle entre les différents services du bureau d'étude. Ceci permet donc de considérer au plus tôt tous les éléments de la conception afin d'anticiper d'éventuelles erreurs de conception à chaque choix effectué et d'apporter des correctifs le plus rapidement possible. Ce type d'ingénierie est d'autant plus intéressant que 70% du coût final sont induits lors la phase conception alors que seuls 5 à 7% sont réellement dépensés (Figure 20) (Perrin, 2011). C'est pourquoi l'ingénierie intégrée est toujours d'actualité (Boothroyd, Dewurst, & Knight, 2010).

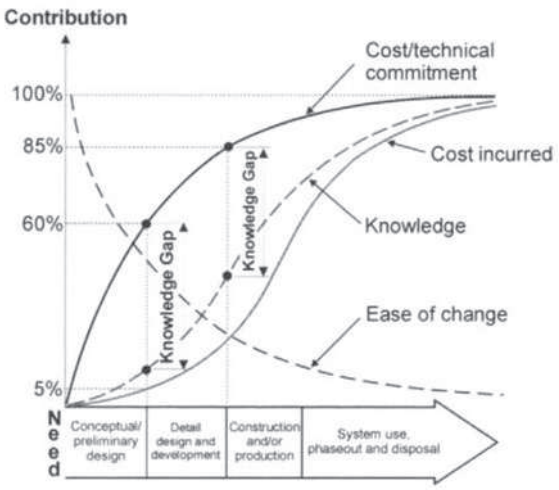


Figure 20 – Coûts engagés et coûts induits lors de la conception du produit (source : (Perrin, 2011))

L'ingénierie intégrée se base sur les méthodologies de conception pour l'X (DFX) qui permettent de prendre en compte les spécificités métier de l'équipe de conception.

3.3 Du DFX, DFA et DFM…

Concrètement, le *design for x* est la mise en pratique directe de l'ingénierie intégrée (Dowlatshahi, 1999). Il s'agit d'un ensemble de méthodologies dont le but est d'optimiser la conception du produit pour une de ses phases de vie (Kuo, 2001). Il existe donc le DFA (*Design for Assembly*), le DFM (*Design for Manufacturing*), le DFE (*Design for environment*), ... Les méthodologies les plus utilisées sont le DFA qui vise à concevoir un produit dans le but de valider et de faciliter son assemblage (Boothroyd & Dewurst, 1983) et le DFM dont le but est de concevoir des pièces réalisables à l'aide d'un ou plusieurs procédé(s) de fabrication particulier(s) (O'Driscoll, 2002).

Les méthodologies du DFA sont largement utilisées dans l'industrie afin de concevoir des produits faciles à assembler en utilisant des méthodes d'assemblage spécifiques afin de minimiser les coûts et les temps d'assemblage. Les méthodes de DFA les plus courantes sont la méthode Lucas DFA Evaluation Method (Redford & Chal, 1994), Hitachi Assemblability Evaluation Method (Ohashi, Iwata, Arimoto, & Mayakawa, 2002) et la portion DFA de la méthodologie Boothroyd-Dewhurst DFMA Method (Boothroyd, 1994). Ces méthodes sont utiles dans un contexte de fabrication de masse puisqu'elles visent à adapter le produit pour une méthode spécifique d'assemblage, mais ne tentent pas d'améliorer les fonctions et les performances du produit. Or, deux des avantages de la fabrication rapide sont justement de pouvoir limiter le nombre d'assemblages à l'aide de pièces en multimatériaux ainsi que la réalisation de formes complexes pouvant à la fois améliorer les caractéristiques d'une pièce et faciliter son assemblage. De plus, comme nous l'avons mentionné au chapitre 1.2.e, bien que la FA ne permette pas encore la réalisation de liaisons mécaniques de précision, il serait néanmoins intéressant d'étendre la portée de ces méthodes à la possibilité de réaliser des pièces directement assemblées en FA.

Les méthodologies de DFM visent à améliorer la fabricabilité d'une pièce par le biais de règles métier et d'indicateurs de conception. Ces indicateurs permettent au concepteur d'évaluer la fabricabilité de chaque surface des pièces (Eversheim & Baumann, 1991). Ceci permet donc d'effectuer une conception à la fois en accord avec le procédé le plus adapté et en accord avec les exigences du cahier des charges. Afin de définir plus en détail les méthodologies DFM, nous proposons de reprendre une classification s'axant autour de trois aspects : le type d'approche, la fabricabilité et l'interaction entre l'utilisateur et le système (Gupta, Regli, Das, & Nau, 1997), (Shukor & Axinte, 2009).

L'approche DFM peut être directe ou indirecte. Dans le premier cas, le modèle géométrique de la pièce est analysé de manière à indiquer les zones plus ou moins difficiles à fabriquer en fonction du procédé de fabrication choisi. Cela permet donc de générer pas à pas la gamme de fabrication de la pièce. Dans le second cas, l'approche repose sur la modification d'une gamme de fabrication existante afin de réduire le coût et/ou le temps de fabrication. Dans les deux cas, cela suppose que la géométrie de la pièce existe au préalable.

La fabricabilité d'une pièce est un indice qui peut être mesuré de quatre manières. Tout d'abord, il existe une mesure binaire : cette mesure se base généralement sur des critères géométriques, dimensionnels ou de qualité et permet de dire si oui ou non une pièce est fabricable. Il s'agit d'une mesure basique ne permettant pas de discriminer une solution plutôt qu'une autre. La seconde mesure est dite qualitative : on vient qualifier la fabricabilité d'une pièce à l'aide d'adjectifs tels que "facile", "peu facile", "difficile",... L'interprétation de cette mesure est difficile puisque basée sur des critères subjectifs. La mesure quantitative vise à comparer la fabricabilité de deux pièces à l'aide d'indices numériques pris sur une échelle commune. Ceci permet donc de classer les différentes solutions les unes par rapport aux autres. La difficulté réside ici dans la comparaison des indices. Enfin,

il existe la mesure directe qui se base sur une évaluation du temps et du coût de fabrication de la pièce. Ces valeurs sont très facilement compréhensibles par le concepteur pour savoir si une pièce est valide. En revanche, cette mesure ne propose pas de levier d'action pour modifier les valeurs estimées.

L'interaction entre l'utilisateur et le système correspond aux données d'entrées nécessaires à la méthodologie ainsi qu'aux données de sorties fournies par la méthodologie. Les données d'entrée sont très souvent présentes sous la forme d'une maquette numérique, d'un nuage de points, d'un graphe (Brissaud & Tichkiewitch, 200) et/ou, d'entités préétablies (Feng, Kusiak, & Huang, 1996), (Case, 2000). En revanche, peu de méthodologies partent directement de la définition du cahier des charges. Cependant, la conception peut réellement se faire sur des choix de fabrication uniquement si elle se base sur le cahier des charges. Les données de sortie correspondent à une évaluation globale de fabricabilité de la pièce. Il est alors possible de réaliser une analyse détaillée sur certaines zones de la pièce ou encore de réaliser des modifications de la géométrie de la pièce afin d'améliorer sa fabricabilité.

Dans le cas de la FA, la géométrie de la pièce n'est presque pas contrainte par le procédé de fabrication. Pour optimiser les pièces du produit vis à vis de l'assemblage et de la fabrication, le DFA et le DFM peuvent donc être effectués directement durant la conception sans générer de contraintes supplémentaires ou de modifications de la demande initiale de l'utilisateur final.

3.4 ...vers le DFAM

Actuellement, il existe deux catégories de méthodologies de conception orientées FA, inspirées du DFA. Ces méthodologies sont appelées DFAM pour *Design for Additive Manufacturing*.

Tout d'abord, nous avons les méthodologies dites de choix de procédés. Ces méthodologies visent, pour une géométrie donnée, à proposer le procédé de FA le plus adapté. Les critères permettant de décider quel procédé choisir sont généralement le temps et le coût de fabrication, l'état de surface atteignable ainsi que la résistance mécanique (Byun & Lee, 2004), (Armillotta, 2008). Pour chacun de ces critères, une valeur est donnée pour chaque procédé. Or, nous avons vu que ces critères dépendent fortement de l'orientation de la pièce, elle-même dépendante du volume utile de la machine. Ces méthodes d'aide à la conception sont donc relativement limitées. Il existe cependant des méthodologies hybrides visant à découper la pièce à concevoir en volumes restreints (Kerbrat, Mognol, & Hascoët, 2011), (Kerbrat, 2009), (Rivette, 2007). La géométrie de chaque volume est alors analysée indépendamment afin de sélectionner, là aussi, le procédé le plus adapté. Cependant, on revient toujours au problème de sélection d'un procédé de fabrication pour une géométrie donnée. D'autres méthodologies de choix de procédé se basent sur des caractéristiques de type contrainte, auquel cas le choix du procédé de fabrication se fait après que la maquette numérique de la pièce ait été réalisée. Le procédé est alors choisi en se basant soit sur des critères simples tels que le volume maximal fabricable (Bandera, Cristofolini, Filippi, & Toneatto, 2004), (Teitelbaum, 2009), soit en fonction de l'état de surface qu'il est possible d'obtenir (Byun & Lee, 2006). La pièce est alors orientée différemment mais son modèle n'est pas modifié. Seules quelques méthodologies permettent une modification locale de la géométrie de la pièce (Kerninon, 2010). Dans tous les cas, ces méthodologies restent très séquentielles et ne permettent de prendre en compte les avantages de la FA.

Il existe également des méthodologies se basant sur des caractéristiques de type opportunité (Rodrigue, Rivette, Calatoru, & Richir, 2011), (Xia & Wang, 2008). Ces méthodologies ont trois règles en commun : pas de limitation de forme, pas de limitation concernant l'aspect multimatériaux, la complexité géométrique de la pièce n'a pas de lien fort avec le coût. Ces méthodologies visent donc à optimiser la géométrie de la pièce en fonction du cahier des charges. On voit que ce type de méthodologie se rapproche fortement avec les spécificités de la FA évoquées en

01.1. De plus, cette approche apporte un réel changement de paradigme permettant d'explorer des nouvelles voies de conception.

Un travail récent et abouti concernant ce type de méthodologie est celui proposé par R. Ponche (Figure 21).

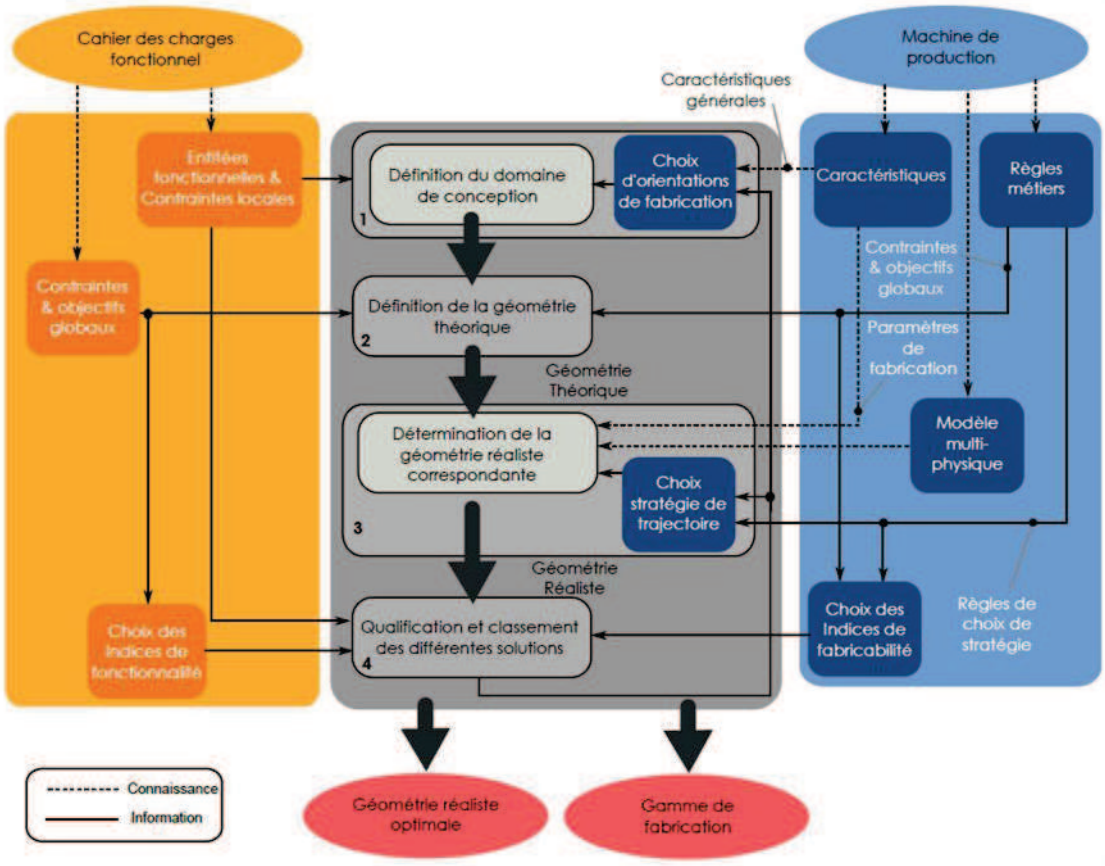


Figure 21 - Structure de la méthodologie de conception pour la Fabrication additive, application à la projection de poudre (source : (Ponche, 2013))

Cette méthodologie se décompose en quatre grandes étapes :

1. La définition du domaine de conception : le concepteur renseigne ici toutes les contraintes liées à la géométrie de la pièce ainsi que les surfaces fonctionnelles. Le domaine de conception comprend également les contraintes liées à la qualité de l'état de surface qui peut être obtenue grâce à la machine utilisée. Cette étape conduit à proposition d'un fichier CAO comportant un unique corps volumique.
2. La définition de la géométrie théorique : une optimisation topologique est effectuée sur le volume précédent à partir des contraintes d'efforts auxquels la pièce est soumise. Le concepteur en déduit donc le modèle idéal de la pièce à fabriquer.
3. La détermination de la géométrie réaliste correspondante : lors de cette étape, le concepteur effectue plusieurs simulations correspondant aux différentes stratégies de fabrication disponibles dans le but d'obtenir un modèle numérique qui s'approche le plus possible de la pièce réelle. La simulation dépend également des paramètres physiques qui entre en jeu lors de la fabrication de la pièce : températures, vitesses, composition du matériau, ...
4. La qualification et le classement des différentes solutions : suite aux simulations précédentes, le concepteur dispose d'un panel de géométries réalistes. Il est donc nécessaire, pour valider la conception, de déterminer

quel modèle semble le plus pertinent pour la fabrication de la pièce. Le choix du modèle s'appuie sur les contraintes du cahier des charges ainsi que sur la fabricabilité de la pièce.

Cette méthodologie est très intéressante, car elle reprend tous les avantages des méthodologies vues précédemment. Elle englobe à la fois les contraintes liées au cahier des charges et celles liées à la machine utilisée. De plus, pour chaque étape, les données nécessaires aux choix de conception sont soit liées aux connaissances du concepteur, qui a alors la main sur les choix de conception, soit liées aux informations connues : contraintes du cahier des charges, règles de conception, stratégie de conception,... Le rôle du concepteur est donc ici pleinement défini. Cependant, cette méthodologie est fortement orientée vers les procédés de projection de poudre, ce qui restreint sa portée. De plus, si la définition de la géométrie initiale de la pièce s'appuie sur les contraintes liées au cahier des charges, l'orientation de la pièce se base uniquement sur l'espace machine sans prendre en compte l'état de surface final de la pièce, avant parachèvement, ni la résistance mécanique de celle-ci. De plus, aucune information n'est fournie sur la sélection du matériau. Ainsi, il est possible que l'étape d'optimisation topologique ne puisse pas être solvable. Enfin, la génération du support est laissée au logiciel de tranchage, or nous avons vu qu'il était possible de réduire les coûts de fabrication en jouant sur ce paramètre. Là encore, la méthodologie proposée présente des pistes d'amélioration.

3.5 Optimisation topologique

La partie précédente fait apparaître un élément nouveau : l'optimisation topologique. Cette notion est fortement présente dans le DFAM grâce à la possibilité de réaliser des formes complexes en FA. En effet, la géométrie issue de l'optimisation topologique d'une pièce est difficilement réalisable via un procédé conventionnel. Afin de bien comprendre pourquoi l'optimisation topologique est celle utilisée en FA, il est nécessaire de présenter le concept d'optimisation en mécanique.

Actuellement, il existe trois catégories d'optimisation en mécanique : l'optimisation paramétrique, l'optimisation de forme et l'optimisation topologique (Kim, Querin, & Steven, 2002), (Allaire, 2006), (Roy, Hinduja, & Teti, 2008). L'optimisation paramétrique se base sur la structure existante de la pièce et vient modifier la forme de celle-ci en se basant sur les paramètres d'épaisseur, de courbure,... La géométrie finale est donc souvent proche de la géométrie initiale de la pièce et ne permet pas de proposer une solution réellement optimale. Ce type d'optimisation est principalement utilisé à la fin de la conception de produits ou de pièces (Bendsoe & Sigmund, 2003). L'optimisation de forme cherche à optimiser les contours de la pièce tout en conservant sa topologie. Ainsi, bien que ce type d'optimisation permette la génération de formes plus complexes, le résultat est encore très proche de la pièce initiale (Chang, 2001). L'optimisation topologique vise à adapter la topologie de la pièce aux contraintes imposées. Cette méthode propose donc davantage de possibilités quant à la géométrie de la pièce. Pour ce type d'optimisation, la pièce est décomposée en éléments qui valident ou non la présence de matière. En effectuant une succession d'analyses par éléments finis, les éléments inutiles sont enlevés étape par étape, découvrant la géométrie finale de la pièce. Généralement, cette géométrie est assez éloignée des modèles de pensée des concepteurs (Takezawa, Nishiwaki, Izui, & Yoshimura, 2006). L'exemple donné en Figure 22 illustre le résultat de l'optimisation topologique d'une équerre soumise à une charge de 50 N dans le but de minimiser la quantité de matière ainsi que la flèche au niveau de zone chargée.

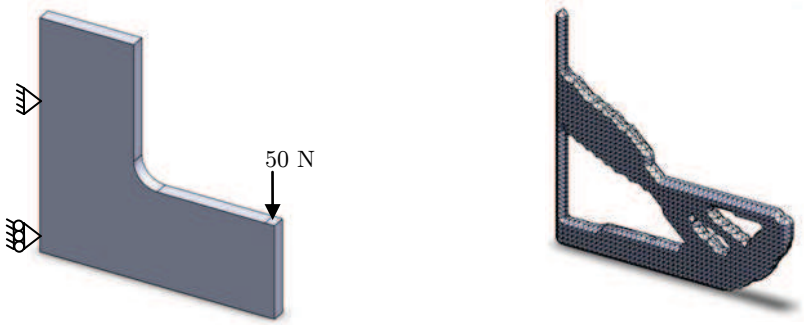


Figure 22 – Résultat de l'optimisation topologique d'une équerre

3.6 Synthèse

La FA impose plusieurs règles spécifiques dont le concepteur doit absolument tenir compte lors de conception de la pièce. Ces règles sont complexes car elles sont toutes interconnectées. Ainsi, la résistance mécanique dépend à la fois de la géométrie de la pièce, du matériau utilisé, mais également de l'orientation de la pièce lors de la conception. Or, l'orientation de la pièce dépend de l'état de surface souhaité et du volume utile de la machine. Et le volume utile de la machine dépend de la machine et donc des matériaux qu'il est possible de mettre en œuvre. Il est donc nécessaire que la méthodologie de conception choisie puisse supporter de nombreux choix de conception interdépendants.

De manière générale, le schéma des méthodologies de conception était descendant. Autrement dit, le point de départ est le cahier des charges. Une fois le CdC analysé, la conception de la pièce se fait de fait de plus en plus détaillée en partant du respect des fonctions pour arriver à la géométrie finale. Cependant, le concepteur est libre de faire intervenir les connaissances métier concernant la fabrication, l'assemblage, le recyclage des matériaux quand cela est nécessaire. Il existe cependant deux grandes catégories de méthodologies : les méthodologies séquentielles et les méthodologies intégrées. Or, seules ces dernières sont suffisamment flexibles pour permettre l'interdépendance de choix de conception. Parmi les méthodologies intégrées, nous avons notamment le DFM qui vise à optimiser la conception d'une pièce en fonction du procédé de fabrication, ce qui semble convenir pour la FA. Or, la plupart de ces méthodologies sont restreintes à une vision par contraintes. Le procédé est donc choisi en fonction de la géométrie de la pièce sans que celle-ci ne tire avantage des spécificités du procédé, ce qui est contraire au principe de FA. Plusieurs travaux ont donc été menés afin de proposer une méthodologie de conception pour la fabrication additive. Ces travaux apportent comme nouveauté la conception d'une pièce non plus contrainte par rapport à un procédé de fabrication, mais en accord avec tous les avantages proposés par ce procédé. Dans notre cas, il s'agit de la FA. La géométrie est donc générée à la fois à l'aide du cahier des charges et en fonction des connaissances du procédé : multimatériaux, supports, état de surface, complexité des formes, assemblages indémontables,...

Actuellement, seuls les travaux de R. Ponche proposent une base solide pour une méthodologie de conception orientée FA. Cependant, ces travaux sont fortement orientés vers le dépôt de matière par projection de poudre. De plus, certaines contraintes ne sont pas prises en compte. En effet, le matériau est imposé par le cahier des charges. Or, cette contrainte ne permet pas de profiter pleinement de la possibilité de générer des pièces en multimatériaux. De plus, si le matériau n'est mécaniquement pas valide, aucune solution n'est proposée pour sélectionner un matériau de substitution. Aucune étape ne permet d'ailleurs la validation de la pièce avant la phase d'optimisation topologique. Si la pièce n'est pas conforme, aucune solution n'est proposée pour assurer la fabricabilité de la pièce. Nous ajouterons également qu'il n'est pas possible de modifier le résultat de l'optimisation topologique. Or, dans un

souci de temps de fabrication, il peut être intéressant de modifier la géométrie de la pièce afin de limiter la présence du support.

Nous souhaitons donc proposer une méthodologie de conception de type DFAM proposant une structure élargie et prenant en compte un plus grand nombre de choix de conception, tels que la gestion du module d'Young, la validation du solide de départ via une analyse par éléments finis ou encore l'optimisation du support.

Section 4 Objectifs et motivations

Nous avons vu que la FA pouvait être représentée par trois grandes catégories de procédés ayant des caractéristiques propres qui affectent les propriétés des pièces ainsi réalisées. Nous avons également vu que la fabrication d'une pièce en FA se base nécessairement sur un modèle numérique pouvant induire des erreurs par rapport à la pièce souhaitée. Enfin, nous avons vu que les méthodologies de conception pour la réalisation de pièce en FA ne tiennent pas toujours compte des caractéristiques du procédé et du modèle numérique. Ainsi, nous souhaitons évaluer les besoins d'une méthodologie de conception adaptée à la réalisation de pièces en FA en tenant compte des caractéristiques des procédés et en limitant les ruptures de chaine numérique.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1.1, une fois le procédé et la machine de FA choisis, la partie matérielle du système de fabrication reste inchangée quelle que soit la pièce à fabriquer. Contrairement aux autres familles de procédés de fabrication, il n'y a donc pas de changement d'outil. Ceci donne un très grand avantage au concepteur : la modulabilité des pièces à fabriquer. Pour une pièce donnée, il est possible de modifier légèrement la géométrie ou la complexité des formes sans changer le moindre élément de la machine de fabrication. Un avantage par rapport à l'enlèvement de matière est de ne pas se préoccuper ni du passage ou de l'encombrement, ni de l'usure d'un outil de coupe. De même, contrairement au procédé de fonderie, il est possible de réaliser de très petites séries de pièces semblables sans se préoccuper de l'amortissement financier ou du réusinage d'un moule. De plus, contrairement aux procédés d'enlèvement de matière ou de déformation, les pièces n'étant plus fabriquées à partir de bruts, il n'y a plus de problèmes de tolérances géométriques liés à la mise en position d'une pièce. D'un point de vue écologique, cela se traduit également par une consommation de matière au plus juste et une suppression des pertes par copeaux. Dans le meilleur des cas, où la pièce est réalisée sans support, le volume de matière consommé correspond exactement au volume final de la pièce. La FA permet donc de gagner un temps précieux entre la réalisation de deux pièces, aussi bien au niveau de la machine que de la pièce en elle-même (Figure 23). Il est envisageable de reverser en partie ce temps gagné sur la phase de conception afin de prendre en compte et de profiter des spécificités de la FA : multimatériaux, assemblages indémontables, support, géométrie complexe et orientation.

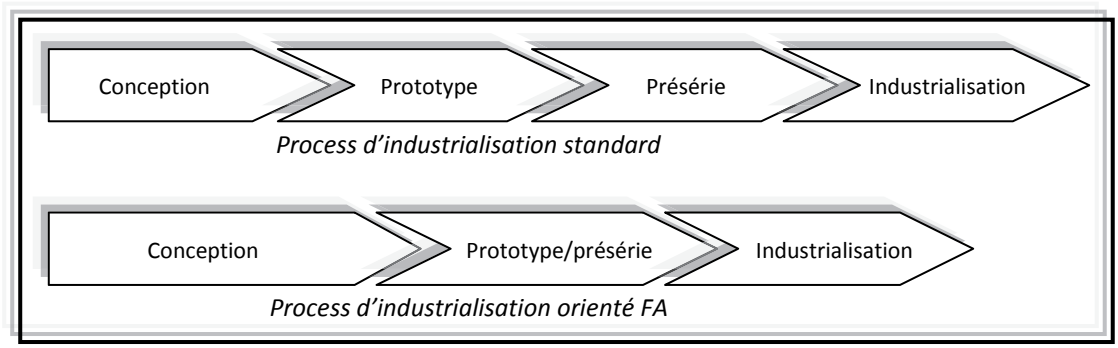


Figure 23 - Potentielle augmentation du temps alloué à la phase de conception grâce à la facilité de mise en place des moyens de production

Nous avons vu que l'orientation d'une pièce influence les caractéristiques mécaniques et l'état de surface. Il est donc nécessaire que le concepteur puisse anticiper les comportements de la pièce ainsi que les défauts qui apparaitront afin de valider la maquette numérique.

Ainsi, lors de la conception il faudra tenir compte des points suivant pour la génération des surfaces fonctionnelles :

- La surface est-elle fonctionnelle ?
- Quelle sera la déformation de la surface obtenue ?
- Quelle est l'épaisseur à donner pour que le parachèvement soit possible ?
- Le matériau utilisé permet-il un état de surface répondant au besoin ?

Il faudra également que le concepteur puisse répondre à ces questions lors de la validation mécanique de la pièce :

- Quelles sont les contraintes mécaniques appliquées à la pièce ?
- Quel impact l'orientation de la pièce a sur la résistance mécanique ?
- Est-il possible d'améliorer la résistance mécanique de la pièce ?
- La pièce résiste-t-elle aux efforts qui lui sont appliqués ?

Dans le cas où l'état de surface imposé par le cahier des charges ne peut être atteint à l'aide du procédé de FA sélectionné, par exemple, dans le cas où un matériau spécifique correspondant à une certaine catégorie de machines doive être mis en œuvre, une phase de parachèvement sera nécessaire. Cependant, cette opération est contrainte par la géométrie de la pièce. En effet, si la rectification de la surface extérieure d'une pièce peut être réalisée sur une machine d'usinage, celle des surfaces intérieures est contrainte par l'accessibilité de l'outil utilisé. De plus, dans le cas d'un procédé de parachèvement chimique, tous les matériaux ne sont pas éligibles. Il est donc nécessaire de vérifier les conditions suivantes lors de la conception de la pièce :

- Un procédé de parachèvement est-il possible sur la pièce ?
- Quelles surfaces peuvent être rectifiées par le procédé ?
- Le procédé a-t-il un impact sur la tenue mécanique de la pièce ?
- Le procédé a-t-il un impact sur l'intégrité de la géométrie de la pièce ?

Comme nous l'avons vu dans la section 1.2.d, les procédés de fabrication additive permettent la réalisation de pièces en multimatériaux, que ce soit pour apporter de nouvelles caractéristiques aux pièces ou pour réaliser le support dans une autre matière (Nowotny, Scharek, Beyer & Richter, 2007). Néanmoins, la conception de ces pièces d'une nouvelle génération ne peut s'effectuer sans un minimum de connaissances et de règles concernant les matériaux. Par exemple, il est impossible de faire adhérer du téflon à un autre matériau sans passer par des procédés de fabrication spécifiques. Il sera donc nécessaire de constituer une base de données des matériaux compatibles pour la FA, d'établir des règles de liaison entre les matériaux et de rendre toutes ces informations disponibles aux concepteurs. Ainsi, de la même manière que des règles sont établies pour la longueur, le diamètre et le nombre de filets en prise d'une vis, de nouvelles règles seront nécessaires pour le gradient de changement de matière d'une pièce à une autre (Figure 24). Chaque technique de fabrication en multimatériaux devra répondre à des règles spécifiques qui dépendent des diverses contraintes liées au matériau et à la géométrie des pièces.

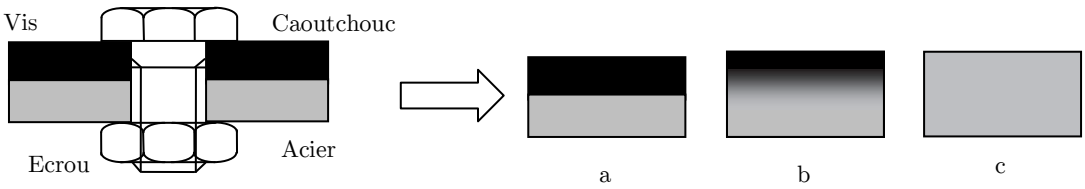


Figure 24 - Comment traduire un assemblage mécanique en FA : collage simple (a), frontière en gradient (b) ou matériau homogène (c) ?

Ainsi, on voit se dessiner plusieurs questions auxquelles devra répondre le concepteur :

- Peut-on créer une pièce en multimatériaux par strates successives empilées les unes sur les autres ?
- Peut-on générer un gradient de matériau dans la masse ?
- Faut-il générer des formes imbriquées indémontables ?
- Les matériaux sont-il compatibles ?
- Le procédé d'assemblage permet-il de garantir la conservation des caractéristiques des matériaux assemblés ?

Ce qui risque de bouleverser le plus la vision des concepteurs est la présence de support au moment de la réalisation d'une pièce. Ce support n'est en aucun cas fonctionnel pour la phase d'utilisation de la pièce. Son rôle est de maintenir la matière en position lors de l'impression. Or, le placement du support est directement pris en compte, et de manière automatique, par les logiciels de tranchage. De plus, le volume du support n'est souvent pas optimisé, ce qui augmente les temps de fabrication et de nettoyage de la pièce. De manière à limiter la quantité de support à fabriquer, son intégration doit être prise en compte au moment de la création de la maquette numérique de la pièce. Cette contrainte soulève deux problèmes.

Premièrement, il faut optimiser le placement du support : cela revient à orienter la pièce de manière à ce que le support ne génère pas un défaut de surface (auquel cas la pièce obtenue ne sera pas conforme) et ne pas en placer là où il est inutile (de manière à réduire la consommation de matière et les coûts de fabrication).

Deuxièmement, une fois que le placement du support a été prévu de manière optimale, il faut tenir compte de son extraction. Ainsi, les volumes creux fermés sont à proscrire. Les supports y seraient enfermés sans possibilité de retrait. Les zones où le support est présent doivent aussi être facilement accessibles pour limiter la durée et la pénibilité du nettoyage. Il faut également prendre en compte le matériau qui compose le support et les techniques chimiques ou physiques qui permettent de le détruire. Par exemple, si le support utilisé est du sel, le moyen évident pour nettoyer la pièce est de la faire tremper dans l'eau (technique chimique). Le processus de dissolution peut être accéléré à l'aide d'ultrasons (technique physique). Cependant, ce procédé ne convient pas aux pièces en acier oxydable.

C'est donc au regard de ces deux contraintes qu'une méthodologie de conception apporte une plus value notable par rapport aux logiciels de tranchage existants.

Enfin, dans une démarche d'écoconception, il est préférable de tenir compte de l'étape de fin de vie du support avant la mise en fabrication de la pièce. Le support utilisé peut perdre certaines de ses caractéristiques une fois la pièce fabriquée, le rendant non-recyclable. Par exemple, pour le procédé de FDM, le support utilisé est chauffé puis refroidi afin de prendre la forme souhaitée. S'il s'agit d'un polymère thermoplastique, il est possible de le fondre afin de l'utiliser à nouveau. A l'inverse, s'il s'agit d'un polymère thermodurcissable, alors le support utilisé est perdu.

Quatre questions se posent donc :

- Y a-t-il besoin de support ?
- Comment optimiser le placement du support ?
- Comment séparer le support de la pièce ?
- Comment récupérer et recycler le support ?

Le dernier point important est la conception d'assemblages réalisés en une seule impression. Comme indiqué en section 1.2.e, nous ne considérons que les assemblages disposant de parties mobiles les unes par rapport aux autres. Or, pour qu'une pièce puisse être en mouvement par rapport à une autre, il est nécessaire d'avoir un jeu précis entre ces deux pièces. Puisque les pièces sont réalisées lors d'une même phase d'impression, le jeu n'est plus réglable une fois la pièce fabriquée. De plus, pour que les deux pièces puissent être imprimées, il sera certainement nécessaire de déposer du support entre ces deux pièces (Figure 25).

On voit donc apparaître une contrainte importante entre le matériau utilisé pour générer le support, la méthode employée pour l'enlever après impression et le jeu généré entre les pièces mobiles. Il est crucial pour les concepteurs

de bien maîtriser ce point de manière à ne pas générer des défauts dans les assemblages qui pourraient générer une usure prématurée ou un dysfonctionnement du système mécanique.

Les questions à se poser sont :

- Quelle est l'épaisseur minimale de support admissible ?
- Comment extraire le support sans détériorer l'assemblage ?
- Comment garantir l'ajustement entre les pièces ?
- L'assemblage est-il possible compte-tenu des contraintes fonctionnelles et de fabrication ?

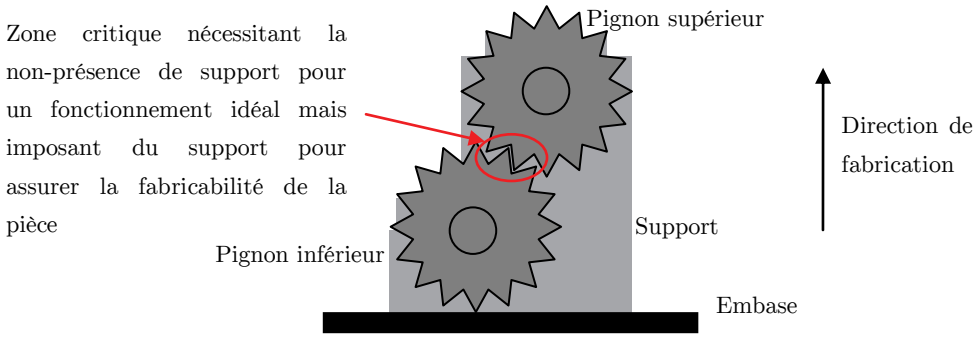


Figure 25 - Exemple de situation critique pour l'assemblage de deux pignons réalisés en FA

Section 5 Synthèse

Dans cette partie, nous avons donc exposé les différentes étapes pour la réalisation d'une pièce en fabrication additive. Nous avons également exposé les différents domaines pour lesquels la FA présente un réel potentiel ainsi que les multiples manières d'obtenir un modèle numérique. Cependant, nous avons montré qu'il existe diverses limitations concernant l'impression des pièces : non-mixité des matériaux, résolution de la machine, dimensions de l'espace de travail, complexité des formes, intégration et retrait du support,... Si ces limitations peuvent être partiellement éludées pour le prototypage rapide, il est nécessaire d'obtenir une pièce conforme pour de la fabrication rapide ou de l'outillage rapide. Pour garantir la conformité d'une pièce, il existe trois leviers d'actions qui sont :

- Les matériaux utilisés ;
- La machine mise en œuvre ;
- La conception de la pièce.

Il faut cependant garder à l'esprit que ces trois leviers sont complémentaires.

Dans cette thèse, nous traitons le troisième de ces leviers en proposant une méthodologie de conception pour la réalisation de pièces en fabrication additive. Etant donné le panel des procédés, nous focaliserons notre étude sur le procédé FDM. En effet, ce procédé peut être utilisé aussi bien pour du prototypage que pour de la fabrication directe. C'est également l'un des seuls procédés de fabrication additive à être déployé actuellement aussi bien dans le secteur industriel que dans le domaine du grand public. Il semble donc d'autant plus pertinent d'apporter un outil commun de conception pour un procédé utilisé par un aussi vaste panel de concepteurs.

L'organisation de cette thèse est la suivante. Dans un premier temps, Nous proposerons une méthodologie de conception pour la réalisation de pièce en fabrication additive orientée pour FDM en veillant cependant à ce que

cette méthodologie puisse être enrichie par la suite pour être valable dans le cas de réalisation de pièce à l'aide d'autres procédés de FA. Dans un second temps, nous verrons comment intégrer les supports de la pièce lors de la phase de conception. Le but est de proposer un outil au concepteur lui permettant d'anticiper les défauts de formes et de minimiser le temps et la matière consommée directement dans le modèle CAO. Nous validerons notre hypothèse à l'aide d'une première expérimentation dont nous intégrerons les résultats à notre méthodologie. Nous traiterons également l'hypothèse selon laquelle il est possible d'effectuer un traitement de surface contrôlé sur des zones inaccessibles par des machines conventionnelles. Nous vérifierons également que ce procédé n'impacte pas la tenue mécanique des pièces produites. Pour ceci, nous proposerons un modèle basé sur un plan d'expérience. Les résultats obtenus seront également intégrés à notre méthodologie de conception. Nous conclurons enfin sur l'apport de nos travaux dans le cadre de la conception de pièces pour la FA.

Chapitre III Méthodologie de conception

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, la fabrication additive est un procédé pour lequel les notions de géométrie, de matériau et d'état de surface sont très fortement interdépendantes. De plus, ce procédé permet trois libertés supplémentaires par rapport aux procédés de fabrication conventionnels, à savoir la réalisation de pièce en multimatériaux (Mognol, Muller, & Hascoet, 2011), (Muller et al., 2010), la réalisation d'assemblages indémontables et la réalisation de formes creuses aux géométries complexes. Ainsi, le chapitre précédent a montré qu'il était nécessaire, non pas d'adapter les méthodologies de conceptions existantes pour les procédés conventionnels à la FA, mais bien de proposer une méthodologie de conception définie pour la réalisation de pièces en fabrication additive.

En effet, la conception d'une pièce pour la réalisation en FA ne peut pas se rapporter à la conception d'une pièce pour la réalisation via un procédé conventionnel. La philosophie du concepteur est de produire une pièce de qualité répondant aux exigences du client, exprimées par le cahier des charges. De plus, les procédés de fabrication conventionnels mettent généralement en place des matériaux uniques, connus et réputés homogènes, linéaires et isotropes. Ainsi, la conception d'une pièce vise à définir la géométrie de la pièce, puis de lui affecter un matériau permettant de satisfaire les contraintes mécaniques et, enfin, de constituer une gamme de fabrication pour sa réalisation. Or, l'utilisation de la FA amène à réviser ce paradigme. A cause de la génération de volume en couche par couche, comme nous l'avons vu dans l'état de l'art, la tenue mécanique de la pièce à fabriquer dépend de son orientation lors de la phase de fabrication. Cependant, chaque machine de FA dispose d'un volume de travail différent dont les dimensions ne sont pas égales. L'orientation de la pièce conditionne donc ses dimensions. On voit donc apparaitre une rupture avec la conception pour les procédés de fabrication conventionnels : la définition de la pièce est désormais en partie pilotée par la machine de fabrication. De plus, chaque machine ne peut mettre en œuvre qu'un nombre très restreint de matériaux, dépendant du procédé choisi. Là encore, un nouvel axe de différenciation se forme : les choix de la machine et du matériau sont interdépendants. Numériquement, la validation mécanique de la pièce ne peut se faire qu'à partir d'un solide et d'un matériau aux propriétés connues. Or, on voit clairement que ces deux données ne peuvent être obtenues qu'après le choix de la machine de fabrication. Ainsi, les paradigmes de conception actuels ne peuvent être transposés directement pour les procédés de FA.

Il existe déjà plusieurs modèles de reconception de pièce pour la FA (Rodrigue, 2010), (Hascoët, Ponche, Kerbrat, & Mognol, 2011), (O. Kerbrat et al., 2011) pour lesquels le concepteur dispose d'un modèle CAO à optimiser, mais peu de modèles de conception (Ponche, 2013) prenant directement appui sur le cahier des charges. En effet, la reconception d'une pièce implique un travail amont de conception dont le résultat ne satisfait pas ou plus le cahier des charges. Bien que ce travail soit nécessaire dans le cas de pièces non conformes, il implique un important coût en temps de conception. De plus, la reconception d'une pièce se base dans la plupart des cas sur la géométrie précédente de celle-ci. Les libertés de conception sont donc bridées par les choix de géométrie, de fabrication ou d'assemblage précédents. Dans le cas où il est possible de repartir de la définition du cahier des charges, nous considérons qu'il s'agit d'un travail de conception. En effet, bien que le but soit de reconcevoir une pièce existante, le résultat n'est piloté ni par la géométrie de la pièce, ni par le procédé de fabrication, ni par le matériau utilisé.

Ainsi, le concepteur peut proposer une nouvelle pièce sans idée préconçue. C'est dans cette optique que nous souhaitons proposer une méthodologie de conception. Le modèle que nous avons présenté s'adapte aux outils de conception existants et présente une base de travail pertinente. De ce fait, nous souhaitons proposer une méthodologie de conception ayant un champ d'action plus large et prenant en compte les spécificités de la FA ainsi qu'une analyse plus poussée de la pièce lors de la conception. Notre méthodologie repose sur les connaissances issues du cahier des charges fonctionnel, ainsi que sur toutes les données concernant le procédé de FA. Toutes ces informations sont portées aux concepteurs tout au long de la conception. En effet, le cahier des charges est un document consultable en permanence. De plus, les données relatives aux procédés de FA sont consignées dans des abaques (finition de surface, épaisseur de strate, matériaux compatibles, angle minimum de construction), dans la documentation relative aux machines (machines disponibles, matériaux possible, vitesse d'extrusion et de déplacement) ou directement dans le logiciel de CAO (génération de support). A ce jour, bien que la plupart de ces informations soient à la disposition des concepteurs, peu sont effectivement utilisées. Nous souhaitons donc proposer une base de travail favorisant l'utilisation pertinente de ces données afin de réaliser un travail de conception le plus conforme possible au cahier des charges et mettant au maximum à profit les connaissances métier.

Le but de la méthodologie est de produire un livrable sous forme d'un modèle numérique tranché prêt à être fabriqué sur une machine de FA avec comme point de départ l'expression fonctionnelle du besoin et en prenant en compte le process. Notre méthodologie est donc axée autour de la génération et de la modification, par étapes successives, d'une maquette CAO.

Dans ce chapitre, nous allons décrire de façon détaillée les différentes étapes de la méthodologie que nous proposons. Pour illustrer nos travaux, le déroulement se basera sur la conception d'une pièce répondant à un besoin industriel.

Section 1 Cas d'étude

Comme cas d'étude, afin d'illustrer et de valider la méthodologie que nous proposons, nous avons choisi de travailler avec une pièce réelle, qui correspond à une grille de perçage servant à positionner un outil de fraisage (Figure 26). Actuellement, cette pièce est réalisée sur mesure par enlèvement de matière dans un brut d'aluminium et doit être conçue, validée, réalisée et livrée dans les vingt-quatre heures suivant la commande. Cependant, il arrive que ce délai ne soit pas toujours respecté, ce qui entraine un arrêt de production des pièces nécessitant cette grille de perçage et donc des pénalités de retard. Le souhait est donc de vérifier si cette pièce est réalisable sur une machine de type FDM (disponible au sein de l'entreprise) afin de disposer d'une grille de perçage temporaire, disposant des mêmes propriétés mécaniques, spécifications fonctionnelles et contraintes d'état de surface que la grille initiale, mais qui devant résister à un nombre de cycles d'utilisation beaucoup plus faible dont la période servira à couvrir la livraison de la grille en aluminium. Ainsi, le but de cette grille temporaire est de maintenir la production de pièces par l'entreprise.

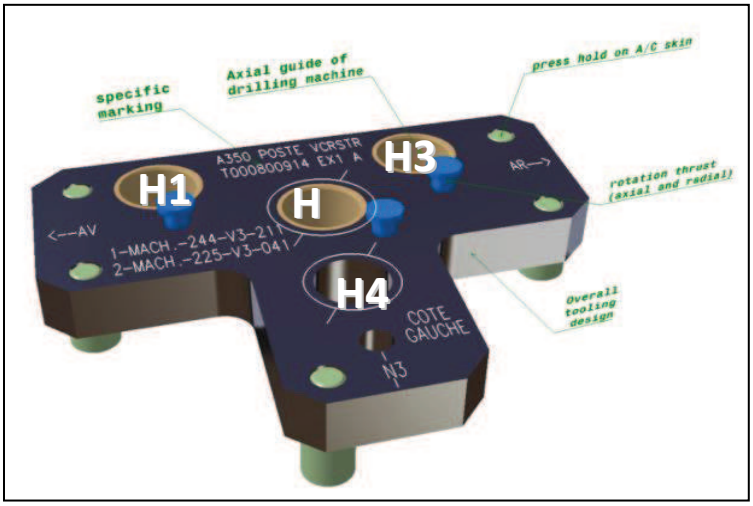


Figure 26 – grille de perçage

Les différentes contraintes issues du cahier des charges auxquelles nous devons répondre sont les suivantes :

- Les contraintes géométriques de positionnement des différents perçages sont fournis en Figure 110 - Mise en plan de la pièce à concevoir de l'annexe 1 ;
- La pièce doit permettre l'insertion de coussinets de guidage de l'outil de perçage au niveau des perçages H1, H2 et H3 ;
- La pièce doit permettre l'insertion de vis de verrouillage standard fournies par l'entreprise ;
- La longueur des perçages doit être de 20 mm ;
- Pour les vis de verrouillage, la pièce doit résister à un effort axial de 120 daN et à un effort radial de 250 daN ;
- Pour les perçages H1, H2 et H3, la pièce doit supporter un effort radial de 37 daN ;
- Pour les perçages H2, H3 et H4, la pièce doit résister à un effort de axial de 500 daN ;
- Les déformations et les efforts internes de la pièce ne doivent pas dépasser ceux d'une pièce répondant à ce cahier des charges mais réalisée en alliage d'aluminium, soit, respectivement, 0,0931 mm et $1{,}29.10^{8}$ N/m².
- Les différents perçages seront à réaliser avec une tolérance dimensionnelle au dixième de millimètre.

Une fois la pièce réalisée, elle devra répondre aux phases d'utilisation suivantes (cf. Figure 26) :

1. Installer les vis de fixation en H2 et H4 ;
2. Percer en H1 ;

3. Percer en H3 ;
4. Retirer la vis de fixation de H2 ;
5. Installer une vis de fixation en H3 ;
6. Percer en H2 ;
7. Retirer les vis de fixation en H3 et H4.

Pour notre cas d'étude, nous appliquerons notre méthodologie dans le cadre de la reconception d'une pièce existante. Ce choix est motivé par un gain de temps en traduction des contraintes géométriques à partir du cahier des charges. En effet, nous nous baserons sur le modèle CAO fourni par l'entreprise afin de s'assurer que les différents perçages soient bien positionnés. Cela nous permettra également d'avoir les modèles numériques des éléments extérieurs à la pièce afin de s'assurer de leur montage. Enfin, le fait de reconcevoir une pièce nous permettra de comparer la pièce initiale et la pièce conçue à l'aide de notre méthodologie en termes de prix, de masse, de temps de fabrication et de temps de livraison. Maintenant que l'analyse du cahier des charges est effectuée, nous pouvons passer à la première étape de notre méthodologie, à savoir le choix du matériau.

Section 2 Schéma de synthèse de la méthodologie

La Figure 27 présente le schéma de synthèse de la méthodologie que nous proposons. Ce schéma sera explicité et détaillé dans les parties suivantes, étape par étape, par le déroulé de la méthodologie sur le cas d'étude présenté précédemment. La méthodologie est composée de trois sections, la première amenant à la génération d'un premier solide, la seconde ayant pour but d'optimiser ce solide et la dernière visant à obtenir une pièce réalisable en FA.

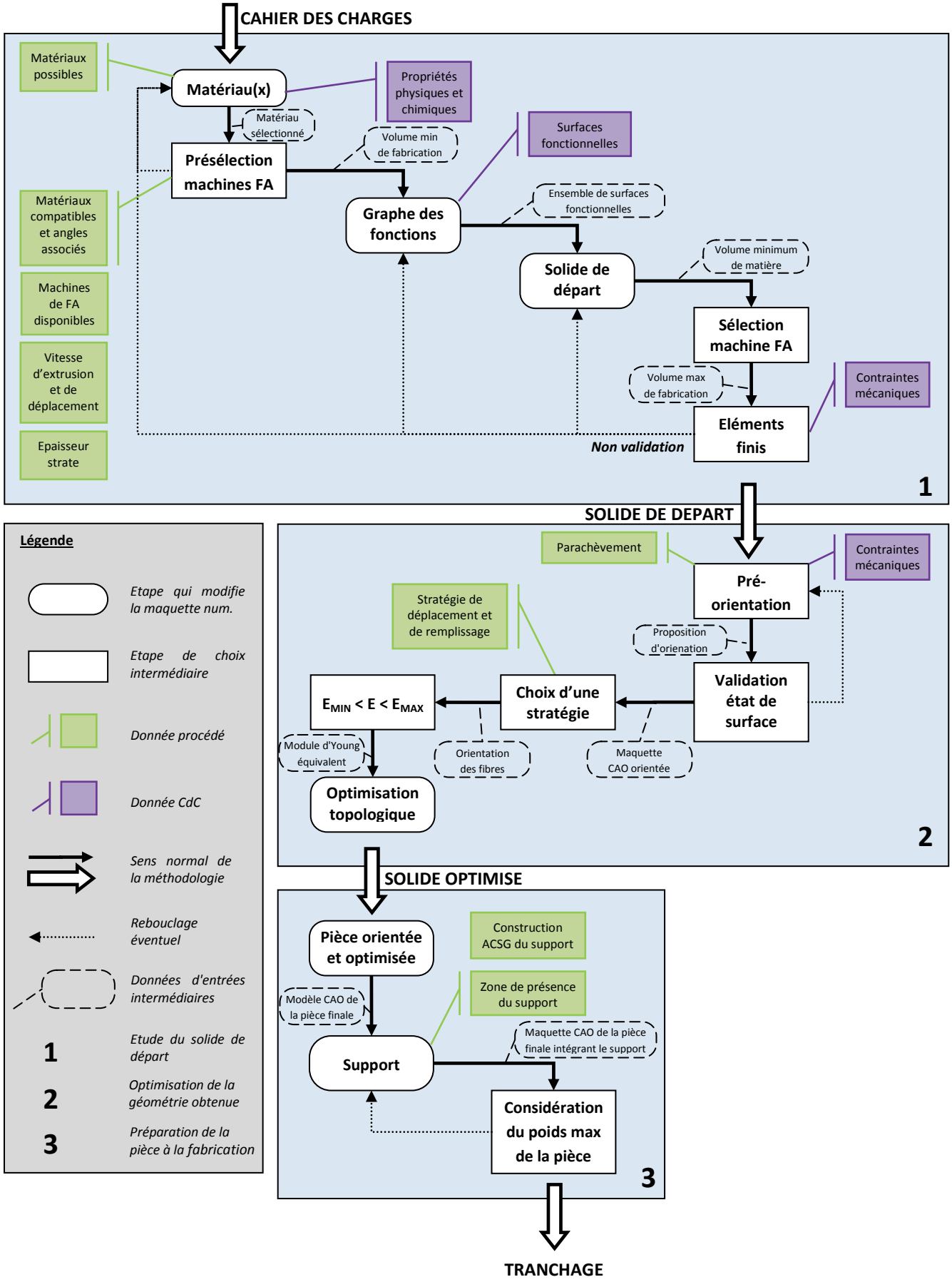


Figure 27 – Schéma de la méthodologie de conception proposée

Notre méthodologie (Figure 27) est composée de trois blocs correspondant à trois grandes phases. La première à pour but d'établir une géométrie primaire amenant à une pièce dont les propriétés physiques et chimiques, la tenue mécanique et les surfaces fonctionnelles répondent au cahier des charges. D'un point de vue purement numérique, bien que la fabricabilité de la pièce ne soit pas assurée, il est tout à fait possible d'arrêter la méthodologie à ce niveau. La seconde phase a pour but de proposer une géométrie optimisée du premier solide afin de réduire le volume de matière nécessaire à la fabrication. Les enjeux sont le temps de fabrication, la quantité de matière consommée et le coût économique de la pièce. La troisième phase a pour but d'assurer la fabricabilité de la pièce. A partir de la géométrie précédente issue de l'étape d'optimisation, dont le résultat n'est pas prédictible, l'intégration de support est envisagée et analysée en fonction de la masse souhaitée de la pièce (dont l'importance peut varier suivant les phases de vie).

La méthodologie fait appel aux informations contenues par le cahier de charges (Propriétés chimiques et physiques, Surfaces fonctionnelles et Contraintes mécaniques) et représentées ici par les cases et les flèches violettes. Ces informations pouvant évoluer au cours de la conception, la méthodologie doit donc s'adapter en permanence aux éventuelles modifications du cahier des charges. Les données du procédé contenues dans les blocs verts sont propres à l'entreprise/à l'équipe de conception. Ces données sont moins susceptibles d'évoluer durant le déroulement de la méthodologie. De même que pour les informations relatives au CdC, ces données sont intégrées par la méthodologie et aident à la décision des choix techniques. Les rectangles aux angles arrondis correspondent aux étapes qui modifient directement la maquette numérique. Les rectangles simples correspondent à des choix intermédiaires de conception, basés sur les données du CdC et du Procédé. Le cheminement de la méthodologie est défini par les flèches pleines noires. Les flèches pointillées représentent les éventuels rebouclages de la méthodologie dans le but de valider un matériau, une orientation, un volume de départ ou encore la géométrie du support.

Dans cette partie, nous allons présenter en détail les différentes étapes de notre méthodologie regroupées dans les trois phases de la Figure 27. Pour chaque étape, nous définirons les différents éléments de la méthodologie qui viennent piloter les choix à effectuer. Chacun de ces choix sera illustré par la conception de la grille de perçage présentée au Section 1. Nous terminerons par une analyse critique de la pièce conçue au regard du cahier des charges ainsi que par un comparatif entre la pièce conçue à l'aide de notre méthodologie et celle réalisée par enlèvement de matière.

Section 3 Etude du Solide de départ

Dans cette partie, nous allons détailler la génération du solide de départ servant de base à la phase d'optimisation topologique (Figure 28). Cette phase se compose de six étapes dont trois amènent à l'édition la maquette numérique. Comme nous l'avons indiqué en introduction, la conception d'une pièce pour la réalisation en FA nécessite une prise en compte au plus tôt des données concernant la machine et le matériau. Nous indiquerons ensuite, via le graphe des fonctions, comment ces données sont prises en compte et amènent à la génération du solide de départ. Puis, après la sélection définitive de la machine de fabrication, nous exposerons la validation de la pièce suite à une étape d'analyse par éléments finis.

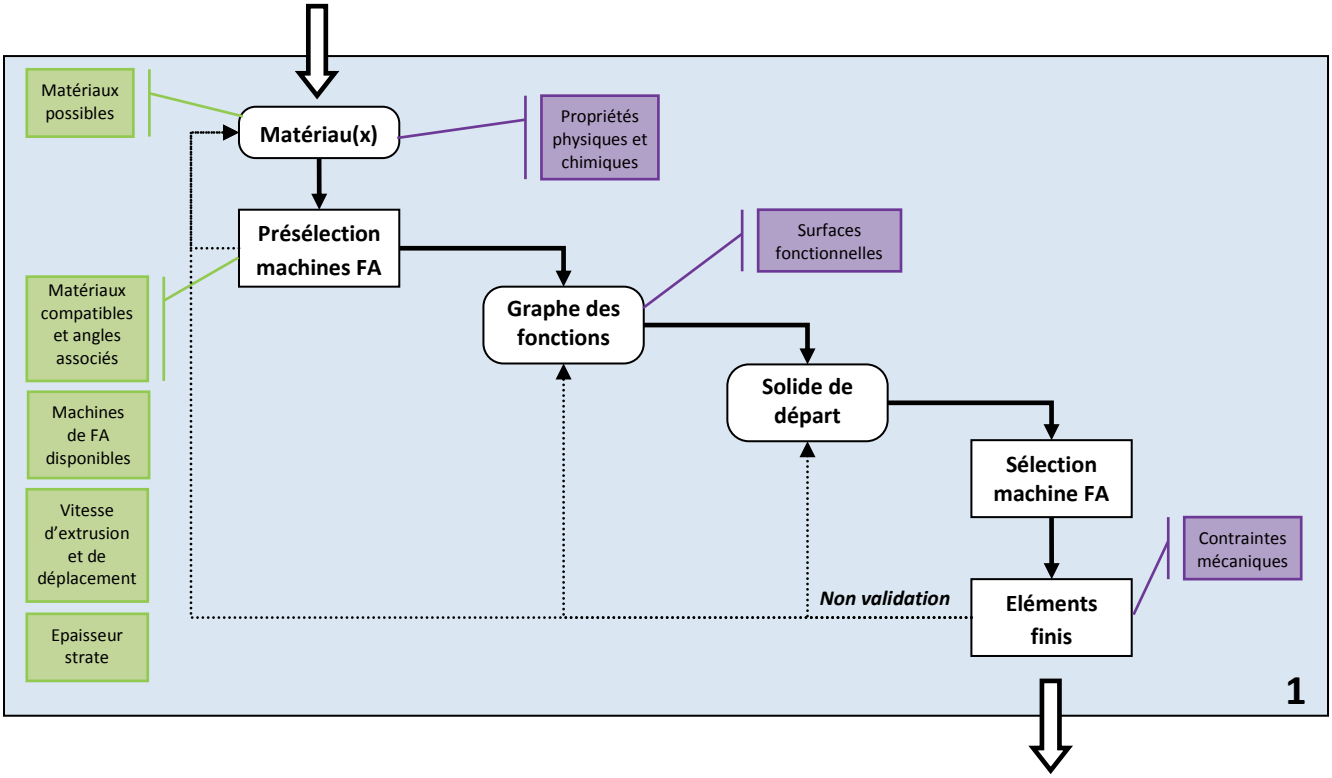


Figure 28 – Phase de la méthodologie relative à l'étude du solide de départ

3.1 Matériau

La première étape de la méthodologie consiste à choisir les matériaux qui constitueront la pièce. Contrairement aux méthodologies de conception appliquées aux procédés de fabrication conventionnels, pour lesquelles le choix du matériau est généralement effectué après la définition géométrique de la pièce, il est nécessaire de réaliser cette étape en amont. En effet, dans le cadre de la FA, le procédé dépend du matériau, ce qui impacte la machine utilisée et son volume de travail, la géométrie potentielle et la tenue mécanique de la pièce (qui dépend également de la machine) ainsi que les possibilités en terme de multimatériaux, de support et d'assemblages indémontables. Bien que la sélection du matériau puisse être révisée, dans le cas où les contraintes mécaniques amèneraient à une déformation trop importante de la pièce par exemple, il est nécessaire de le réaliser en premier. Ce choix se base sur trois contraintes :

- Les propriétés physiques et chimiques imposées par le cahier des charges ;
- Les matériaux auxquels le concepteur a accès ;
- Les matériaux compatibles.

3.1.a Propriétés chimiques et physiques

Les propriétés chimiques et physiques regroupent toutes les contraintes liées aux propriétés du matériau : dissolution dans un solvant, élasticité, magnétisme, conductivité thermique ou électrique,... A ce niveau de la méthodologie, aucune géométrie de pièce n'ayant été définie, ces contraintes sont donc indépendantes des contraintes mécaniques et de celles liées aux surfaces fonctionnelles.

Dans le cas le plus simple, une seule contrainte est à considérer sur toute la pièce (par exemple le poids). Dans ce cas, la solution est de réaliser la pièce dans un matériau unique, disponible et le plus léger (

Figure 29 - a). Puisqu'une pièce doit généralement répondre à un critère de coût (qui est une contrainte implicite mais pas nécessairement mentionnée dans le cahier des charges), nous considèrerons également que le matériau choisi permet de réaliser la pièce rapidement et à moindre prix. Dans ce cas, un compromis sera trouvé pour la sélection du matériau idéal, tout en respectant la contrainte initiale.

Un second cas est celui où une seule propriété est désirée, mais sur des parties spécifiques de la pièce. Si les critères de coût économique et de délai de livraison sont importants, il est envisageable, par exemple, de fabriquer la pièce en multimatériaux : un premier léger, économique et rapidement fabricable pour le corps de la pièce et un second matériau répondant au cahier des charges, utilisable par la même machine, mais qui sera déposé en faible quantités sur les zones concernées, soit de manière hétérogène, soit de manière diffuse (

Figure 29 – b et c). Dans ce cas, il est nécessaire que le concepteur ait accès à la documentation référençant la compatibilité des matériaux lors de la phase de fabrication. Bien entendu, si aucun matériau n'est compatible avec celui répondant aux contraintes physiques et chimiques, la pièce sera réalisée dans un seul matériau afin de répondre au cahier des charges.

Un troisième cas, plus complexe, est celui où la pièce à concevoir intègre au moins deux contraintes physiques ou chimiques qui nécessitent au moins deux matériaux incompatibles. Dans ce cas, la pièce devra être découpée en sous-assemblages (

Figure 29 - d).

Enfin, il est également possible qu'aucune propriété chimique ni physique ne soit explicite (élément de construction, par exemple). Dans ce cas le concepteur prendra comme contrainte la minimisation du poids de la pièce, ce qui nous ramène au cas d'un matériau unique. Cette contrainte, permettant de piloter à la fois la quantité de matière utilisée et le prix final de la pièce, impacte les différentes phases de vie de la pièce, notamment en ce qui concerne son transport et sa mise en service. En effet, le but de la méthodologie est de proposer une pièce répondant au cahier des charges et donc notamment à des contraintes mécaniques et d'encombrement. De plus, à ce niveau de la méthodologie, trop peu d'éléments sont connus pour se baser sur d'autres critères, tels que le coût matière (qui n'assure pas la tenue mécanique de la pièce ni un volume fabricable). Enfin, comme le montre le schéma de la Figure 27, il est possible de réviser le choix du matériau, dans le but de minimiser le poids de la pièce, afin de satisfaire aux contraintes mécaniques et d'état de surface du cahier des charges. C'est donc ce qui justifie de prendre ce paramètre par défaut à ce niveau de la méthodologie.

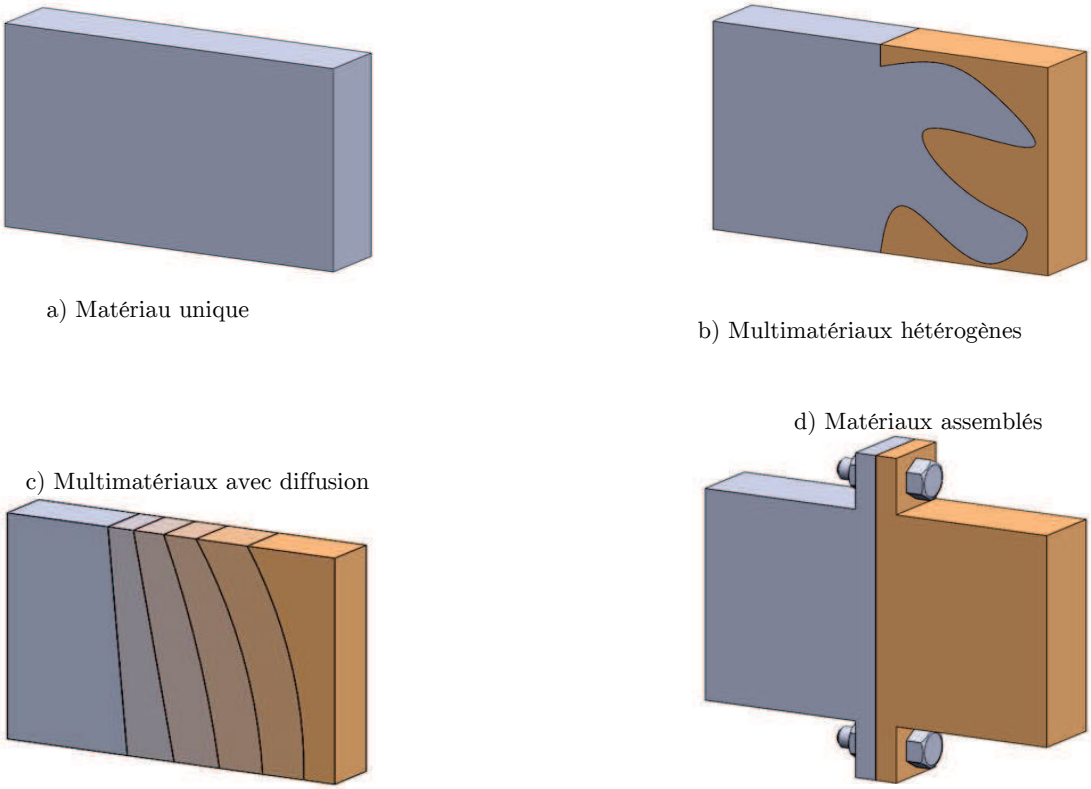


Figure 29 – Compatibilité des matériaux en fonction des contraintes chimiques ou physiques

Dans le cadre de nos travaux, bien que nous anticipions les quatre cas de figure possibles, nous ne traiterons que des pièces composées d'un seul matériau, ceci pour deux raisons. Premièrement, à l'heure où nous rédigeons cette thèse, les outils d'analyse par éléments finis ne traitent que des pièces composées d'un matériau homogène isotrope ou hétérogène orthotrope, mais pas hétérogène anisotrope. Nous sommes donc contraints par ces outils pour valider notre méthodologie. En revanche et deuxièmement, cette méthodologie a été pensée de manière évolutive. Si les outils d'analyse sont mis à jour pour permettre une analyse de pièce en multimatériaux, nous pourrons enrichir nos travaux dans ce sens. Dans un premier temps, notre méthodologie propose donc uniquement de vérifier que les contraintes physiques et chimiques permettent la sélection d'au moins un type de matériau existant. Dans le cadre de nos travaux, nous nous restreindrons aux matériaux pouvant être mis en œuvre sur une machine de type FDM. En effet, il s'agit du type de machine le plus répandu à ce jour[28], aussi bien pour une utilisation domestique que dans les différents secteurs industriels (prototypage, mise à l'échelle, art, médecine,...). Il nous semble donc tout à fait approprié d'étudier ce procédé de FA afin de répondre à un besoin existant. Ce procédé présente par contre comme spécificité l'intégration d'un support, cas que nous traiterons ultérieurement dans le déroulement de la méthodologie, ainsi que par la possibilité de réaliser des pièces en multimatériaux, contrairement aux procédés de stéréolithographie ou sur lit de poudre. Ainsi donc, la méthodologie que nous proposons s'applique à la fois au procédé le plus utilisé à ce jour mais également à celui qui présente le plus de spécificités. Nous y reviendrons dans la conclusion de ce chapitre, mais nous partons du principe que si notre méthodologie englobe le cas le plus complexe, elle pourra être aménagée pour englober des procédés moins contraignants.

[28] https://www.3dhubs.com/trends

3.1.b Matériaux possibles

Les matériaux possibles correspondent à tous les matériaux à disposition du concepteur, dépendamment des machines à sa disposition sur lesquelles il peut les mettre en œuvre. En effet, afin de répondre au mieux au cahier des charges, il est nécessaire que le concepteur ait à sa connaissance le plus grand panel possible de matériaux. Cependant, pour une machine donnée, un nombre restreint de matériaux peut être mis en œuvre. Pour le procédé FDM, on notera qu'une machine équipée d'un plateau chauffant pourra extruder, par exemple, du PLA et de l'ABS alors qu'une machine qui n'est pas équipée de plateau chauffant pourra extruder du PLA mais pas d'ABS. De plus, il apparait également évident que le concepteur connaisse quels matériaux sont effectivement disponibles pour la réalisation de la pièce. Il est inutile de concevoir une pièce dans un matériau si celui-ci n'est pas en stock.

3.1.c Matériaux compatibles

Les matériaux compatibles correspondent à tous les matériaux pouvant être utilisés simultanément durant une même phase de fabrication pour un procédé de dépôt de matière (FDM, CLAD, PolyJet,...). La compatibilité des matériaux est principalement imposée par la température de mise en œuvre. En effet, pour réaliser une pièce, la matière est d'abord rendue vitreuse avant d'être déposée. Si plusieurs matériaux sont déposés en même temps, il faut que les plages de température de transition vitreuse de tous les matériaux possèdent une zone commune (Figure 30). Dans le cas contraire, le dépôt du matériau ayant le point de transition vitreuse le plus élevé viendra faire fondre les autres matériaux, détruisant ainsi la pièce en cours de fabrication.

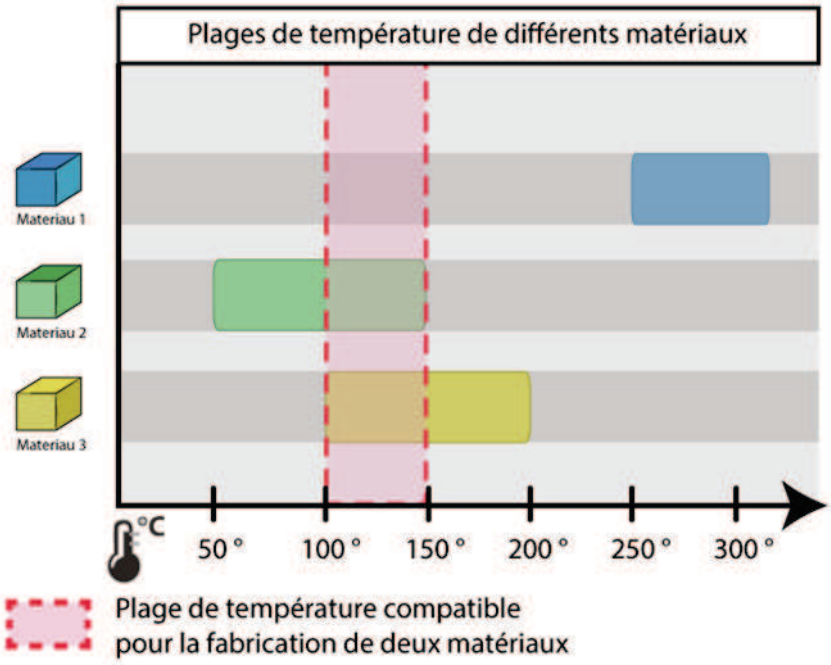


Figure 30 - Compatibilité thermique des matériaux

3.1.d Choix du matériau

Une fois ces deux contraintes analysées, plusieurs matériaux peuvent être éligibles. Dans ce cas, le choix se basera également sur des contraintes liées à la politique de l'entreprise : coût du matériau, recyclabilité du matériau, facilité d'approvisionnement du matériau, disponibilité des machines,... La sélection du matériau peut être effectuée

de différentes manières : moyenne pondérée, méthode AHP, méthode ELECTRE 1[29],... Cependant, dépendamment du cahier des charges et de l'équipe de conception, les critères qui sont applicables sont variables. Il est donc difficile de préconiser une méthode unique plutôt qu'une autre. Néanmoins, pour que cette étape soit validée, les matériaux qui composeront la pièce doivent être décidés à cette étape de la méthodologie.

Si aucune méthode de sélection ne permet de discriminer un matériau, il sera possible, dans un premier temps, de se baser sur le coût du matériau, puis de réviser éventuellement ce choix après une étape d'analyse par éléments finis, comme le montre le caractère potentiellement cyclique de l'étude du solide de départ. (Figure 28).

3.1.e Application au cas d'étude

Comme pour le cas présent, l'application de notre méthodologie au cas d'étude se fera à la fin de chaque étape et sera symbolisée par le fond gris suivant. Ce code couleur sera repris tout au long de ce chapitre.

Dans notre cas, aucune contrainte concernant les propriétés du matériau n'est indiquée par le cahier des charges. En revanche, il est souhaité que la pièce soit réalisée en ABS ou en ULTEM. En accord avec le cahier des charges et les disponibilités des matériaux, nous choisissons dans un premier temps l'ABS. Bien que l'ULTEM présente une résistance à la traction plus élevée que l'ABS, ces deux matériaux ayant une masse volumique similaire, ce choix se base donc sur le coût de la matière première. Ce choix pourra être révisé après l'étape d'analyse par éléments finis.

3.2 Machines potentielles

Une fois le matériau défini, le concepteur doit déterminer une première liste de machines sur lesquelles la pièce est potentiellement réalisable. Ce choix s'appuie sur les données suivantes que nous allons détailler :

- Le matériau utilisé (choix réalisé précédemment) ;
- La liste des machines disponibles et leurs caractéristiques ;

3.2.a Machines disponibles

Les machines disponibles correspondent aux machines auxquelles le concepteur a accès pour la réalisation de la pièce. Il existe deux catégories de machines : celles présentes physiquement à la portée du concepteur et celles auxquelles le concepteur peut avoir accès par sous-traitance. Il existe plusieurs contraintes et avantages liées à ces deux catégories qui peuvent influencer la conception de la pièce.

Dans le premier cas, on suppose que le concepteur a un accès direct à l'outil de production, ce qui lui permet d'approfondir ses connaissances sur la machine par la pratique et les essais. Il peut également réaliser divers tests sur cette machine visant à définir la précision et la résolution effective (éventuellement différente de celle annoncée par le constructeur), vérifier l'espace utile de fabrication et éventuellement tester d'autres matériaux que ceux préconisés. Cependant, comme tout outil de production, celui-ci peut être momentanément indisponible (maintenance, panne, utilisation en cours,...).

Ainsi, dans le second cas, il peut être utile de faire appel à une entreprise tierce pour la réalisation de la pièce. Un des avantages à faire réaliser la pièce par un sous-traitant est l'élargissement du panel de matériaux disponibles

[29] Ces méthodes de hiérarchisation permettent le tri de plusieurs propositions à partir d'une évaluation multicritères. De manière générale, un poids est affecté à chaque critère de décision. Les solutions sont ensuite notées pour chaque critère. Le dépouillement de la meilleure solution se base sur les notes obtenues ainsi que leur poids respectif.

pour la conception ainsi que l'utilisation de compétences tierces en dehors des siennes. En revanche, la contrainte forte est que la machine ne sera a priori pas accessible et que les seules données disponibles la concernant seront celles fournies par le sous-traitant.

Dans tous les cas, le parc des machines disponibles peut évoluer durant la conception. Il est donc nécessaire que le concepteur ait en permanence une liste mise à jour des machines disponibles et de toutes les données utiles les concernant pour réaliser une conception fiable, qu'il ait accès physiquement ou non à ces machines. Si la machine ou le procédé de FA envisagé venait à disparaître durant la conception de la pièce, par exemple par l'application d'une norme environnementale, la méthodologie serait à reprendre depuis cette étape.

3.2.b Présélection des machines

Puisque le matériau de fabrication a déjà été choisi, la présélection des machines commence par une étape d'élimination. En effet, en fonction du procédé, certains matériaux sont utilisables ou non. Il suffit, dans un premier temps, d'écarter les machines incompatibles parmi les machines disponibles afin d'obtenir un premier lot restreint de machines. Dans l'exemple présenté par la Figure 31, nous souhaitons réaliser une pièce dans un matériau A pour laquelle le support sera réalisé dans un second matériau, B ou C. A l'aide des données métier relatives aux procédés de FA, le concepteur est capable de déterminer la liste restreinte des machines envisageables pour la fabrication de cette pièce.

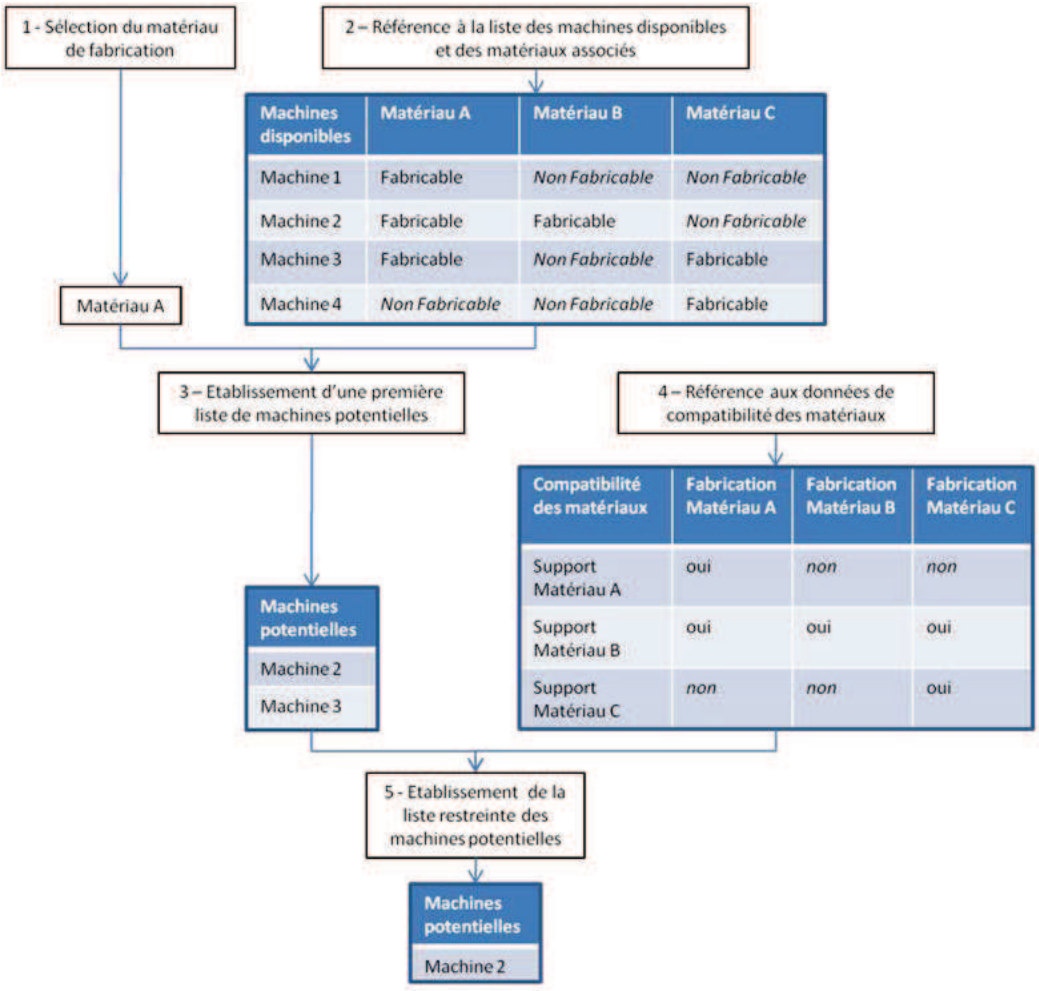


Figure 31 - méthode de sélection de la machine de FA

A ce stade de la méthodologie, l'intégration du support ne peut être abordée puisque la maquette numérique de la pièce n'existe pas encore. De plus, il apparait que le modèle résultant d'une optimisation géométrique présente très souvent des formes complexes pour lesquelles le retrait manuel du support ne peux être garanti, il est donc nécessaire d'anticiper la présence d'un support soluble. C'est pourquoi cette méthodologie prend comme postulat que le support peut être réalisé dans un second matériau, soluble dans un produit qui n'agit pas sur le matériau de la pièce, et dont la plage de température de transition vitreuse est proche de celle du matériau de la pièce. Cette contrainte permet donc de réduire à nouveau le nombre de machines utilisables à un second pool plus restreint (Figure 31). Dans le cas où le support devrait être réalisé dans un matériau non soluble, bien que notre méthodologie indique les zones nécessitant du support et puisse modifier, dans le respect du cahier des charges, la géométrie de la pièce afin de limiter la présence du support, elle n'apporte aucune indication au concepteur quant à la possibilité de son extraction. En effet, pour l'instant, c'est au concepteur de valider manuellement si l'accès au support est possible. La prise en compte de l'accessibilité au support est une piste d'amélioration de nos travaux.

Il reste alors deux contraintes à prendre en compte parmi celles énoncées précédemment : la résolution de la machine ainsi que sa vitesse de production. En fonction des contraintes du cahier des charges, la priorité peut être donnée à l'une ou à l'autre de ces contraintes. Il est également possible d'utiliser une des méthodes de sélection vues pour la sélection du matériau. Nous obtenons donc une machine optimisée pour le support (Figure 31 - méthode de sélection de la machine de FA).

A l'issue de cette étape, nous avons donc comme données de sortie le matériau utilisé pour la pièce ainsi qu'une liste de machines idéalement utilisables. Dans l'idéal, il faudrait également envisager le cas où la pièce optimisée ne nécessite pas de support, ce qui impliquerait le choix d'une seconde liste restreinte de machines mettant en œuvre le matériau de la pièce. Cependant, ce cas particulier étant relativement rare, nous ne traiterons ici que du cas général d'une pièce optimisée à la géométrie complexe impliquant la présence de support.

3.2.c Application au cas d'étude

Pour rappel, la pièce que nous devons concevoir doit être réalisée en ABS (contrainte fixée par le cahier des charges). Pour le déroulement de la méthodologie, nous nous baserons uniquement sur les machines disponibles au laboratoire. Ce choix reflète une problématique industrielle réelle : utiliser au maximum le matériel disponible sur le site. Nous avons à notre disposition quatre machines dont la documentation technique est fournie en annexe 2 :

- MakerBot Replicator Dual Extruder
- MakerBot Replicator 2X
- Spiderbot
- Zcorp z510

Dans un premier temps, en appliquant notre méthodologie, nous excluons donc la machine Zcorp Z510. Il s'agit d'une machine de dépôt de matière sur lit de poudre ne permettant pas de réaliser une pièce en ABS. Le premier pool restreint est donc composé des trois premières machines.

Dans un second temps, nous pouvons également exclure la machine Spiderbot. Celle-ci ne dispose que d'une seule buse. Il n'est donc pas possible de réaliser un éventuel support dans un matériau différent. Le choix de la machine définitive se fera après la constitution du solide de départ à partir de la liste restreinte des machines potentielles, soit les deux machines MakerBot.

3.3 Graphe des fonctions

La troisième étape de la méthodologie consiste à établir le graphe des fonctions. Il s'agit de l'étape-clé de notre méthodologie. A ce niveau, le concepteur a déjà sélectionné le matériau nécessaire à la réalisation de la pièce. Il va donc commencer à créer la maquette numérique de la pièce en intégrant les contraintes du cahier des charges directement dans un fichier CAO. Le graphe des fonctions va également s'appuyer sur les surfaces fonctionnelles issues du cahier des charges. Le terme de graphe correspond à la liaison des surfaces fonctionnelles par les tolérances géométriques.

3.3.a Les surfaces fonctionnelles

Les surfaces fonctionnelles correspondent à toutes les surfaces de contact de la pièce à concevoir. Par rapport au cahier des charges, il s'agit de toutes les contraintes qui peuvent être représentées sous forme géométrique. Ces surfaces doivent également intégrer, si possible, les notions d'état de surface et de tolérance géométrique. Les surfaces fonctionnelles sont traduites à partir des contraintes du cahier des charges. Il est nécessaire de différencier les surfaces fonctionnelles de conception, pour lesquelles le concepteur a toute latitude quant à la géométrie et qui relèvent davantage de choix esthétiques ou ergonomiques (carrosserie, carter, poignée,...) et les surfaces fonctionnelles de contrainte, pour lesquelles le concepteur est contraint de suivre une géométrie prédéfinie (Figure 32). Dans le second cas, il s'agit principalement des surfaces issues d'éléments existant auxquels la pièce à concevoir doit s'adapter. Ces éléments peuvent être standards : vis, écrous, roulement,... ou non : autre pièce du graphe des liaisons, pièce spécifique aux besoins du concepteur pièce sur mesure,... Dans tous les cas, la surface à prendre en compte est soit déjà existante sous forme de maquette numérique, soit convertible en maquette CAO.

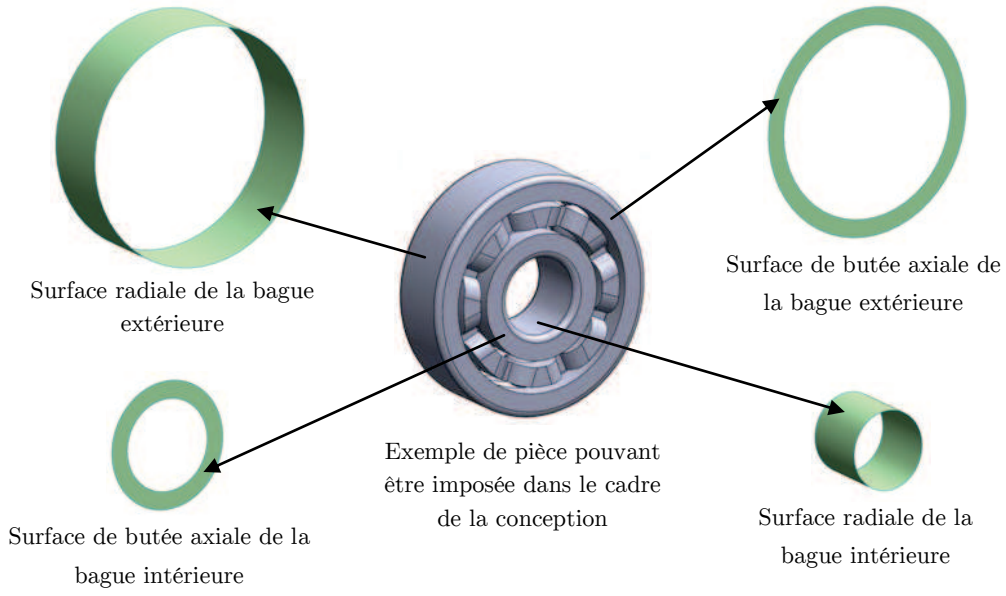


Figure 32 - Surfaces fonctionnelles imposées, cas d'un roulement

Pour chaque surface fonctionnelle de contrainte, il est nécessaire d'intégrer un volume fonctionnel de contrainte traduisant la nécessité d'avoir une surépaisseur, lors de la phase de fabrication de la pièce, pour permettre la génération de la surface et, le cas échéant, la mise en place de l'élément extérieur (Figure 33). Par exemple, pour certains procédés, tel que le FDM, il n'est pas possible de réaliser directement un trou taraudé pour une vis métallique standard, quelque soit le diamètre. Pour résoudre ce problème, un volume fonctionnel de contrainte est intégré à la maquette. Ce volume prend la forme d'un cylindre dont le diamètre intérieur correspond au diamètre de creux de la vis. L'épaisseur du cylindre doit être au moins égale à deux fois la hauteur du filet pour garantir le

taraudage ainsi que le maintien de la surface sur la pièce. Cependant, il n'existe pas encore de préconisation exacte concernant l'épaisseur du cylindre pour ce type de fixation. Cela dépend notamment du matériau utilisé et de l'orientation de la pièce.

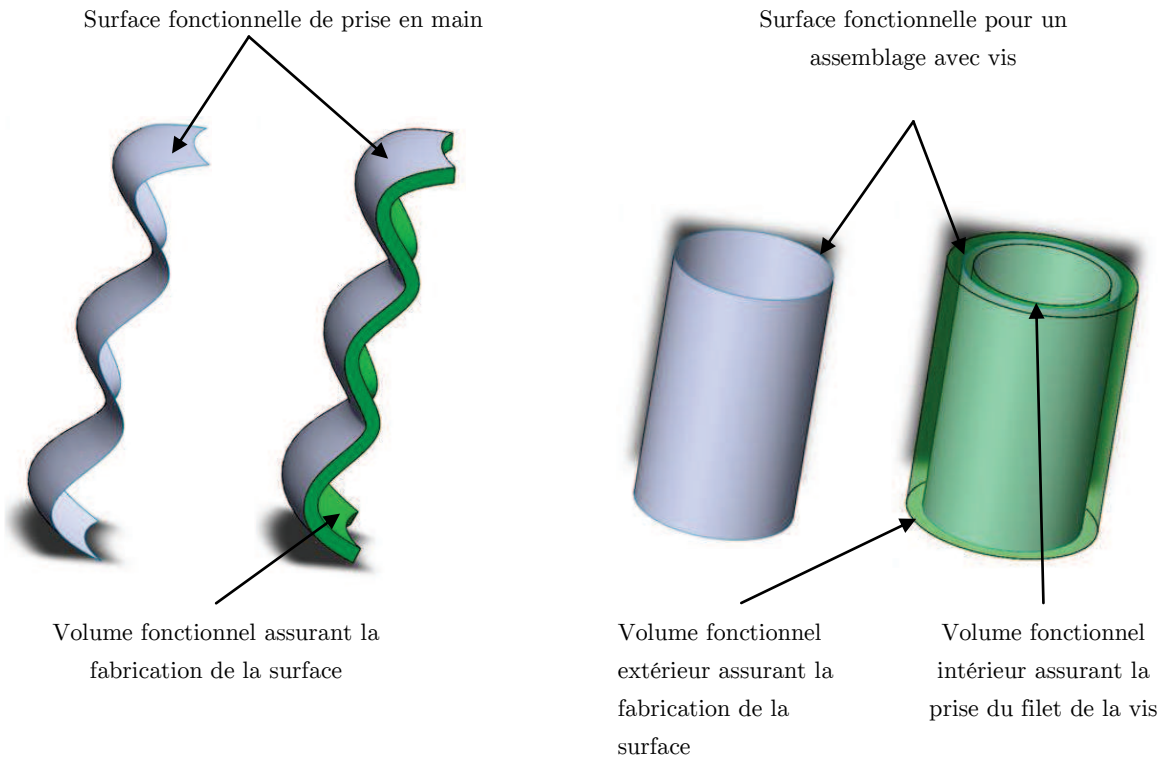


Figure 33 - Volume fonctionnel de contrainte

Dans le cas de surfaces de conception, le concepteur n'a pas nécessairement la connaissance de la forme de la surface fonctionnelle. Pour une même contrainte, il peut exister tout un panel de surfaces fonctionnelles. Par exemple, si la contrainte associée du cahier des charges est une contrainte de contenance de fluide, la forme de la surface peut être cubique, parallélépipédique, sphérique, ellipsoïdale, gauche,... ce qui n'est pas un problème du point de vue fabrication puisque la FA permet de réaliser toutes ces formes. Un des buts de notre méthodologie est donc de pouvoir modifier de manière dynamique la géométrie de ces surfaces au cours de la conception tout en conservant les éléments déjà intégrés. De plus, pour un volume de matière donné, toute modification de la maquette numérique n'impacte que très faiblement le coût final de la pièce puisque l'outil de production envisagé, pour un matériau donné, reste le même : une machine de fabrication additive pour laquelle le coût de la pièce dépend directement de la quantité de matière nécessaire et du temps nécessaire à la fabrication et non de la complexité ou de la forme de la pièce.

Enfin, pour conclure avec les surfaces fonctionnelles, il est nécessaire d'intégrer différentes données lors de la conception. La première est l'état de surface attendu. Cette information sera prise en compte lors de la détermination de la machine par le biais de la résolution la plus fine envisageable. La seconde est la tolérance géométrique. De même, cette information servira lors de la détermination de la machine à utiliser et du sens de construction. La troisième donnée à renseigner est le volume de contact. Ce volume correspond à l'espace minimum qui doit être laissé accessible du côté extérieur de la surface (Figure 34). Dans le cas d'une contrainte de contenance, le volume de contact correspond au volume contenu par la surface fonctionnelle. Ce volume doit être vide pour permettre au fluide de remplir le réservoir. En revanche, si la surface fonctionnelle correspond à une surface sur laquelle un élément extérieur doit être fixé (vis, aimant, peinture, ...), cette surface doit nécessairement

permettre l'intégration de cet élément après fabrication de la pièce. Le concepteur doit donc prévoir un volume de contact suffisant pour intégrer l'élément extérieur durant l'assemblage de la pièce. Concrètement, il s'agit d'un volume prenant appui sur la surface fonctionnelle et dirigé vers l'extérieur et qui doit être laissé vide durant la phase de conception.

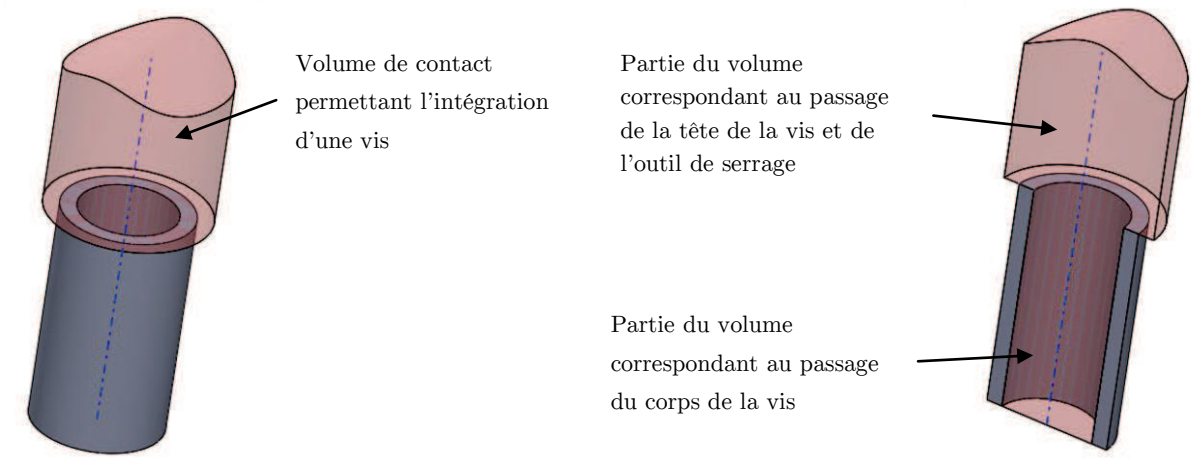


Figure 34 – volumes de contact intérieur et extérieur

3.3.b Réalisation du graphe des fonctions

Pour établir le graphe des fonctions, le concepteur doit donc renseigner toutes les surfaces fonctionnelles nécessaires à la pièce à concevoir dans un logiciel de CAO. La création du graphe, telle que présentée sur la Figure 35, se fait de la manière suivante :

- Chaque surface issue du cahier des charges est tout d'abord consignée dans un fichier de pièce indépendant (Figure 35 - 1). Cela permet à l'équipe de conception de pouvoir modifier, si besoin, chaque surface de manière indépendante. Cela permet également de pouvoir constituer une banque de données de surfaces fonctionnelles pouvant être réutilisées d'une conception de pièce à une autre. De plus, de part l'utilisation d'un logiciel de CAO, ces surfaces possèdent deux normales opposées. Elles peuvent donc être aussi bien utilisées pour des surfaces de contact intérieures ou extérieures.
- Chaque contrainte du cahier des charges, non traduisible en termes de surface, est également enregistrée dans un fichier pièce (présence d'un matériau spécifique, état de surface, liaison démontable,...). Au début de la conception, une contrainte est représentée par une sphère dans le logiciel de CAO. Cette représentation a pour but d'indiquer au concepteur la présence d'une contrainte non traitée. Il faut bien noter que ces contraintes n'agissent pas nécessairement sur les formes ni sur le volume final de la pièce (résistance mécanique, inoxydabilité, conductance,...). Au fur et à mesure de la conception, ces contraintes vont être associées à des surfaces ou à des volumes de la pièce.
- Une fois toutes les surfaces et toutes les contraintes nécessaires numérisées dans le logiciel de CAO, ces fichiers sont ensuite intégrés dans un fichier d'assemblage qui permet la mise à jour indépendante des surfaces fonctionnelles (Figure 35 - 2). Le concepteur peut alors organiser spatialement les différentes surfaces et ajouter d'éventuelles contraintes de positionnement liées aux tolérances dimensionnelles (Figure 35 – 3, 4).
- Même si la pièce est réalisable en une seule entité, il peut être nécessaire de séparer certaines surfaces en fonction des contraintes associées par le cahier des charges (surface d'usure ou carter par exemple) (Figure 35 - 5). Dans ce cas, les surfaces fonctionnelles seront regroupées en différents sets, chaque set amenant à la réalisation d'une pièce physique différente. Chaque fonction du cahier des charges est représentée par une surface unique présentant des contraintes d'état de surface et des tolérances géométriques. Chaque surface étant unique, l'état de surface associé l'est également. La constitution des sets se base donc sur les tolérances géométriques imposées par le cahier des charges. Ainsi, des surfaces liées deux à deux par une

tolérance feront nécessairement partie du même set. Cela nous permettra ainsi de déterminer les machines de fabrication les plus adaptées en fonction du volume de chaque set (Figure 35 - 7). Si un set formé de cette manière n'est contenu dans aucun espace de travail des machines présélectionnées, il faut alors vérifier si certaines tolérances géométriques peuvent tout de même être assurées malgré la séparation des surfaces concernées sur deux ou plusieurs sets (Figure 35 - 9). Si non, il sera alors nécessaire d'étudier la possibilité d'agrandir le parc des machines disponibles.

- La décomposition du graphe en différents sets repose avant tout sur les contraintes données par le cahier des charges et s'effectue en différentes étapes (Figure 35 - 6). La première étape repose, comme indiqué précédemment, sur la présence de surfaces démontables (usure, carter de protection,...). La seconde étape de la décomposition repose sur le postulat que la FA permet la réalisation de volumes indémontables ayant des mouvements relatifs lors de la phase d'utilisation de la pièce. Dans un second temps, il va donc être nécessaire d'identifier les futurs corps en mouvement les uns par rapport aux autres. Chaque corps va générer un set. La troisième étape de la décomposition repose sur le postulat que la FA n'est limitée ni par la complexité des pièces, ni par la réalisation de pièces en multimatériaux. Cette étape est la plus importante puisque, contrairement à la plupart des méthodologies de conception adaptés aux procédés d'usinage standard, le but est ici de centraliser un maximum de contraintes et de surfaces fonctionnelles sur une même pièce (Figure 35 - 8).

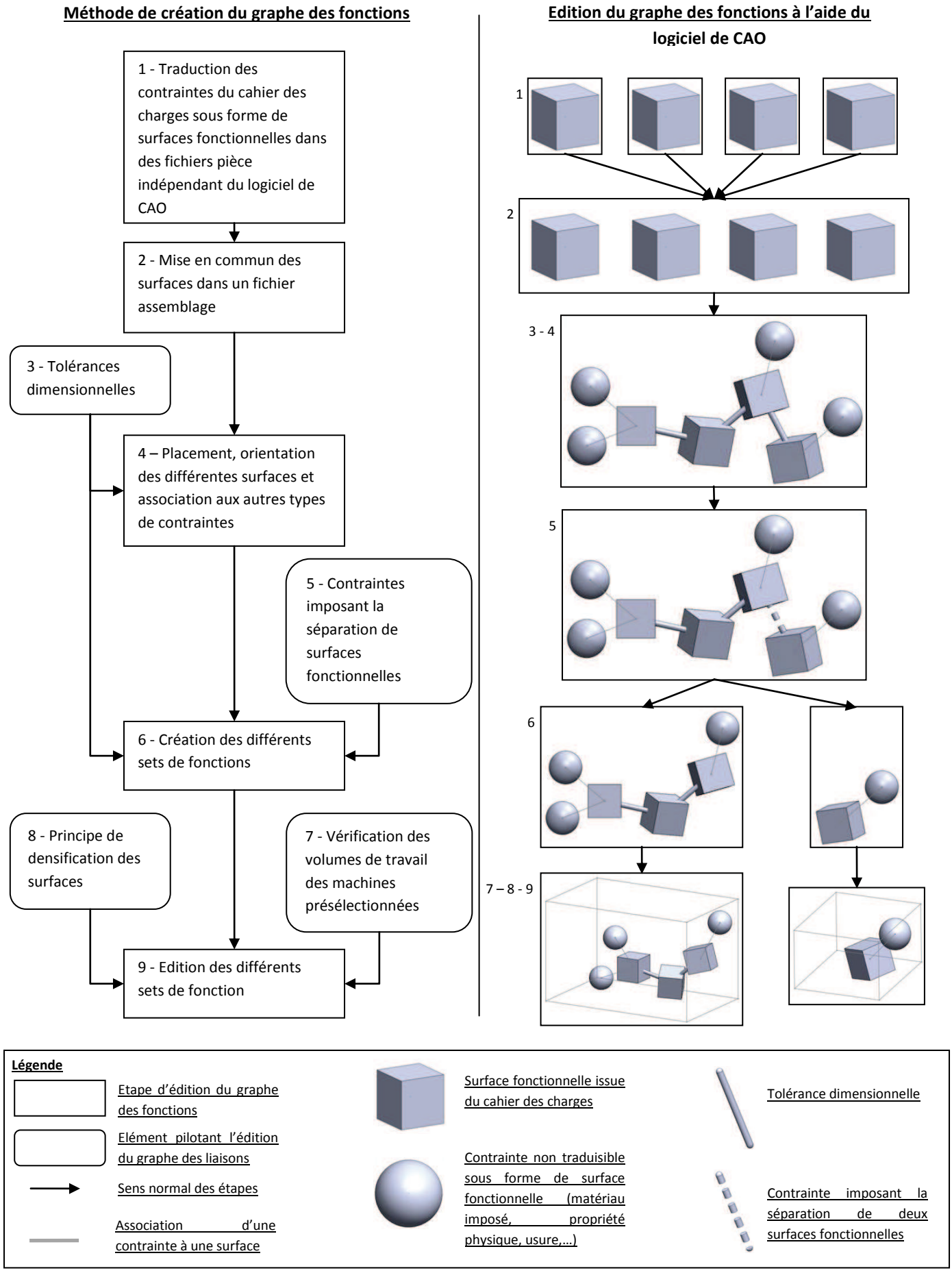


Figure 35 - Création du graphe des fonctions

Le graphe est voué à évoluer au long de la conception et doit rester modulable. C'est pourquoi chaque surface doit être indépendante des autres et le positionnement de celles-ci doit pouvoir se faire de manière dynamique.

Idéalement, chaque pièce à réaliser est constituée d'un unique set. Dans le cas où une pièce est constituée d'au moins deux sets, des surfaces fonctionnelles d'assemblage sont intégrées au graphe des liaisons. Le principe d'assemblage dépend du matériau précédemment choisit : soudure, collage, clip, rivetage, boulonnage,... et des surfaces fonctionnelles déjà présentes. Cependant, puisque la FA n'impose pas de limitation concernant les géométries des pièces, nous considèrerons que toute pièce est fabricable, indépendamment du nombre de sets la composant.

Si le cahier des charges impose que la pièce à fabriquer doit être réalisée en un seul volume, le concepteur peut alors réviser le choix de la machine de fabrication additive en revenant à l'étape précédente.

3.3.c Application au cas d'étude

Dans le cadre de nos travaux, nous utiliserons exclusivement le logiciel SolidWorks. Bien qu'il existe un large panel de logiciels de CAO, nous avons choisi celui-ci pour les raisons suivantes :

- Notre méthodologie s'adresse à la fois aux entreprises et, plus précisément, à leurs équipes de conception mais également aux particuliers par le biais des Fablabs. En effet, la démocratisation du procédé de FA nous pousse à établir une méthodologie simple et compréhensible par les particuliers qui n'ont pas nécessairement des connaissances pointues en CAO. Le logiciel SolidWorks est utilisé à la fois dans les établissements scolaires (milieu idéal pour introduire le concept de méthodologie de conception orientée FA) et par les entreprises. De plus son interface relativement épurée en fait un outil affordant adapté pour nos besoins. Bien que le prix du logiciel soit élevé, il est raisonnable de penser que les Fablabs puissent acquérir au moins une licence.
- Un des atouts du logiciel SolidWorks est la possibilité d'utiliser des macros ou plugins développés en C#. L'une des problématiques actuelles de la CAO est la représentation naturelle des données et l'interaction avec la maquette numérique. Or, la plupart des périphériques de réalité virtuelle actuels disposent d'un SDK programmé en C#. Dans une optique à moyen ou long terme, il me semble intéressant d'utiliser un outil pouvant répondre à un besoin connexe à celui de notre méthodologie.
- Le logiciel SolidWorks dispose également du plugin d'optimisation topologique PareTOWorks. Bien que la puissance de ce plugin soit limitée par rapport à des logiciels dédiés, il répond néanmoins aux besoins de notre méthodologie. L'avantage d'utiliser un tel plugin est de manipuler un outil unique et d'obtenir une chaîne numérique avec le moins de ruptures possible (dans notre cas, une seule, due à une conversion de format lors de l'étape d'optimisation topologique).

SolidWorks propose trois types de fichiers : les pièces, les assemblages et les mises en plan. Une machine de fabrication additive prend en charge un fichier issu soit d'un logiciel de tranchage, au format .x3g, soit d'un logiciel de CAO, au format .stl. Nous utiliserons donc les fichiers de type pièce et de type assemblage dans le cadre de la méthodologie afin de les exporter au format .stl.

A cette étape, nous savons que la pièce sera réalisée en ABS sur une MakerBot Replicator 2X. Ceci nous permet dans un premier temps d'assigner le matériau à chaque fichier pièce nécessaire à la conception de la grille de perçage. Nous pouvons également, avant d'importer les contraintes du cahier des charges, intégrer un volume englobant qui représente l'espace de travail de la machine. Ceci permettra de valider visuellement si la pièce à concevoir pourra être réalisée en un seul volume.

Nous pouvons désormais commencer à générer le graphe des fonctions. Le cahier des charges, tel qu'il est présenté, nous fournit déjà plusieurs surfaces de contraintes. En effet, la pièce à concevoir doit intégrer treize perçages. Ces

perçages se situent entre deux plans parallèles distants de 20 mm. De plus, chaque perçage doit recevoir une pièce existante :

- outil de perçage ;
- coussinet ;
- vis de mise en place de rapide ;
- pion de positionnement.

Chacune de ces pièces est en appui-plan sur la grille de perçage, ce qui implique que chaque perçage ait une surface de contact ainsi qu'un volume de contact associé.

Puisque le cahier des charges fournit également une mise en plan des différents perçages (Figure 110), nous devons également imposer des contraintes de positionnement dès cette étape. Le placement des différentes fonctions en tenant compte des tolérances dimensionnelles et des contraintes non traduisibles sous forme de surfaces (Figure 35 - 4) est donc le suivant (Figure 36). Le matériau imposé par l'entreprise n'est affecté qu'une seule fois pour tout le set. En revanche, un état de surface différent est affecté à chaque surface fonctionnelle.

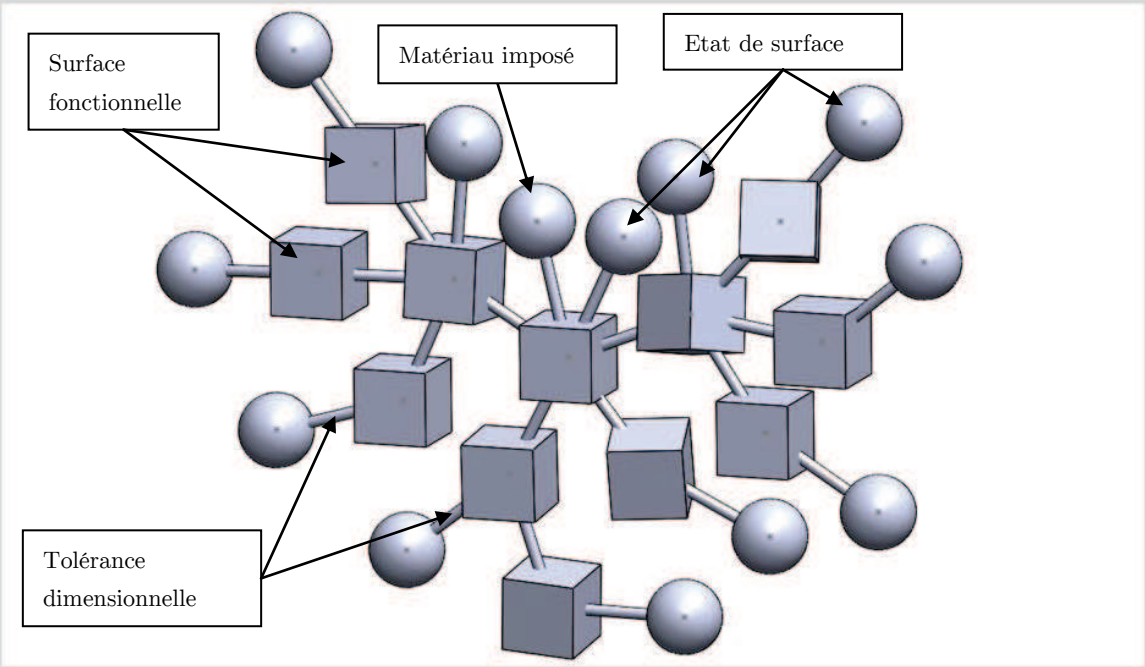


Figure 36 – graphe des fonctions de la pièce d'étude – représentation symbolique

Pour le cas d'étude, il est possible de rattacher toutes les surfaces fonctionnelles au même set. Nous nous arrêterons donc à l'étape 4 de la Figure 35. Afin de simplifier la visualisation, nous proposons une seconde représentation, plus fidèle, où seules les surfaces sont représentées. Les surfaces vertes correspondent aux surfaces fonctionnelles. Les surfaces rouges correspondent aux surfaces de contact (Figure 37).

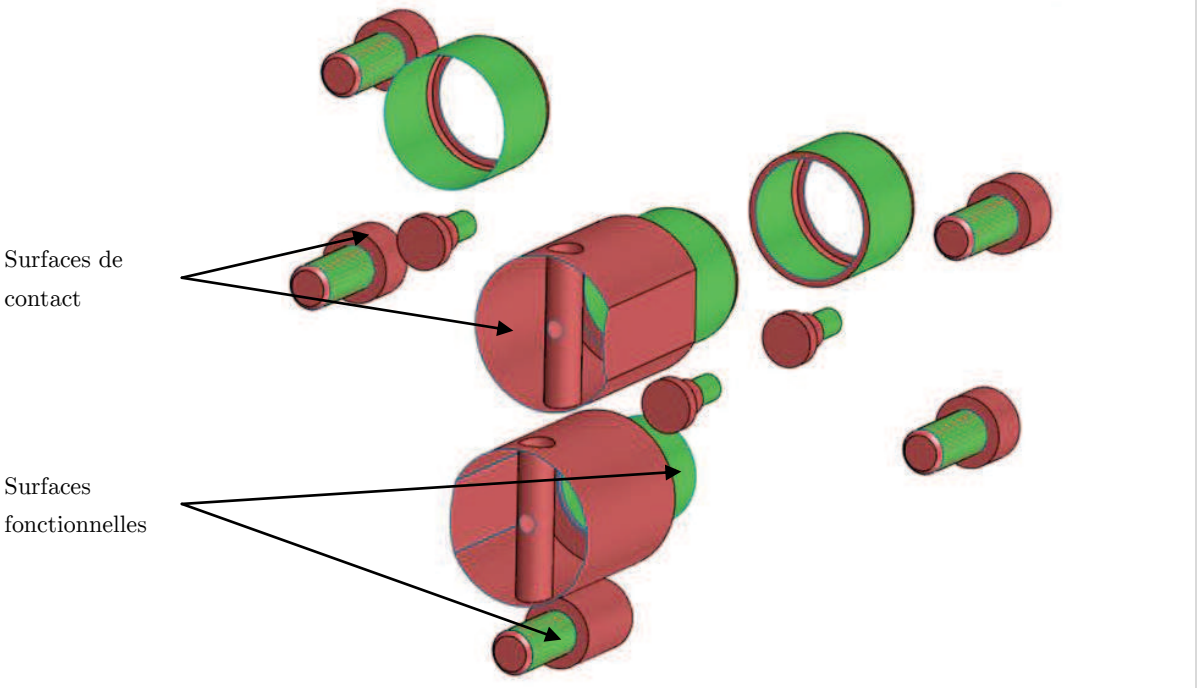


Figure 37 - Graphe des fonctions de la pièce d'étude – représentation finale

Dans le cas présent, aucune contrainte n'impose la séparation des surfaces en différents sets. De plus, l'ensemble des surfaces de ce graphe est englobé par l'espace de travail des machines présélectionnées à l'étape précédente de notre méthodologie. Ceci nous permet donc d'établir un unique set correspondant au graphe de la Figure 37, ce qui correspond parfaitement au principe de densification des surfaces (Figure 35 - 8) : toutes les surfaces fonctionnelles sont contenues par le même set. Solide de départ.

3.4 Définition du solide de départ

A partir du graphe des fonctions, le concepteur peut établir un solide de départ pour chaque set. Ce solide est généré en enregistrant le set dans un fichier pièce. Ce fichier intègre toutes les surfaces fonctionnelles nécessaires pour répondre au cahier des charges. Le solide de départ est constitué d'un unique corps volumique, condition nécessaire pour les étapes d'analyse et d'optimisation qui viennent plus loin dans la méthodologie. Ce solide doit également comporter des épaisseurs de matière qui satisfont aux contraintes liées à l'épaisseur minimum de matière que la machine peut déposer.

A cette étape de la conception, on suppose que toutes les surfaces fonctionnelles de contrainte et de conception sont correctement placées. Cependant, aucune de ces surfaces n'a nécessairement été reliée aux autres et seuls les volumes fonctionnels de contrainte ont été intégrés.

En se basant sur les surfaces fonctionnelles, le concepteur commence par générer les volumes fonctionnels qui leurs sont associés. Ces volumes prennent en compte la quantité minimale de matière nécessaire à la fabrication de ces surfaces et à l'intégration des éléments extérieurs, le cas échéant.

Une première ébauche du solide de départ est obtenue en reliant les volumes fonctionnels deux à deux d'après une triangulation de Delaunay[30]. Afin de proposer un volume relativement léger à mailler, puisque les volumes fonctionnels servent uniquement à prévoir un minimum de matière, ceux-ci seront basés sur des formes polygonales. Ceci permet de déterminer la plus petite surface englobante de la pièce. Une fois les volumes liés, le volume compris à l'intérieur de la surface englobante est rempli pour générer le solide de départ. Ceci permet d'obtenir le plus petit volume de matière nécessaire. Les surfaces étant normées, le volume extérieur à celles-ci doit être laissé vide. Les volumes de contact doivent également être respectés.

A ce point de la méthodologie, le concepteur dispose d'un unique corps volumique par set, respectant les surfaces fonctionnelles et les propriétés chimiques et physiques issues du cahier des charges.

3.4.a Application au cas d'étude

Puisque le graphe des fonctions de la grille de perçage a été défini à l'étape précédente, nous pouvons maintenant générer le solide de départ à partir des surfaces fonctionnelles. Pour réaliser les perçages et permettre l'intégration des éléments extérieurs (vis et coussinets), nous prendrons une épaisseur minimale de matière de 5 mm. Ce choix dimensionnel se base sur les connaissances métiers du procédé. Ceci nous permet d'obtenir un premier ensemble de volumes fonctionnels (Figure 38).

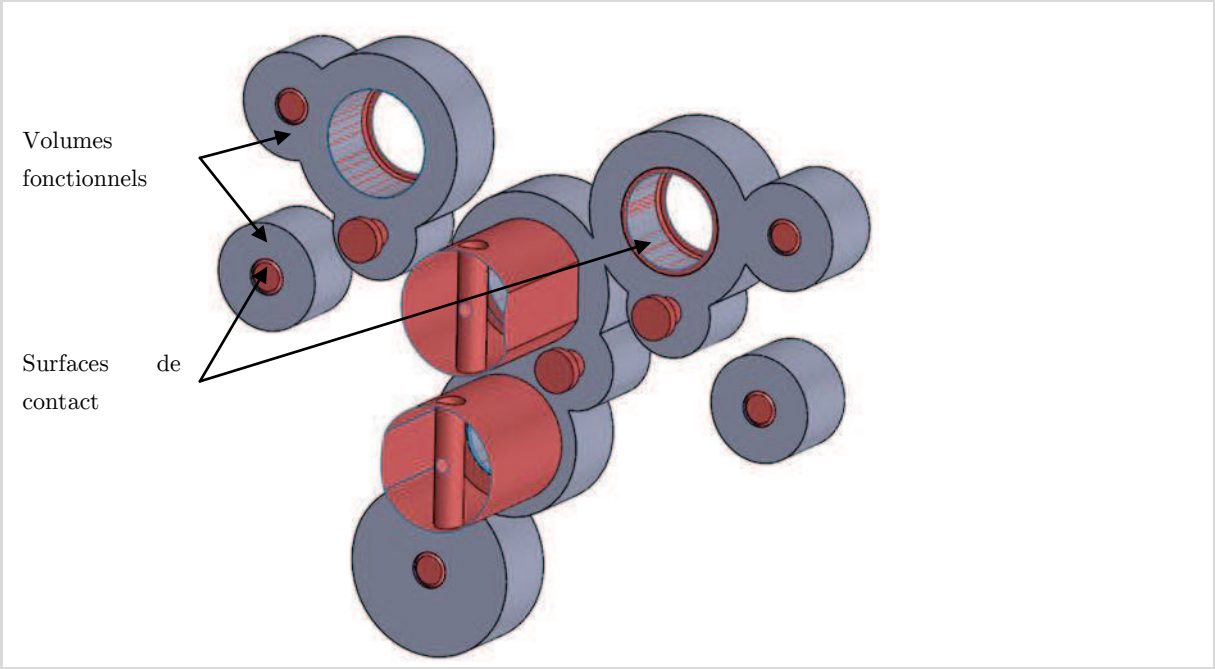


Figure 38 – Solide de départ avant triangulation

Nous pouvons maintenant générer la surface englobante de la pièce en réalisant une triangulation de Delaunay sur ces premiers volumes. Dans notre cas, le résultat est relativement simple puisque toutes les surfaces fonctionnelles sont des cylindres parallèles compris entre deux plans parallèles et perpendiculaires aux axes des cylindres. Afin d'alléger au maximum les formes gauches de la pièce pour le maillage, les volumes fonctionnels cylindriques précédents sont intégrés dans un volume prismatique prenant appui sur ces cylindres. Le résultat est présenté en Figure 39.

[30] Une triangulation de Delaunay vise à maximiser la valeur du plus petit angle de l'ensemble des angles d'un triangle. Cela permet, à partir d'un nuage de points, de créer un maillage représentant son enveloppe convexe, soit le plus petit polyèdre englobant de cet ensemble.

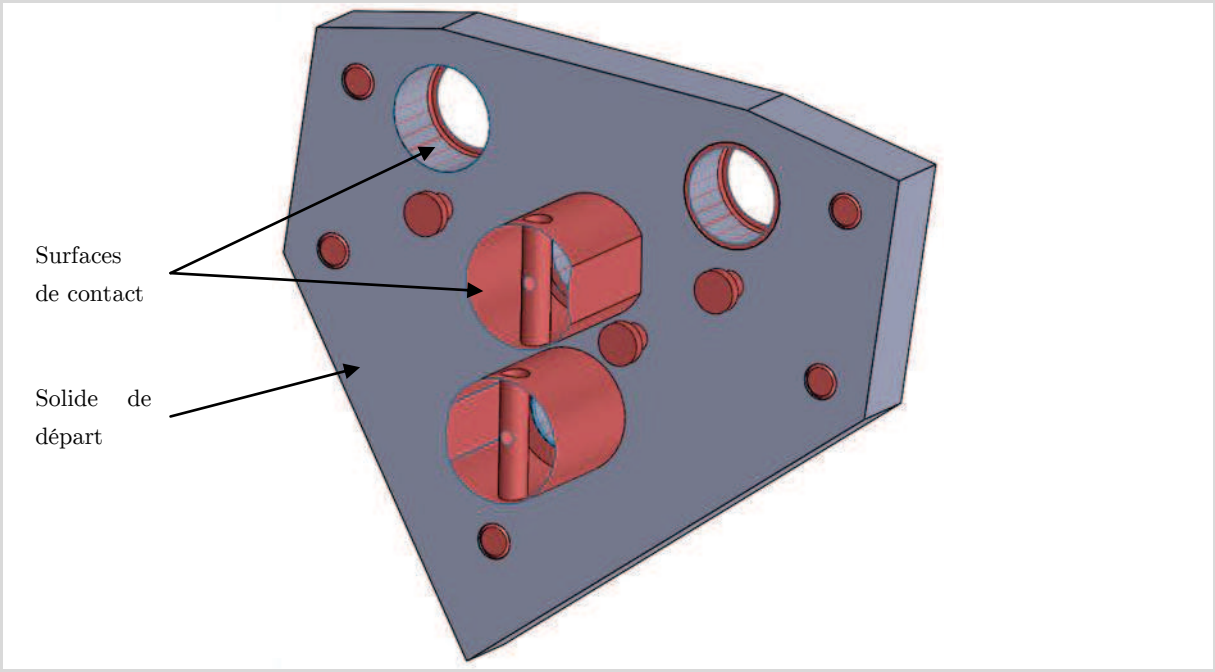


Figure 39 – Solide de départ de la grille de perçage

Nous voyons donc que le solide de départ ainsi généré respecte à la fois les surfaces fonctionnelles, les volumes fonctionnels ainsi que les surfaces de contact. Nous devons maintenant valider que la pièce respecte également les dernières contraintes imposées par le cahier des charges : les contraintes mécaniques.

3.5 Sélection de la machine

A partir du solide de départ et des listes restreintes des machines utilisables, il est maintenant possible de déterminer la machine que nous utiliserons par la suite. Ce choix se base sur les contraintes suivantes :

- Le volume de travail de la machine ;
- Les vitesses d'extrusion et de déplacement ;
- La résolution de la machine ;
- La précision de la machine ;

3.5.a Volume de travail de la machine

Le volume de travail est un volume orienté par rapport à la direction de fabrication et dont les dimensions correspondent aux limites de fabrication de la machine. Il est important de noter que pour deux machines présentant des volumes de fabrication de dimensions identiques mais dont l'orientation est différente, alors les caractéristiques mécaniques et l'état de surface d'une pièce occupant totalement ce volume seraient également différentes (Figure 40).

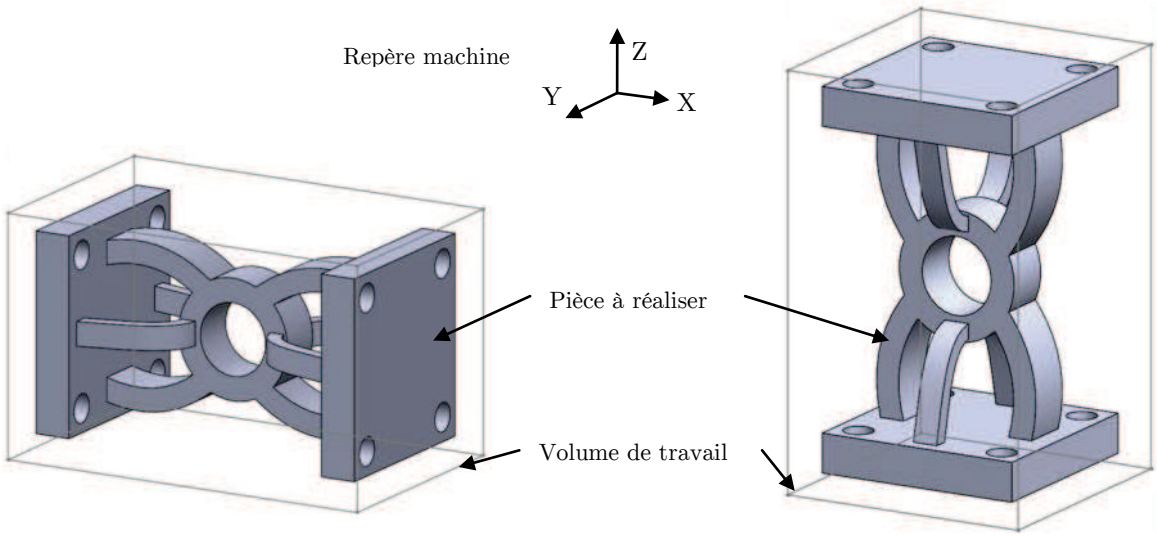


Figure 40 – impact de l'orientation du volume de travail sur l'orientation de la pièce

3.5.b Vitesse d'extrusion et de déplacement

Chaque machine dispose de vitesses nominales d'extrusion et de déplacement de la buse dépendant du matériau utilisé. Le concepteur doit donc avoir à sa disposition un tableau, mis à jour, indiquant ces données. En effet, ces vitesses impactent directement le temps d'impression et donc sur le coût horaire C de la pièce. Celui-ci peut être calculé à l'aide de la formule simplifiée suivante :

$$C = P_c \times T_c / N + P_m \times V_m + P_M \times T_M$$

P_c, T_c et N correspondent respectivement au prix horaire de la conception, au temps dépensé pour la conception et au nombre de pièces à fabriquer. P_m et V_m sont respectivement le prix par unité de volume du matériau et le volume nécessaire de matière pour la réalisation de la pièce. P_M et T_M sont respectivement le prix horaire de la machine et le temps nécessaire à la fabrication d'une pièce. Le temps de fabrication est donc un levier important pour le coût final de la pièce.

3.5.c Résolution et précision de la machine

La résolution correspond à la hauteur de chaque couche de matière. Cette valeur est réputée constante durant la fabrication de la pièce. Pour donner un ordre de grandeur, les machines de type FDM ont une résolution au dixième de millimètre[31] tandis que les machines de type SLS peuvent atteindre une résolution de quelques microns[32].

La précision de la machine correspond aux différentes tolérances qu'il est possible d'obtenir suivant les différents axes de la machine. Ce paramètre varie en fonction plusieurs paramètres pilotables que nous étudierons plus en aval de cette étape, tels que la stratégie de dépôt, l'orientation de la pièce ou encore la position de la pièce sur le plateau, mais également du matériau utilisé sur la machine (Kao & Prinz, 1998). En revanche, la précision dépend également de l'architecture de la machine et des matériaux qui la composent, cependant ces paramètres ne peuvent être changés par le concepteur. La résolution est très importante puisqu'elle va conditionner l'orientation de la

[31] https://eu.makerbot.com/shop/de/3d-drucker/replicator/?__shop=1
[32] http://www.3dsystems.com/3d-printers/production/proxtm-400

pièce au cours de la conception afin de respecter l'état de surface imposé par le cahier des charges. Quelque soit le procédé, et indépendamment de la résolution de la machine, l'état de surface le plus fin est obtenu dans les trois cas suivants :

- dans la direction de fabrication (Figure 41 - a) ;
- dans une inclinaison proche de la direction de fabrication (Figure 41 - b) ;
- perpendiculairement à la direction de fabrication (Figure 41 - c).

En revanche, plus l'inclinaison de la surface de la pièce s'éloigne de la perpendiculaire à la direction de fabrication, plus le phénomène d'*escalier* devient visible (Figure 41 - c). Or le défaut de surface lié à un escalier dont la pente très faible est difficilement rattrapable, même si la résolution de la machine est de l'ordre du micron.

Bien qu'un traitement de surface soit parfois possible, il est toujours préférable de limiter le nombre d'étapes nécessaires pour obtenir une pièce fonctionnelle. De plus, les surfaces générées peuvent ne pas être accessibles pour une éventuelle opération de parachèvement. Il faut donc trouver un compromis entre les contraintes d'état de surface, l'orientation de la pièce, la précision et la résolution de la machine.

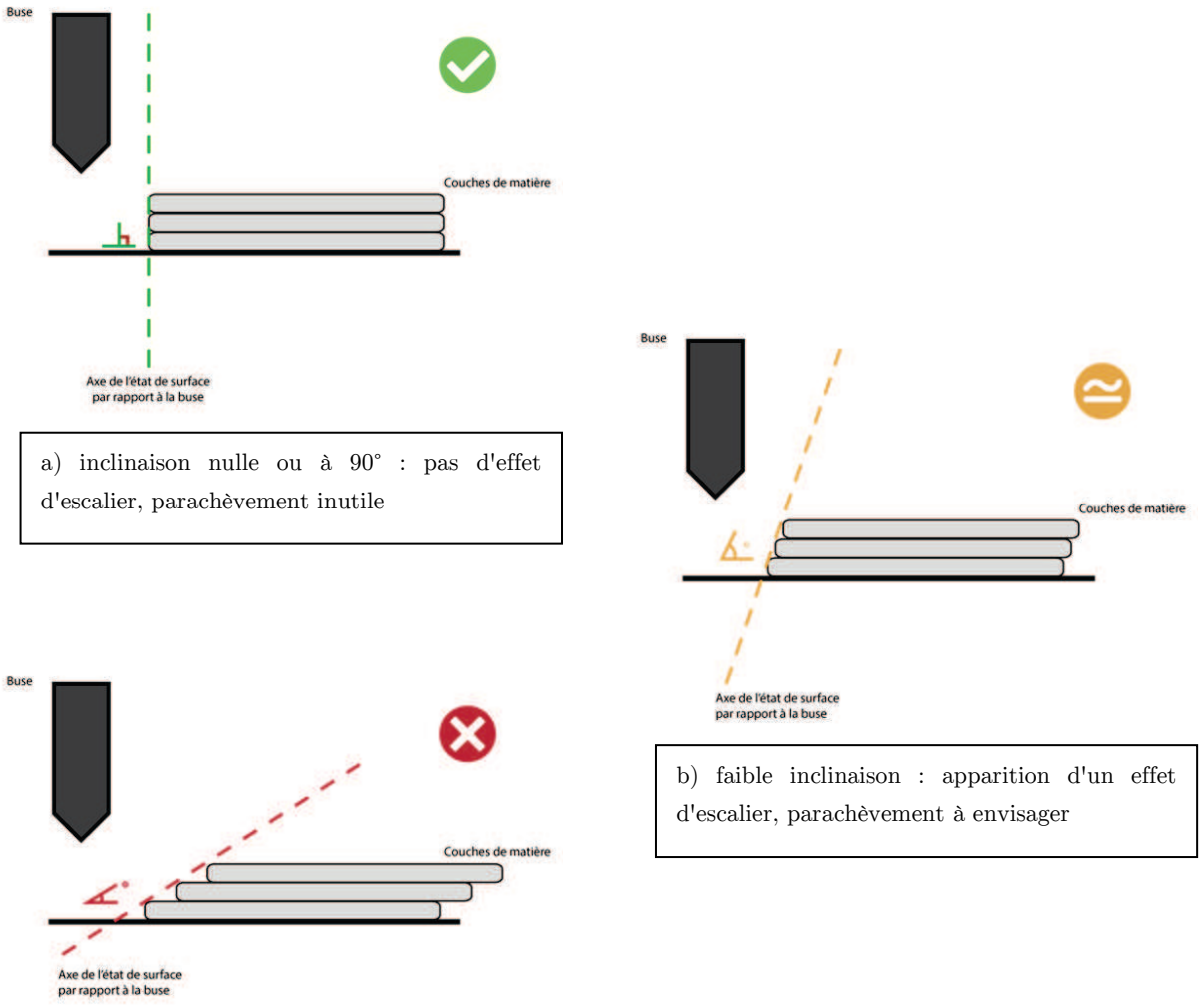


Figure 41 – orientations et état de surface

3.5.d *Application au cas d'étude*

La résolution de fabrication et la précision de positionnement de la buse sont équivalentes pour les deux machines :

- Résolution : 0,1 mm ;
- Précision : 2,5 microns sur les axes x et y, 11 microns sur l'axe z.

En revanche, les dimensions du volume englobant de notre solide de départ sont 183 x154 x 48 mm. Or, la MakerBot Replicator 2X présente un espace de travail de 250 x x160 x 150 mm tandis que la MakerBot Replicator Dual Extruder dispose d'un espace de travail de 225 x 145 x 150 mm. Il n'est donc possible de fabriquer la pièce que sur la machine MakerBot Replicator 2X.

Nous choisissons donc de poursuivre notre méthodologie en prenant comme machine de fabrication additive une MakerBot Replicator 2X.

3.6 Analyse par Eléments Finis

Afin de poursuivre la conception, il est nécessaire de vérifier que chaque set valide les contraintes mécaniques imposées par le cahier des charges. Dans le cas contraire, notre méthodologie aboutirait à une impasse lors de l'optimisation topologique. Cependant, aucune donnée n'est encore renseignée concernant l'orientation de la pièce, qui influe sur la résistance mécanique de celle-ci. En effet, la réalisation d'une pièce couche par couche en FA impose une structure anisotrope du matériau. L'orientation de la pièce conditionne donc sa tenue mécanique (Figure 42).

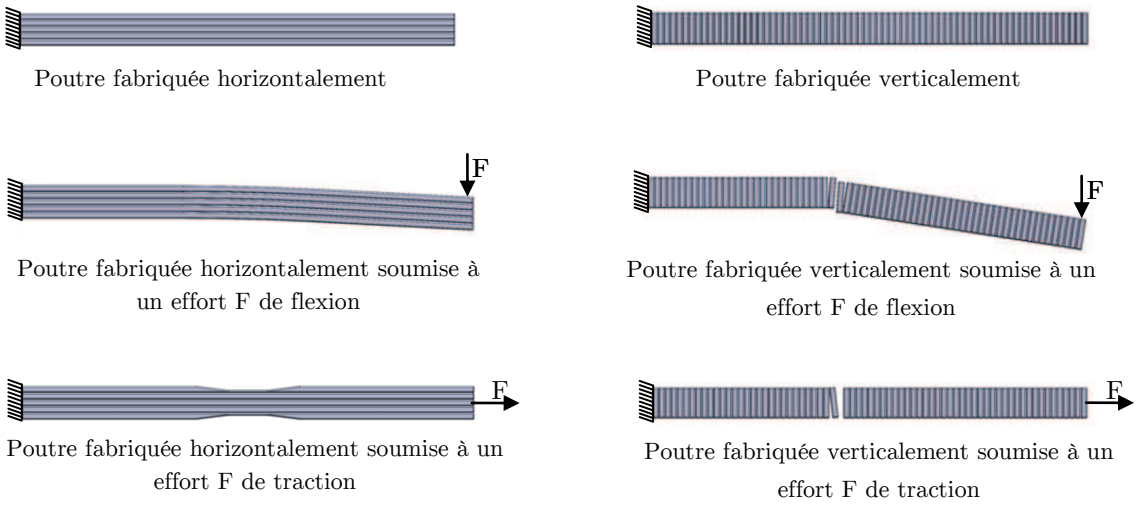


Figure 42 – Impact de l'orientation de la pièce sur sa tenue mécanique

La stratégie adoptée est donc de réaliser une étude par éléments finis au pire des cas, de manière à anticiper toutes les orientations possibles nous ne serons donc pas contraints par l'orientation de la pièce dans la machine d'un point de vue respect des contraintes mécaniques. Nous fixerons donc le module d'Young du matériau à sa valeur minimale pour cette étape. L'étude de traction menée au chapitre 5 de cette thèse a notamment pour but d'établir cette valeur pour de l'ABS.

3.6.a Les contraintes mécaniques

Les contraintes mécaniques regroupent toutes les contraintes d'effort auxquelles la pièce est soumise. Chaque contrainte est exprimée par sa norme, sa zone d'application et sa direction. Elles sont utilisées pour l'orientation de la pièce ainsi que lors de l'optimisation topologique de la pièce.

3.6.b Analyse par éléments finis

Dans le cas idéal de la conception, la pièce répondant aux besoins du cahier des charges peut être fabriquée en un seul volume. Dans ce cas, la préparation de la phase d'analyse par éléments finis consiste à appliquer tous les efforts extraits du cahier des charges sur une unique pièce. Le résultat que propose le logiciel d'analyse permet donc de savoir directement si la pièce répond au cahier des charges. En revanche, dans le cas où la pièce est décomposée en sets, les efforts appliqués à chaque entité ne sont pas ceux décrits par le cahier des charges. Dans ce cas, le concepteur doit réaliser une analyse par éléments finis sur la pièce globale. Puis, pour chaque set, il vient intégrer les efforts calculés à l'interface entre deux surfaces de contact. Ainsi, nous saurons si la pièce résultante est conforme au cahier des charges malgré les zones fragilisées par l'assemblage des sets.

Si l'analyse par éléments finis indique que la pièce résiste aux contraintes mécaniques du cahier des charges, le solide de départ est validé et le concepteur peut passer à l'étape d'orientation de la pièce.

En revanche, si l'analyse indique que la pièce présente des zones de rupture, plusieurs options se présentent au concepteur (Figure 43).

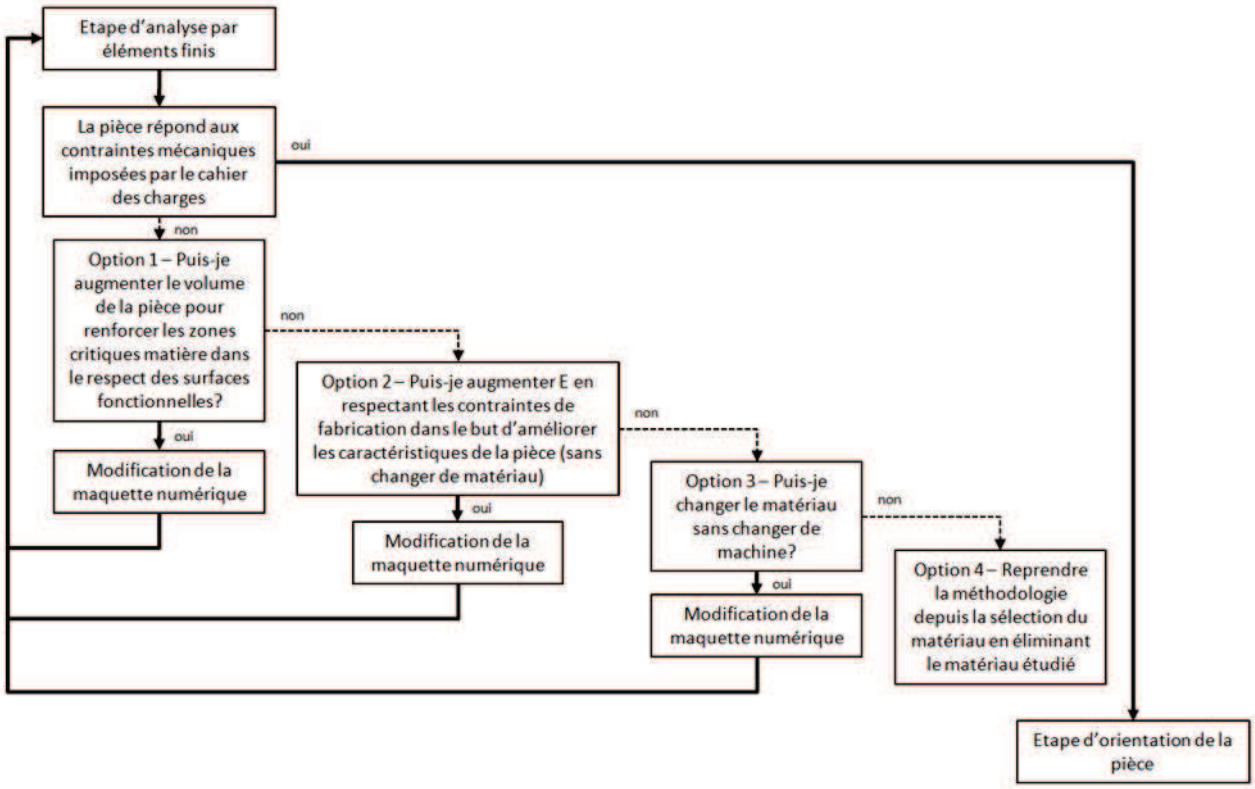


Figure 43 - Cas de figure où l'analyse par éléments finis invalide la pièce

– Option 1 : la première option est de renforcer la pièce aux endroits indiqués par l'analyse par éléments finis. En effet, générer un volume via une triangulation de Delaunay permet de minimiser le volume de matière nécessaire pour l'assemblage des surfaces fonctionnelles. Cependant, rien n'indique que ce volume soit optimisé ni réaliste pour le passage des efforts. Il est donc possible d'ajouter de la matière là où cela

semble nécessaire. Si tel est le cas, le concepteur doit reboucler par une analyse EF supplémentaire pour vérifier si le nouveau solide de départ satisfait les contraintes du cahier des charges. Si oui, le solide est validé et le concepteur passe à l'étape suivante, si non, le concepteur reboucle à l'option 1 tant que les contraintes du cahier des charges et de l'espace de travail de la machine lui permettent ou passe à l'option 2.

- Option 2 : la seconde option est de rehausser légèrement le module d'Young utilisé sans que cela n'impacte l'état de surface des surfaces fonctionnelles. Pour ceci, le concepteur doit analyser l'orientation des efforts et des surfaces fonctionnelles. A l'aide de ces informations, le concepteur oriente ensuite la pièce de manière à positionner les efforts le plus perpendiculairement possible à la direction de fabrication tout en validant l'état de surface des surfaces fonctionnelles. Cette option est sans doute la plus délicate puisqu'elle impose une préorientation de la pièce avant la validation des contraintes mécaniques. S'il existe une orientation de la pièce satisfaisant à toutes ces conditions, alors le concepteur peut augmenter la valeur du module d'Young pour réaliser une nouvelle analyse EF sur la pièce. De même que pour l'option 1, si la pièce satisfait les contraintes mécaniques, le concepteur passe à l'étape suivante de la méthodologie, sinon, il est possible de réitérer l'option 1 ou d'envisager l'option 3.
- Option 3 : la troisième option consiste à changer le matériau de la pièce. Cette option est à envisager en dernier recours puisqu'elle impose de recommencer la méthodologie. En effet, un nouveau matériau implique potentiellement une nouvelle machine de FA, donc potentiellement un nouveau volume de fabrication, donc potentiellement un nouveau découpage des sets et potentiellement de nouveaux solides de départ. Pour savoir quand envisager cette option, un bon indicateur est le poids maximum autorisé pour la pièce.

Dans le cas où la conception de la pièce s'arrêterait après cette étape de la méthodologie, il serait nécessaire de reprendre la géométrie initiale de la pièce dans le cas d'une modification de E ou d'un changement de matériau afin d'obtenir un volume fonctionnel le plus réduit possible. Cependant, cette méthode de validation de la pièce augmente considérablement le nombre d'itération. Or une analyse par élément finis peut durer de quinze minutes à plusieurs heures et notre méthodologie intègre une étape d'optimisation topologique dont le but est de proposer une géométrie réellement optimisée de la pièce. Pour ces deux raisons, il est donc possible d'envisager les options 2 et 3 sans modifier la géométrie précédente du volume de départ.

3.6.c Application au cas d'étude

Maintenant que nous disposons du solide de départ et du matériau choisi, nous pouvons réaliser une première étude par éléments finis. Dans un premier temps, nous nous placerons dans le cas le plus défavorable, soit de l'ABS imprimé perpendiculairement aux directions des efforts.

Pour cette étude, nous pouvons reprendre les surfaces de contact (intégrées lors de la modélisation du solide de départ) et nous baser sur les efforts fournis par le cahier des charges. Dans notre cas, il s'agit de cinq plots de contact qui viennent réaliser un appui-plan sur la pièce ainsi que deux vis de fixation venant plaquer la pièce contre les plots. Les vis appliquent un effort de 5000 N chacune sur leur surface de contact.

Le résultat de la première passe d'analyse de la pièce par éléments finis est le suivant (Figure 44).

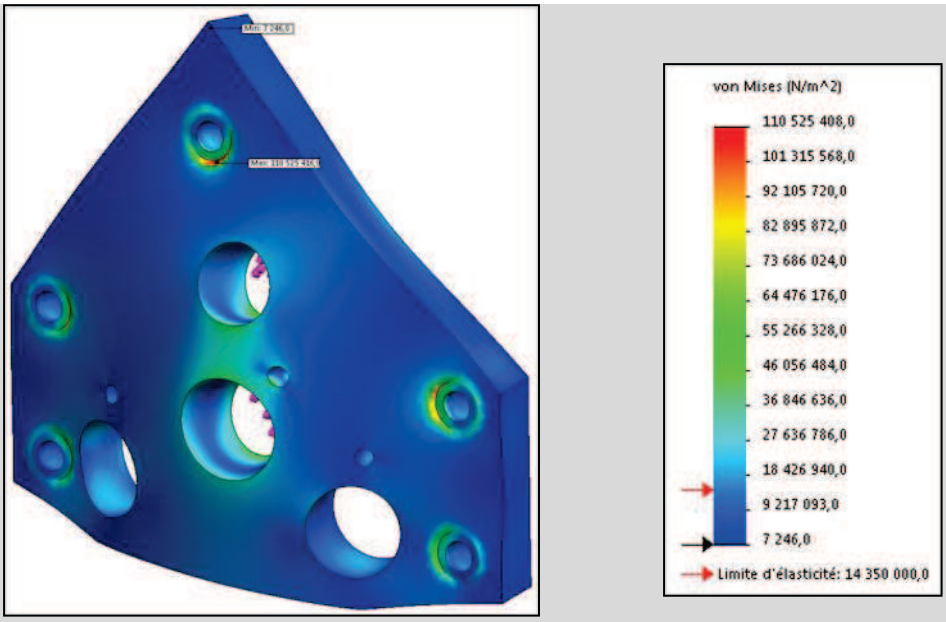


Figure 44 - résultat d'analyse EF de la grille de perçage pour de l'ABS à E mini

Nous constatons que les efforts appliqués sont trop importants et amènent à une rupture de la pièce. Nous allons donc épaissir la pièce de 20 mm du côté outil. Cette épaisseur est la limite pour respecter les volumes de contact. Nous obtenons également un maillage simple pour les EF. De plus, la matière superflue sera éliminée lors de la phase d'optimisation topologique. Après analyse EF de la pièce, le résultat est le suivant (Figure 45).

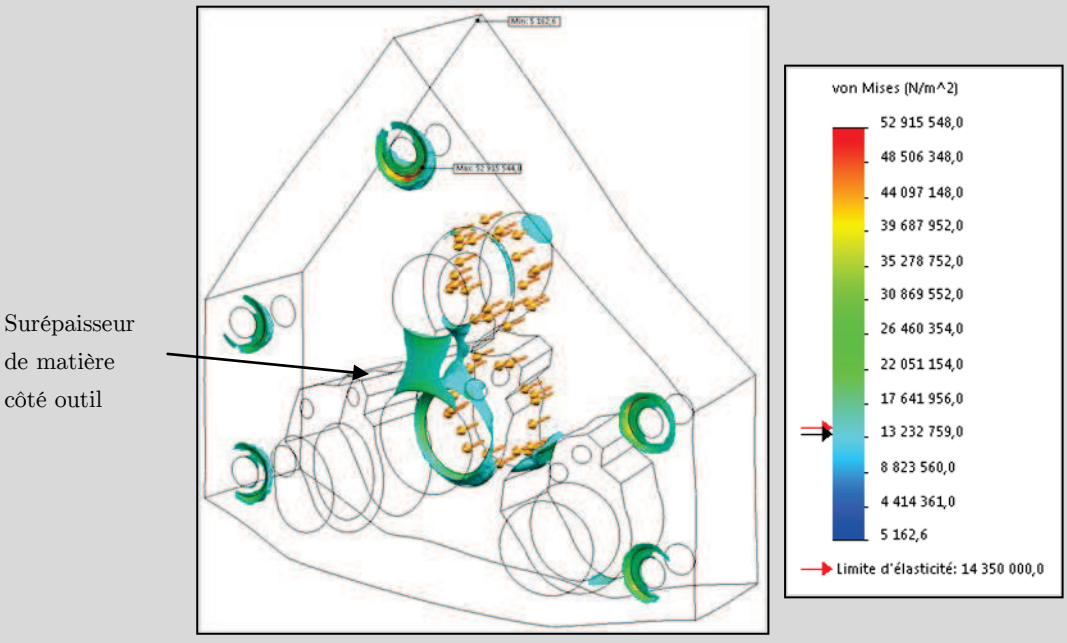


Figure 45 - résultat d'analyse EF de la grille de perçage épaissie pour de l'ABS à E mini

Nous constatons que la pièce ne valide toujours pas les contraintes mécaniques. Or, il est possible d'effectuer un second ajout de matière sur la pièce. Nous pouvons donc, dans un second temps, envisager à nouveau l'option 1 tout en respectant les volumes de contact. Pour ceci, nous allons épaissir la pièce sur 3 mm sur la surface concernée. Cette épaisseur permet de respecter la distance minimale entre la grille de perçage et la pièce à percer. Après une troisième passe d'analyse, nous obtenons la pièce suivante (Figure 46).

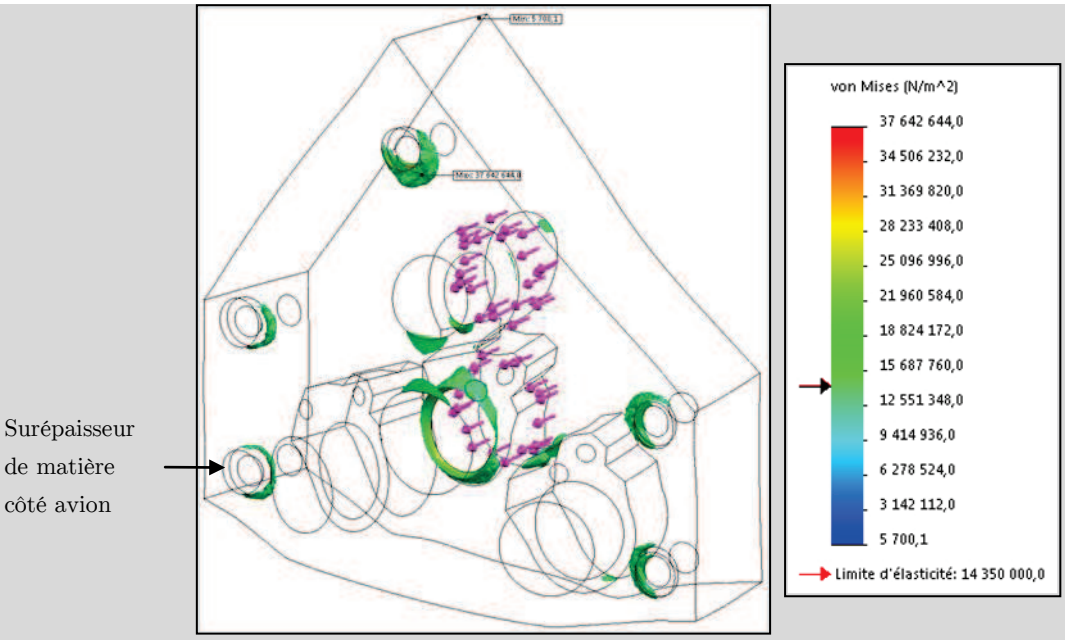


Figure 46 - résultat d'analyse EF de la grille de perçage maxi pour de l'ABS à E mini

Nous constatons, malgré l'augmentation du volume de matière de la pièce, que celle-ci ne respecte toujours pas le cahier des charges. Nous devons donc envisager l'option 2. Les surfaces fonctionnelles à réaliser sont des cylindres qui viendront accueillir des pièces métalliques. Une précision de fabrication au dixième est suffisante. De manière à respecter ces formes et éviter les effets d'escalier, il serait préférable de les réaliser parallèlement à la direction de fabrication. De plus, les efforts mécaniques sont parallèles aux différents perçages de la pièce et font travailler celle-ci en cisaillement. Or, la meilleure résistance au cisaillement d'une pièce étant obtenue parallèlement à la direction de fabrication, il est préférable d'orienter ces efforts perpendiculairement aux fibres. Ces deux informations (surfaces et efforts) nous suggèrent donc de fabriquer notre pièce selon la même orientation : les perçages parallèles à la direction de fabrication. Nous nous retrouvons dans le cas idéal où le module d'Young est maximum. Ceci nous permet de réaliser une quatrième passe d'éléments finis (Figure 47).

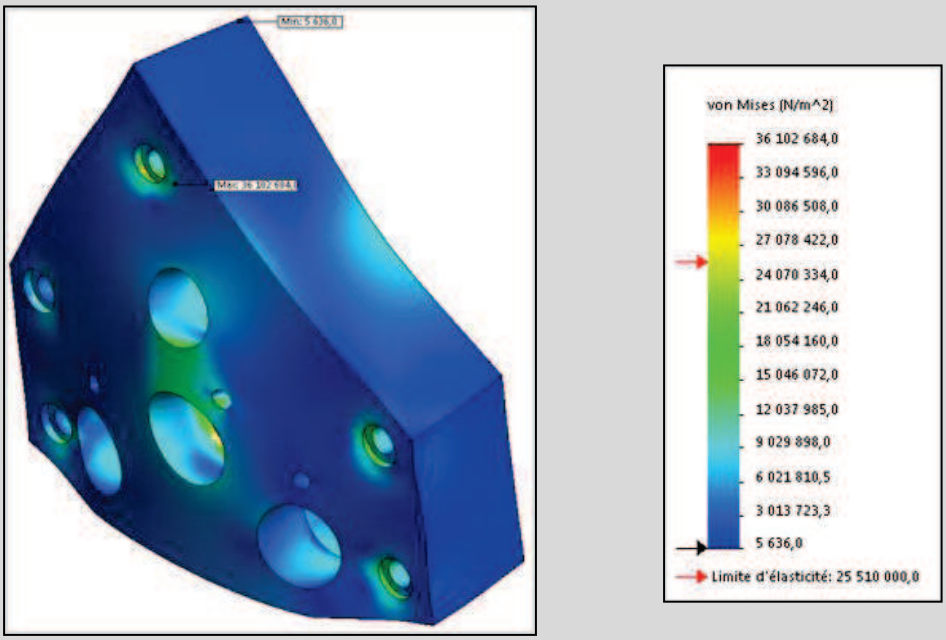


Figure 47 - résultat d'analyse EF de la grille de perçage maxi pour de l'ABS à E maxi

Néanmoins, la pièce ne respecte toujours pas les contraintes du cahier des charges. A ce stade, il est nécessaire d'envisager de changer de matériau. Le cahier des charges nous permettant d'envisager l'ULTEM, bien que ce matériau soit environ dix fois plus cher que de l'ABS, nous pouvons explorer cette voie en effectuant une cinquième et dernière étape d'analyse par éléments finis sur le solide précédent (Figure 48). Si elle échoue, il faudra envisager de changer de procédé de fabrication. Le temps de calcul d'une analyse par éléments finis peut prendre jusqu'à plusieurs heures, dépendamment de la complexité de la pièce et des conditions limites. L'optimisation topologique vise à réduire le volume de la pièce en se basant sur les contraintes internes déterminées également par des étapes successives d'analyse par élément finis. Ainsi, dans le cas d'un changement de matériau, il est plus économique de se baser le dernier solide étudié que de repartir de zéro par rapport à la géométrie de la pièce. Le résultat de cette analyse est le suivant :

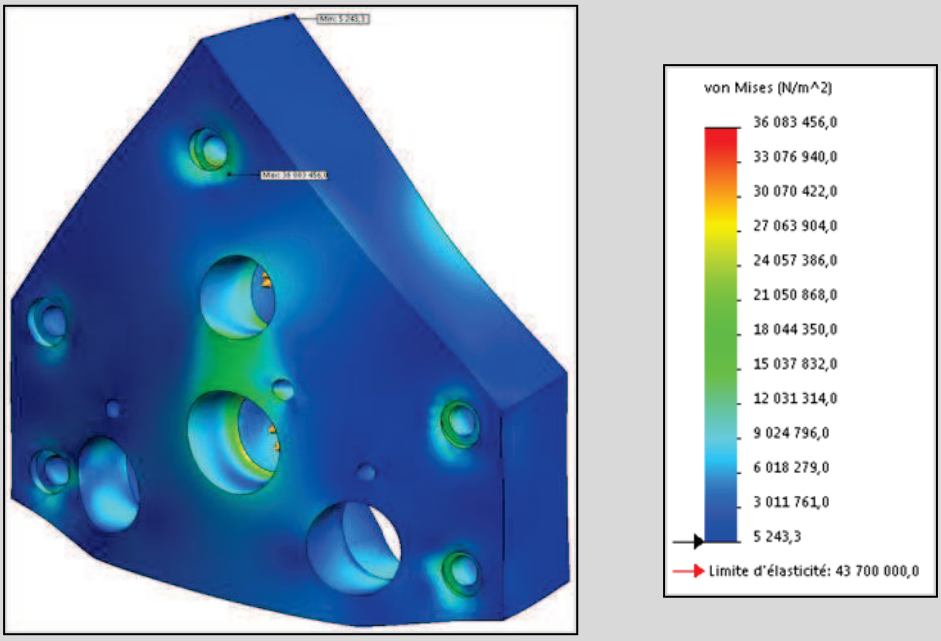


Figure 48 - résultat d'analyse EF de la grille de perçage maxi pour de l'ULTEM à E mini

Nous constatons que pour cette configuration, la pièce satisfait le cahier des charges.

A titre d'illustration, chaque étape d'analyse par éléments finis a demandé 30 minutes de préparation et de calcul, soit un total de 2H30. Nous avons également effectué une analyse par éléments finis pour l'ULTEM en repartant du premier solide de départ (Figure 39). Il nous a également fallu cinq étapes d'environ 30 minutes avant de trouver une géométrie satisfaisant au cahier des charges. Le fait de repartir du dernier volume étudié nous aura donc fait consommer 2 heures supplémentaires pour le même résultat.

A cette étape de la méthodologie, la partie la plus importante du travail de conception est réalisée. En effet, nous disposons actuellement d'une pièce mécaniquement valide dont les formes permettent l'assemblage avec tous les éléments extérieurs et qui possèdent les propriétés physiques et chimiques désirées. De plus, nous avons la garantie que cette pièce est fabricable sur au moins une machine de FA.

Il est maintenant nécessaire d'orienter la pièce de manière à déterminer son module d'Young équivalent exact, sauf si ce calcul a déjà été effectué précédemment, et à l'optimiser topologiquement afin de limiter la quantité de matière nécessaire à sa fabrication.

Section 4 Optimisation du Solide de départ

Dans cette partie, nous allons détailler les différentes étapes permettant de réaliser une optimisation topologique de la pièce (Figure 49). Pour rappel, le choix de ce type d'optimisation a été motivé au cours de notre état de l'art. La première étape consiste à préorienter la pièce dans l'espace machine en fonction des contraintes mécaniques et d'état de surface qui sont prises en compte dans le solide de départ (Figure 28). Une fois la pièce orientée de manière à satisfaire ces deux types de contraintes, le choix d'une stratégie de fabrication, pilotant le module d'Young équivalent E de la pièce, est défini. L'optimisation topologique peut alors être effectuée sur le solide de départ pour lequel un comportement mécanique, dépendant du matériau, a été appliqué.

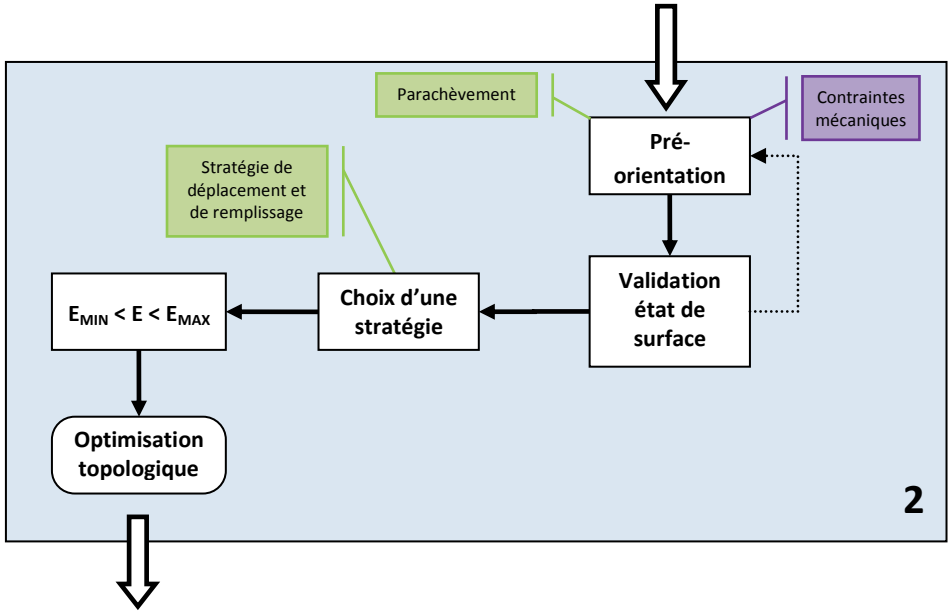


Figure 49 - Phase de la méthodologie relative à l'optimisation de la géométrie du solide de départ

4.1 Préorientation de la pièce

Une fois le solide de départ généré, celui-ci est pré-orienté dans l'espace machine en fonction de quatre données :

- Le respect des contraintes d'état de surface des surfaces fonctionnelles (connues grâce au graphe des fonctions) ;
- La qualité de surface qu'il est possible d'obtenir via le procédé (fournie suite à l'étape de sélection de la machine) ;
- La facilité de mise en place des parachèvements possibles sur le matériau choisi ;
- l'orientation des efforts extérieurs sur la pièce (indiquées lors de l'étape d'analyse par éléments finis).

Le but de l'orientation de la pièce est de trouver un compromis entre la maximisation de l'état de surface des surfaces fonctionnelles et la maximisation de la résistance mécanique de la pièce dépendamment de l'orientation des efforts afin de déterminer la direction idéale de fabrication. Cette orientation est réalisée de manière automatique sous SolidWorks à l'aide d'une optimisation multi-objectif pilotée par l'état de surface au pire des cas qu'il est possible d'appliquer sur les surfaces fonctionnelles avant parachèvement. Actuellement, cet indicateur n'est pas encore implémenté.

Dans le cas où l'indicateur est inférieur ou égal à l'état de surface du cahier des charges, cela signifie que les surfaces fonctionnelles auront un état de surface satisfaisant dès la phase de fabrication. Sinon, cela signifie qu'une opération de parachèvement est envisagée après fabrication de la pièce. La valeur de l'indicateur dépend de la

facilité de mise en place d'une opération de parachèvement pour le matériau choisi. Par exemple, dans le cas d'une pièce réalisée en ABS à l'aide d'un procédé FDM, une opération de parachèvement possible, que nous traiterons dans le chapitre 5 de ce mémoire, est le traitement des surfaces par attaque d'une brume d'acétone. Ce procédé permet notamment le parachèvement de surfaces intérieures à la pièce, inaccessibles pour une machine conventionnelle. Le logiciel priorisera donc le respect des contraintes mécaniques par rapport à l'état de surface. Actuellement, dans le cas d'une pièce réalisée en titane par procédé SLS, il ne sera pas possible de parachever les volumes intérieurs à la pièce. Le logiciel tiendra compte de ce fait et priorisera l'orientation de la pièce en fonction de l'état de surface (Figure 50).

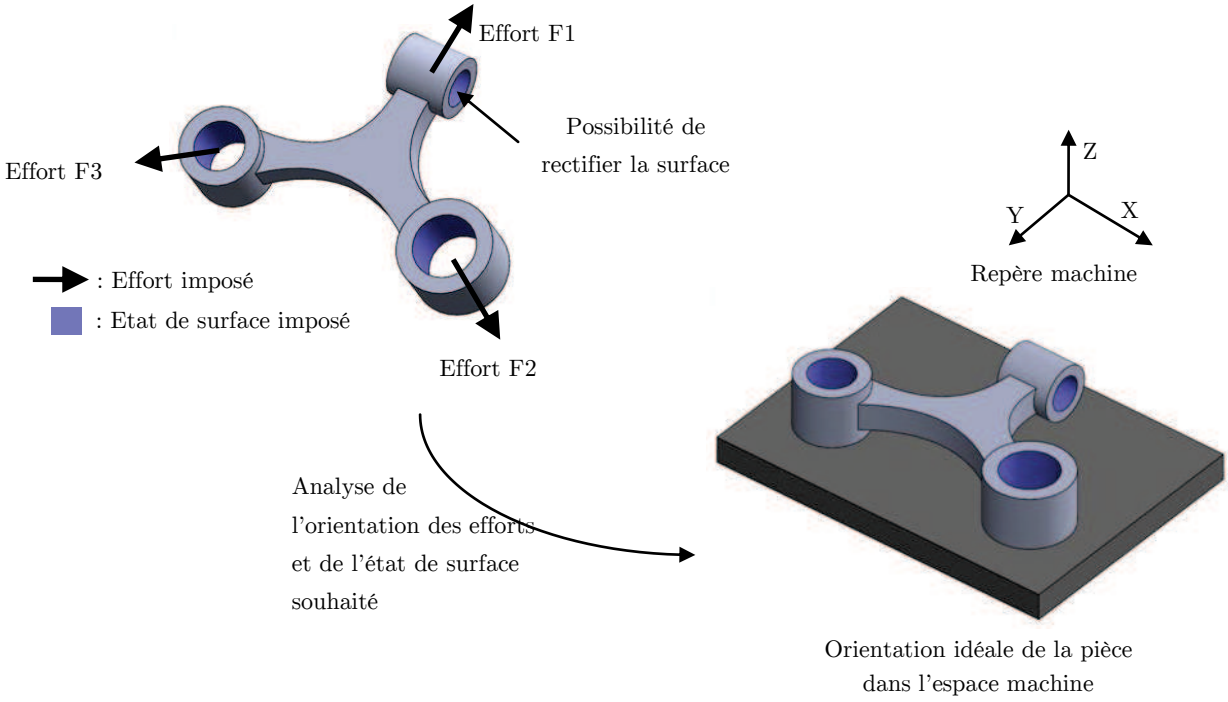


Figure 50 – Orientation de la pièce en fonction de la résistance mécanique et de l'état de surface souhaités

Un abaque, fourni au concepteur, indique les valeurs maximales d'état de surface qu'il est possible d'obtenir en fonction du matériau et de l'accessibilité des surfaces. Une fois la valeur choisie, l'optimisation propose une ou plusieurs orientations de la pièce possible permettant d'atteindre ces états de surface et proposant la meilleure résistance mécanique. Dans le cas où aucune proposition ne permet de satisfaire à la fois les contraintes mécaniques et les contraintes d'état de surface pour le solide de départ envisagé, il est alors nécessaire de réviser, si possible, la constitution des différents sets, afin de limiter le nombre de contraintes par pièce. Si la géométrie du solide de départ ne peut être modifiée, il faut alors reprendre la méthodologie à partir du choix du matériau pour offrir davantage de libertés d'orientation.

4.1.a Application au cas d'étude

Dans notre cas, la pièce a été orientée lors de l'étape d'analyse par éléments finis en suivant les préconisations précédentes. En effet, les efforts sont orientés de manière à respecter au mieux l'orientation des fibres (en l'occurrence, l'orientation de la pièce est idéale) et l'état de surface de chaque surface fonctionnelle est assuré. L'orientation de la pièce est donc la suivante (Figure 51) :

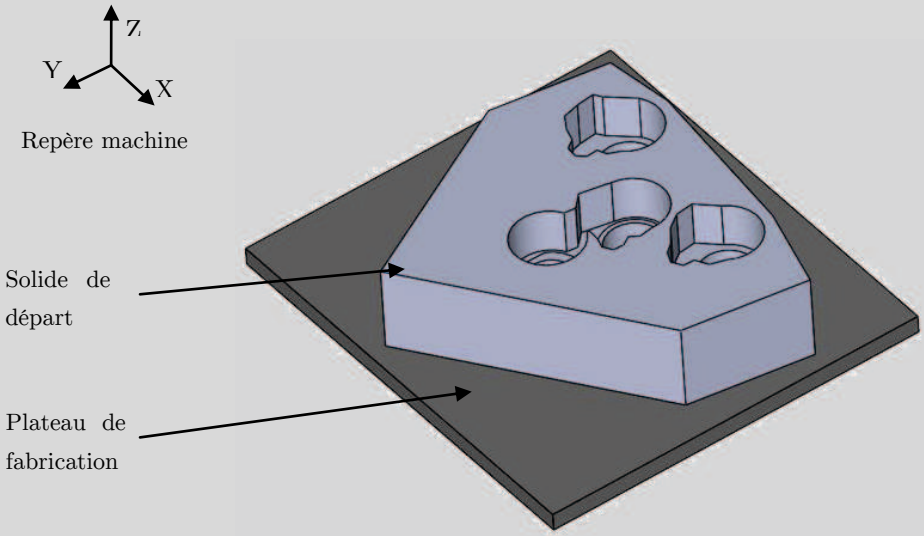


Figure 51 - Grille de perçage orientée

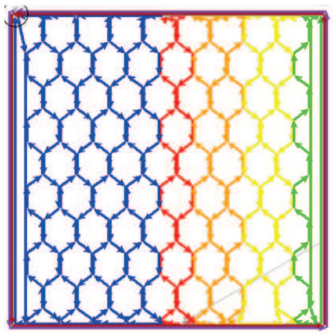
4.2 Stratégie adaptée

Suivant la préorientation de la pièce ainsi que la machine choisie pour la fabrication, le concepteur doit ensuite sélectionner une orientation finale (simple rotation autour de l'axe z) et une stratégie de fabrication. L'orientation dépend du volume machine disponible ainsi que de la forme de la pièce. En effet, les tensions internes aux fibres de la pièce générées lors de la fabrication tendent à déformer la géométrie obtenue. Ceci ce manifeste par du gaufrage et des criques. L'orientation de la pièce et la stratégie adoptées permettent de limiter ces effets. Une fois la pièce fabriquée, il est possible d'effectuer un recuit afin de libérer les tensions internes. Dans l'idéal, le concepteur choisira la stratégie qui permettra d'obtenir la meilleure résistance mécanique par rapport à l'orientation des efforts sans déformation de la pièce durant sa fabrication. De manière générale, la stratégie de fabrication repose principalement sur trois critères :

- la stratégie de déplacement
- la stratégie de remplissage ;
- l'orientation des fibres.

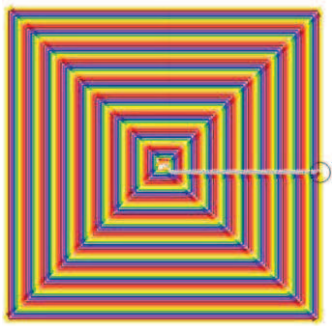
4.2.a Stratégie de déplacement et de remplissage

La stratégie de déplacement et de remplissage correspond au chemin suivi pour le balayage de chaque couche de matière par la tête d'impression. La stratégie de remplissage peut se décomposer en trois principaux critères : l'épaisseur des parois, l'épaisseur des couches extérieures et le remplissage interne.



Remplissage en nid d'abeille

Remplissage avec fibres parallèles



Remplissage avec fibres en spirales

Figure 52 – Exemples de stratégie de fabrication de pièce

L'épaisseur des parois e_p est un entier qui varie entre 1 et l'infini. Si $e_p = 1$, la pièce comportera une seule paroi extérieure dont l'épaisseur dépend principalement de la résolution de la machine. Plus e augmente et plus l'épaisseur de la paroi devient importante. Cependant, quelque soit le nombre de parois, la construction de celles-ci se fera toujours en spirale de manière à donner à la surface de la pièce un aspect le plus régulier possible. Dans le cas ou $e_p \to \infty$, le nombre de parois est alors maximum et la pièce est pleine (Figure 52).

Les couches extérieures correspondent aux couches de matières qui forment le dessous et le dessus de la pièce. L'épaisseur des couches extérieures e_{ce} varie également entre 1 et l'infini. Si $e_{ce} = 1$, cela signifie que les couches de matière assurant la génération des surfaces extérieures de la pièce auront une épaisseur égale à la résolution de la machine suivant Z. Dans le cas où $e_{ce} \to \infty$, le nombre de couches de matières qui assurent la présence des surfaces est alors maximum et la pièce est pleine. Si e_p et e_{ce} sont faibles (de l'ordre de 10), on obtient une pièce théoriquement creuse, ce qui permet d'économiser de la matière lors de la fabrication de la pièce (Figure 52).

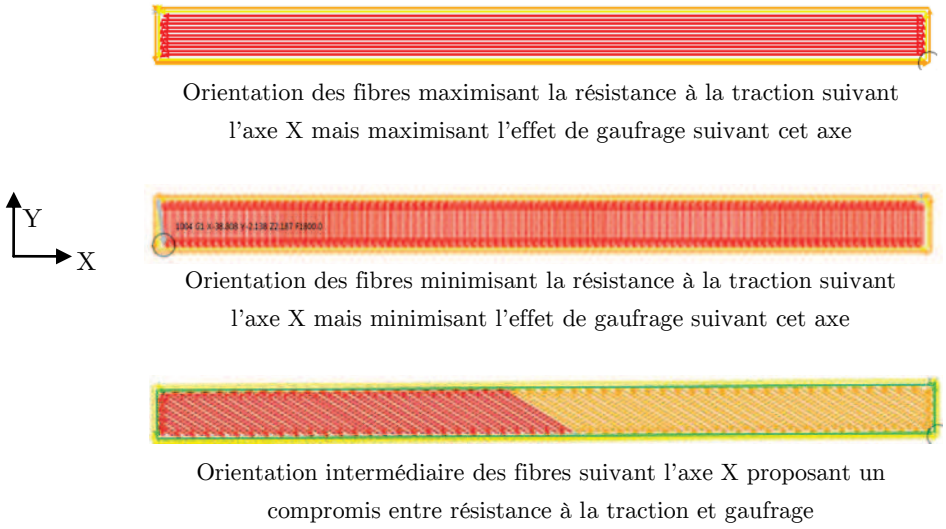
De manière à ce que les couches supérieures de la pièce ne s'effondrent pas, il est nécessaire d'intégrer un remplissage interne à la pièce. Ce remplissage correspond à un support permanent de densité variable permettant de rigidifier la pièce. Il existe un grand nombre de motifs pour le remplissage d'une pièce. Les plus courants sont des fibres droites perpendiculaires ou un réseau de cellules carrées, circulaires ou hexagonales (nid d'abeille) (Figure 52). Cette dernière solution est souvent utilisée pour ses propriétés mécaniques. Dans le cas ou la densité du remplissage interne est égale à 1, on obtient alors une pièce pleine.

Suivant les efforts appliqués à la pièce, il est intéressant d'orienter les fibres afin de jouer sur la résistance mécanique de la pièce. La stratégie de fabrication dépend donc de la direction et de l'intensité de ces efforts par rapport à la pièce. Une fois la stratégie fixée, il sera nécessaire d'obtenir un modèle du comportement mécanique de la pièce. Pour permettre de réaliser la phase d'optimisation topologique, cela revient à estimer un module d'Young équivalent à une pièce isotrope et homogène.

4.2.b Stratégie adoptée

Quelque soit la stratégie adoptée, il faut garder à l'esprit qu'à cette étape de la méthodologie, la pièce satisfait de toutes façons les contraintes mécaniques. Le but est donc ici de proposer une stratégie de fabrication qui maximise la résistance mécanique de la pièce tout en évitant les déformations durant la phase de fabrication. Pour ceci, la méthode consiste à orienter les fibres parallèlement aux efforts de traction les plus importants. Cependant, plus les fibres sont longues, plus la pièce risque de se déformer lors de la fabrication. En effet, peu importe le procédé, lorsque la matière se solidifie, elle tend à se contracter (Fonda, 2013). Dans le cas du FDM, cela induit un effet

gaufrage qui détériore les couches inférieures de la pièce. Pour empêcher le gaufrage de la pièce, il est conseillé de limiter la longueur des fibres, ce qui est contradictoire avec la volonté de les orienter toutes dans la même direction (Figure 53).



Orientation des fibres maximisant la résistance à la traction suivant l'axe X mais maximisant l'effet de gaufrage suivant cet axe

Orientation des fibres minimisant la résistance à la traction suivant l'axe X mais minimisant l'effet de gaufrage suivant cet axe

Orientation intermédiaire des fibres suivant l'axe X proposant un compromis entre résistance à la traction et gaufrage

Figure 53 – Exemple d'orientation de fibres pour limiter l'effet de gaufrage

Là encore, le logiciel vient en aide au concepteur en indiquant le module d'Young équivalent résultant de l'orientation des fibres ainsi que les zones où le risque de gaufrage est élevé. Cependant, il est impossible pour le logiciel de réaliser une prescription fiable étant donné que la pièce n'a pas encore été topologiquement optimisée. Cette étape va donc relever du savoir-faire du concepteur pour choisir la stratégie de fabrication qui lui semble la plus adaptée.

4.2.c Application au cas d'étude

Dans notre cas, aucun effort de traction n'est appliqué à notre pièce dans le plan de fabrication. De plus, l'orientation de la pièce et des efforts fait que le module d'Young équivalent est déjà maximum. La stratégie qui limite les effets de gaufrage pour notre pièce est celle présentée en Figure 54.

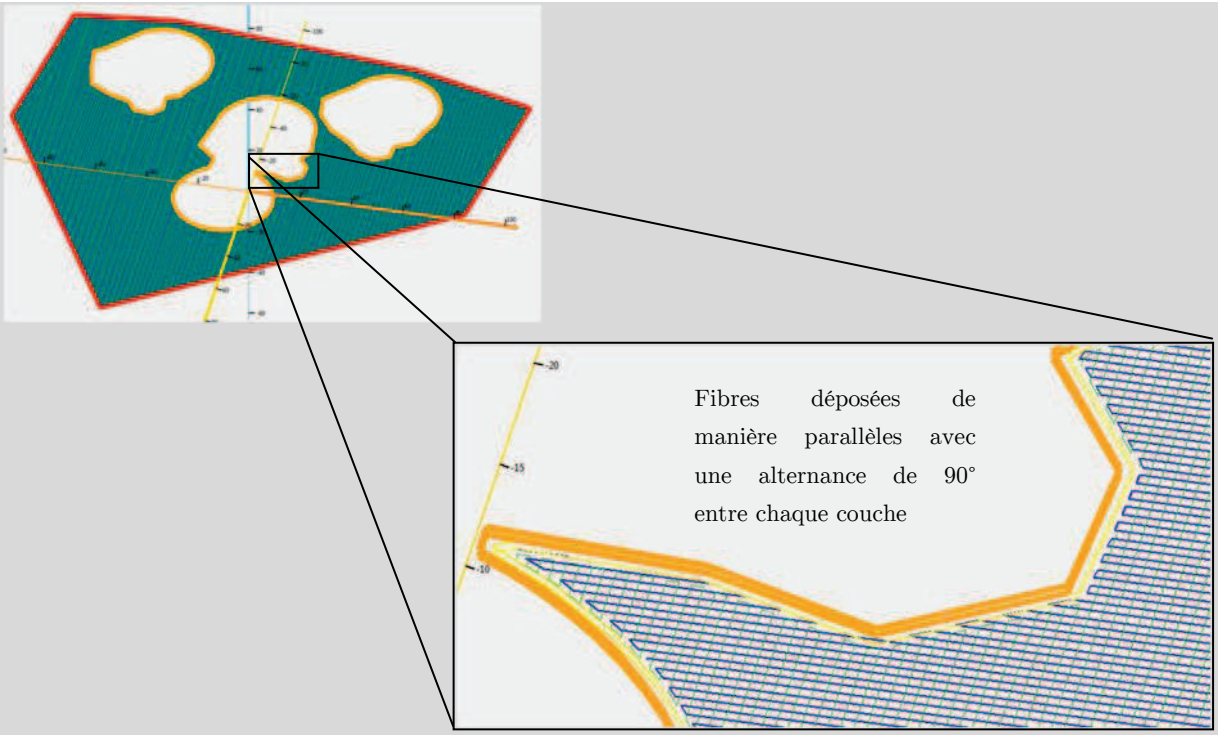


Figure 54 – Extrait de la stratégie de fabrication de la grille de perçage

4.3 Module d'Young

Le module d'Young est estimé par le logiciel de CAO en fonction du matériau sélectionné pour la pièce et de la stratégie choisie précédemment. Ce module d'Young peut varier entre les valeurs E_{max}, qui correspond au module d'Young pour un matériau isotrope, homogène et uniforme et E_{min}, qui correspond au module d'Young pour le même matériau, mais réalisé en FA dans les conditions les plus défavorables.

4.4 Optimisation topologique

L'orientation et le module d'Young de la pièce ayant été déterminés précédemment, le but de l'optimisation est de réduire au maximum le volume de matière nécessaire, le temps de fabrication et donc le coût de la pièce tout en validant le cahier des charges.

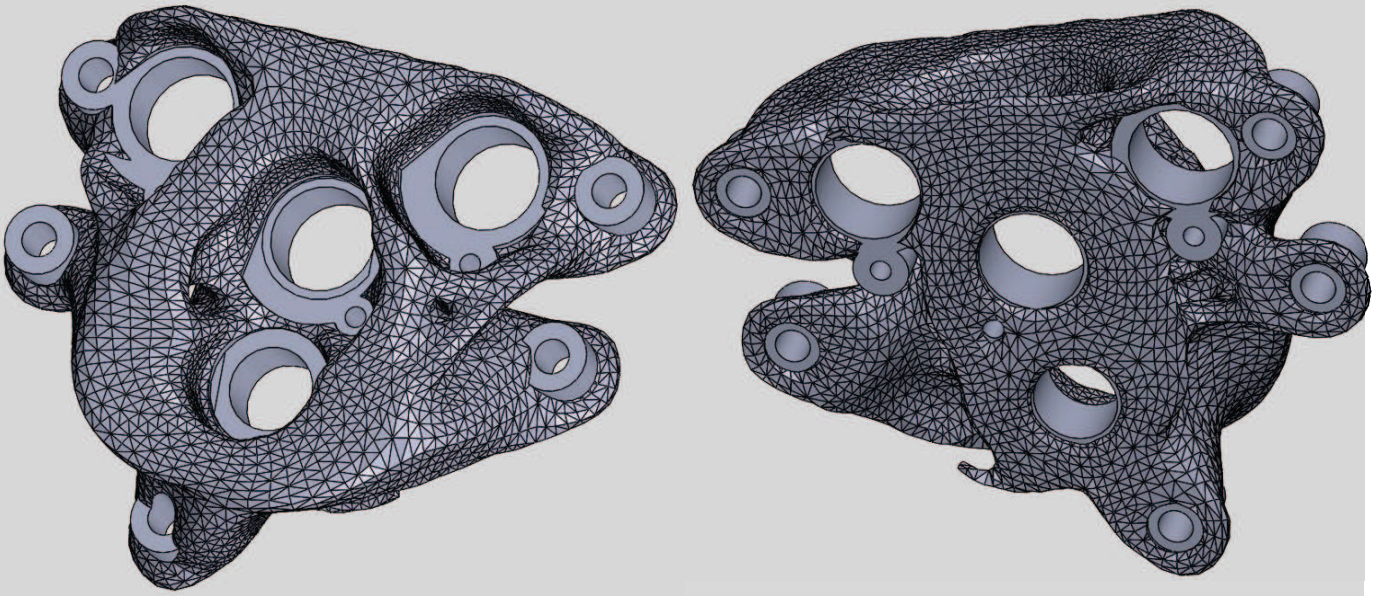
Pour ceci, le concepteur utilise un module du logiciel de CAO proposant d'effecteur une optimisation topologique sur le solide de départ. Dans notre cas, il s'agit du plugin PareTOWorks de SolidWorks. La seule contrainte de cette méthode est l'apparition d'une seconde rupture dans la chaîne numérique (la première était la conversion du solide de départ en fichier pièce). En effet, le plugin PareTOWorks ne traite que des fichiers au format .stl. Afin de conserver les surfaces fonctionnelles, le concepteur peut spécifier les surfaces qui ne devront pas être affectées par l'optimisation.

Le résultat de cette optimisation est un second fichier .stl, dont la résolution peut être assignée manuellement par le concepteur.

4.4.a Application au cas d'étude

Pour rappel, la pièce que nous devons concevoir est fixée à la pièce à percer par deux vis de maintien appliquant chacune un effort de 500 daN. Les deux pièces sont séparées par des plots qui réalisent une liaison appui-plan. A

l'aide de ces informations et du solide de départ, nous pouvons effectuer l'étape d'optimisation topologique. Nous obtenons ainsi une pièce optimisée et orientée (Figure 55).



Vue de dessus

Vue de dessous

Figure 55 - grille de perçage optimisée et orientée

On remarque bien que les zones ne supportant aucun effort ont été réduites afin de limiter la quantité de matière nécessaire à la fabrication de la pièce.

4.5 Pièce optimisée et orientée

Une fois l'optimisation topologique effectuée, le concepteur doit vérifier si la pièce nécessitera ou non la présence de support durant la phase de fabrication. Cependant, il est possible de fabriquer une pièce sans support en contrôlant l'inclinaison des surfaces. Le concepteur doit donc trouver un compromis entre le poids de la pièce et la quantité de support nécessaire. En effet, le résultat de l'optimisation topologique est une pièce *gauche sans géométrie prédéfinie* (mis à part celle des surfaces fonctionnelles).

Section 5 Préparation de la pièce à la fabrication

Dans cette partie, nous allons détailler les différentes étapes amenant au tranchage de la pièce (Figure 56). Pour ceci, le résultat de la phase d'optimisation topologique est analysé de manière à déterminer les zones nécessaires de présence de support. En fonction du résultat de cette analyse, la pièce peut être modifiée de manière à limiter le volume du support, soit pour des contraintes de temps de fabrication, soit pour des contraintes d'extraction du support, soit pour des contraintes d'état de surface. Ces modifications sont pilotées par le poids maximum admissible par la pièce. Une fois les zones de support validées, celui-ci est intégré de manière automatique à la maquette numérique. La stratégie de fabrication ayant été définie durant la phase précédente (Figure 49), il ne reste plus qu'à réaliser le tranchage de la pièce.

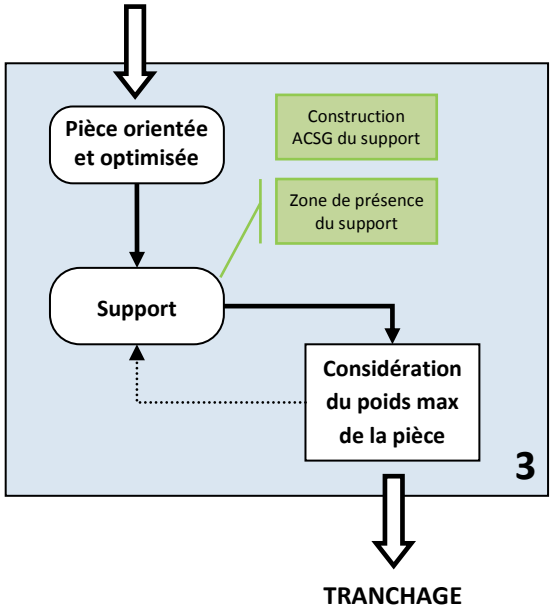


Figure 56 - Phase de la méthodologie relative à la préparation à la fabrication de la pièce optimisée

5.1 Angle minimum de support

Chaque matériau est associé à un angle minimum de support qui correspond à l'angle maximal acceptable en dévers avant effondrement de la matière (Figure 57). Cet angle permet de déterminer si du support est nécessaire lors de la phase de fabrication de la pièce. Dans le cas du procédé FDM, la valeur de cet angle est globalement de 45°[33]. Ainsi, une fois la pièce orientée dans l'espace machine, si, en tout point de la surface de la pièce, l'angle entre la tangente en ce point et la direction d'impression est inférieure à 45°, la pièce peut être intégralement réalisée sans support. Une fois la pièce orientée, il peut être pertinent, si possible, de retoucher sa surface afin de limiter le volume du support. De plus, si la pièce est conçue en multimatériaux, il est important de connaître les angles minimum de support des différents matériaux afin de s'assurer de la fabricabilité de la pièce et de limiter la présence du support.

[33] www.stratasys.com/~/media/Main/Secure/Applications/Marketing%20and%20Design%20Models/Application%20guide%20-%20FDM%20design%20handbook.pdf

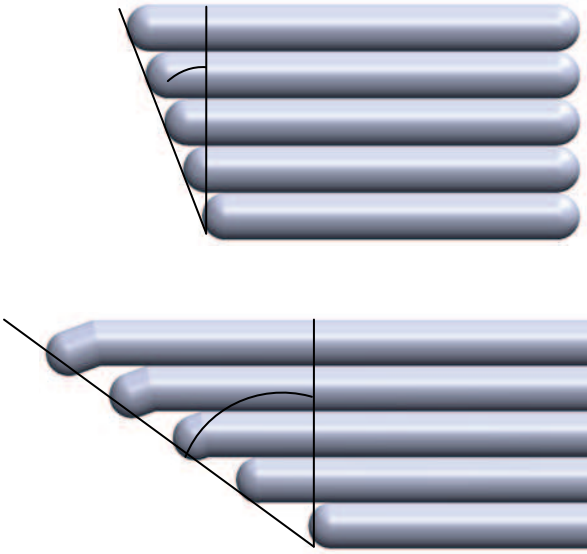


Figure 57 – angle minimum de support

5.1.a Zone de présence du support

Actuellement, il existe différents logiciels permettant la génération automatique de support en fonction de la géométrie et de l'orientation de la pièce. Cependant, dans le cas du FDM, la génération du support n'est pas effectuée de manière optimale et présente deux inconvénients majeurs. Premièrement, le support est disposé verticalement là où il est nécessaire. Ce qui implique donc un volume de matière proportionnel à la hauteur et à l'étendue de la surface à supporter. Deuxièmement, l'extraction du support n'est pas prise en compte. Or, si le support est monobloc, il peut être difficile, voire impossible à extraire de certaines cavités.

C'est pourquoi, nous partons du postulat que les zones de présence de support doivent être indiquées au concepteur pour que celui-ci puisse créer et positionner correctement les éventuels supports directement lors de l'édition de la maquette numérique.

Afin de déterminer ces zones, nous proposons de discrétiser la pièce. Nous détaillerons cette étape dans le prochain chapitre de notre thèse. Pour l'instant, il faut retenir que la discrétisation de la pièce permet une analyse des surfaces afin de déterminer les zones où du support est nécessaire.

5.1.b Retouche de la pièce

Une fois les zones de présence de support déterminées, le concepteur peut modifier les surfaces de la pièce. En ajoutant de la matière, on peut changer l'inclinaison des surfaces de manière à atteindre l'angle minimum de support. Puisque la pièce a été précédemment optimisée, elle respectera toujours les contraintes mécaniques. L'ajout de matière n'aura donc pas d'impact sur le respect du cahier des charges. En revanche, on observera un gain de temps de fabrication et de consommation de matière (Figure 58).

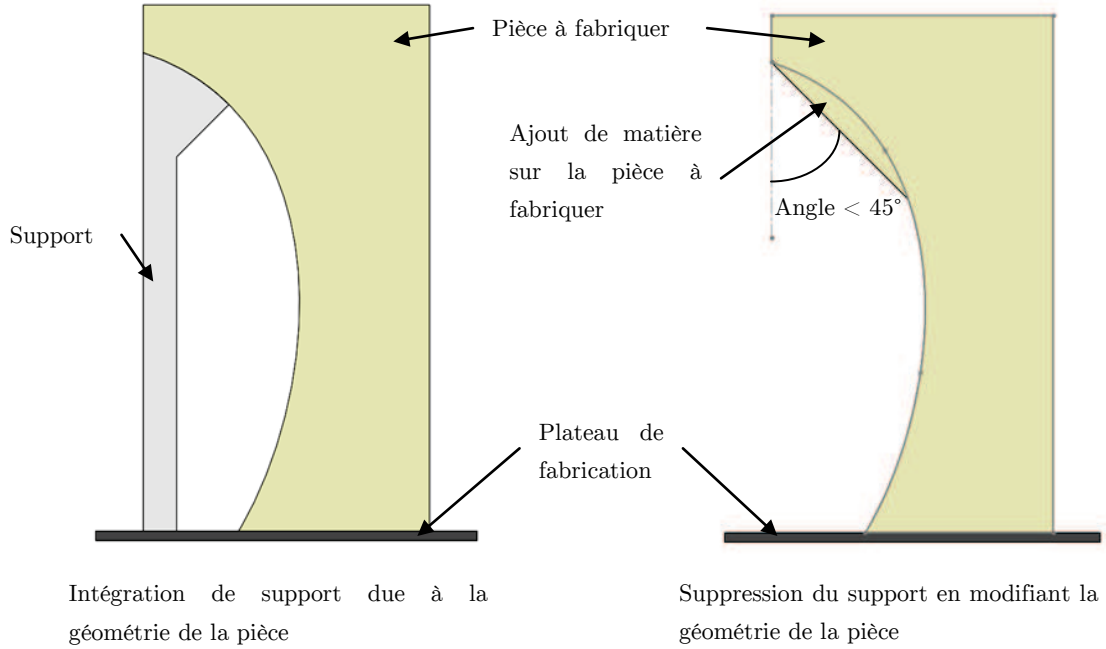


Figure 58 – Réduction du support par augmentation du volume de la pièce avec respect de α

Il se peut cependant que la priorité soit mise sur la minimisation du poids de la pièce (dans le cas d'une pièce d'aviation, par exemple). Dans ce cas, l'intérêt économique se fait sur la phase de vie de la pièce et non celle de fabrication. Il est donc préférable de ne pas retoucher le modèle issu de l'optimisation topologique et d'intégrer du support là où il est nécessaire. De même, la taille de la série peut impacter sur la présence du support en fonction du coût de la matière consommée et du temps nécessaire au parachèvement de la pièce. Les critères de choix sont donc le poids final, le coût et le temps de fabrication et de parachèvement de la pièce.

5.1.c Application au cas d'étude

La pièce à étudier étant relativement complexe, nous avons choisi de restreindre la zone d'étude à une portion de la pièce. Voici donc la zone étudiée sur la grille de perçage optimisée (Figure 59).

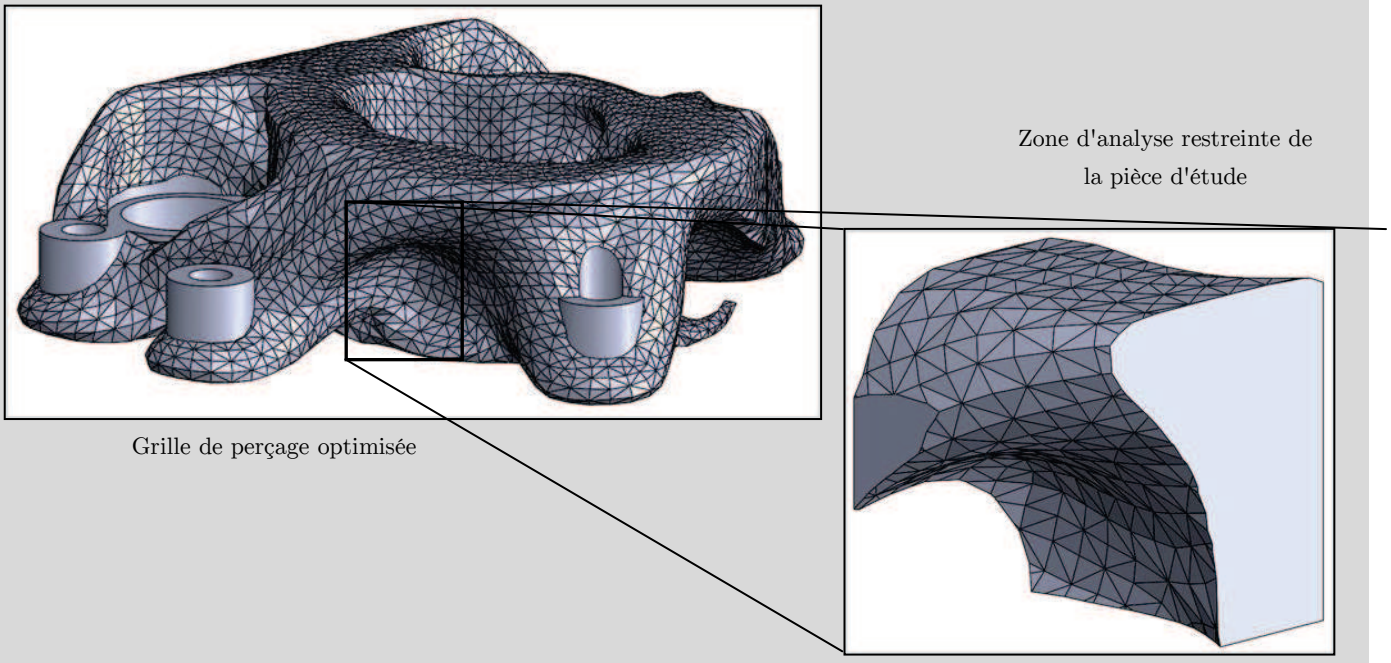


Figure 59 - Zones de support nécessaires sur la grille de perçage

5.2 Supports

La dernière étape de la méthodologie consiste à intégrer, le cas échéant, les supports à la pièce. De la même manière que pour la pièce, notre méthodologie a pour but de réduire les coûts en matière, en argent et en temps de la pièce. Pour cette étape, qui, dans le cas de nos travaux, est spécifique au procédé FDM, le concepteur s'appuiera sur une macro d'analyse et de génération de support prenant comme données d'entrée l'angle minimum de support de la pièce, l'angle minimum de support du support et les matériaux compatibles avec le matériau de la pièce.

5.2.a Construction du support selon la méthode ACSG (Automated CAD Support Generation)

Cette méthode sert à générer des supports destructibles avec une géométrie prédéfinie qui vise à minimiser le volume de matière consommé pour le support. Le détail de cette méthode sera également fourni dans le prochain chapitre de notre thèse.

A l'étape précédente, le concepteur a pu générer des surfaces représentant les zones nécessitant du support. Dans le cas de pièces simples, il est possible de créer soi-même des supports. Cependant, dans le cas de pièces complexes, cette tâche peut être relativement longue et, dans le cas où le support doit être intégré à l'intérieur de la pièce, peut présenter des difficultés de visualisation.

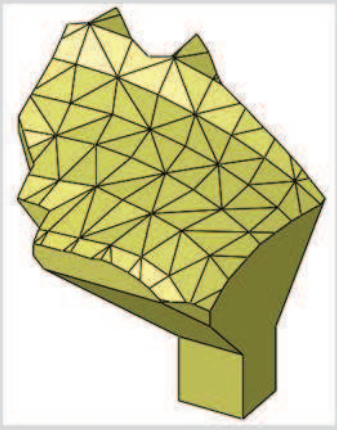
Lors de l'étape précédente, nous avons déterminé les zones où le support est nécessaire. De la même manière que le logiciel de CAO peut générer les surfaces de présence de support, il est possible de générer les volumes des supports. En utilisant également l'angle minimum de support, les supports générés peuvent ainsi être poreux et avoir une grande surface de contact avec le solvant. Cette méthode permet donc un gain de temps en génération de support et un gain de temps en nettoyage de la pièce tout en assurant la conformité de celle-ci.

5.2.b Fin de la méthodologie

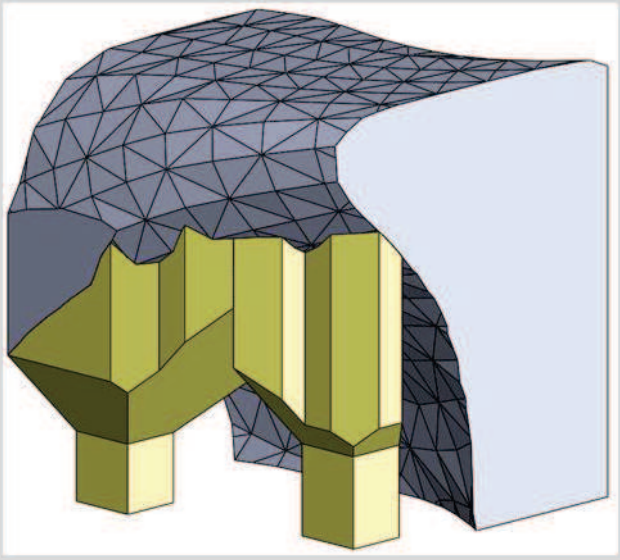
Une fois le modèle numérique du support enregistré dans un fichier pièce, il reste à effectuer l'opération de tranchage puis de fusionner le code généré avec celui de la pièce à réaliser pour fabriquer la pièce.

5.2.c Application au cas d'étude

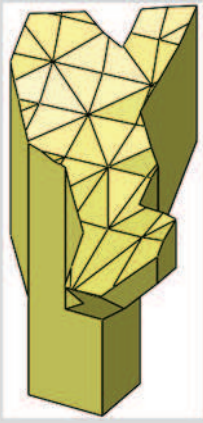
La pièce finale accompagnée de ses supports est présentée à la Figure 60.



Support gauche, vue de la surface à supporter



Grille de perçage avec support



Support droit, vue de la surface à supporter

Figure 60 - Pièce finale et supports

Section 6 Synthèse

La méthodologie que nous avons décrite au cours de ce chapitre présente donc un changement de paradigme par rapport aux méthodologies de conception conventionnelles et ne reprend pas le schéma standard présenté en partie 3 de l'état de l'art. En effet, de part l'utilisation du graphe des liaisons, il est possible de commencer la conception détaillée de la pièce sans avoir validé la conception architecturale. Cela permet une plus grande flexibilité de conception et une vision amont de ce vers quoi tend le résultat final.

En opposition aux méthodologies actuelles en vue de la fabrication ou de l'assemblage où la géométrie de la pièce prime sur les contraintes du cahier des charges, le procédé de FA permet de considérer librement ces contraintes dès le début de la méthodologie. Ainsi, la première étape consiste à sélectionner le ou les matériau(x) dont sera constituée la pièce. Cette organisation de la méthodologie a été largement justifiée au cours de ce chapitre. Une fois le choix du matériau effectué, le concepteur peut alors définir librement sur la géométrie de la pièce. Bien entendu, cette géométrie est mécaniquement validée à l'aide d'une analyse par éléments finis.

La troisième section de notre méthodologie apporte, tout comme la première, des éléments nouveaux par rapport aux méthodologies existantes. En effet, nous proposons de réaliser la génération et l'intégration des supports directement dans par le logiciel de CAO. Cette technique présente l'avantage de préserver la continuité de la chaine numérique. De plus, le travail du concepteur est facilité par la manipulation d'un outil unique dont l'interface est connue.

Nous avons donc démontré grâce à un cas d'étude que la méthodologie que nous proposons est fonctionnelle. Ainsi, en réponse à notre problématique qui était de proposer une méthodologie de conception pour la réalisation de pièce en FA, nous avons montré qu'il est possible, directement à partir du cahier des charges, d'obtenir un modèle CAO, intégrant du support, validant toutes les exigences du client et dont la fabricabilité est assurée, prêt à subir une opération de tranchage.

Chapitre IV Génération automatique du support

Dans la partie précédente de ce manuscrit, nous avons détaillé le corps de notre méthodologie. Nous avons vu qu'il y avait principalement trois grandes étapes : la génération du solide de départ, la génération de la pièce topologiquement optimisée et l'intégration du support. Pour cette dernière étape, nous avons exprimé la nécessité d'une analyse de la pièce afin de déterminer les surfaces pour lesquelles le support est nécessaire. Nous avons également indiqué que ce support devait être généré de manière optimisée afin de limiter son volume dans un but d'économie de temps, d'argent et de matière.

Dans cette partie, nous allons exposer nos travaux sur l'analyse d'une pièce dans un logiciel de CAO lors de sa conception et sur la génération optimisée de support. Ces travaux ne porteront que sur les procédés de dépôt de matière. Nous l'illustrerons par le biais de l'étude d'une pièce devant être réalisée par FDM. Nous effectuerons donc, dans un premier temps, un rapide état de l'art des méthodes de génération de support existantes. Nous montrerons en quoi ces méthodes sont limitées par rapport aux pièces complexes telles que celles pouvant être générées par notre méthodologie. Nous exposerons ensuite les spécificités du support dans le cadre du dépôt de matière. A partir de ces spécificités, nous exposerons nos travaux de recherche quant à une géométrie générique de support pouvant être mise en place sur n'importe quel type de topologie de pièce tout en minimisant le coût financier, le temps de fabrication et la quantité de matière utilisée. Enfin, nous donnerons le descriptif de la méthode ACSG (Automated CAD Support Generation) permettant la génération automatique de ces supports optimisés lors de la conception de la pièce.

Section 1 Outils actuels de génération de support

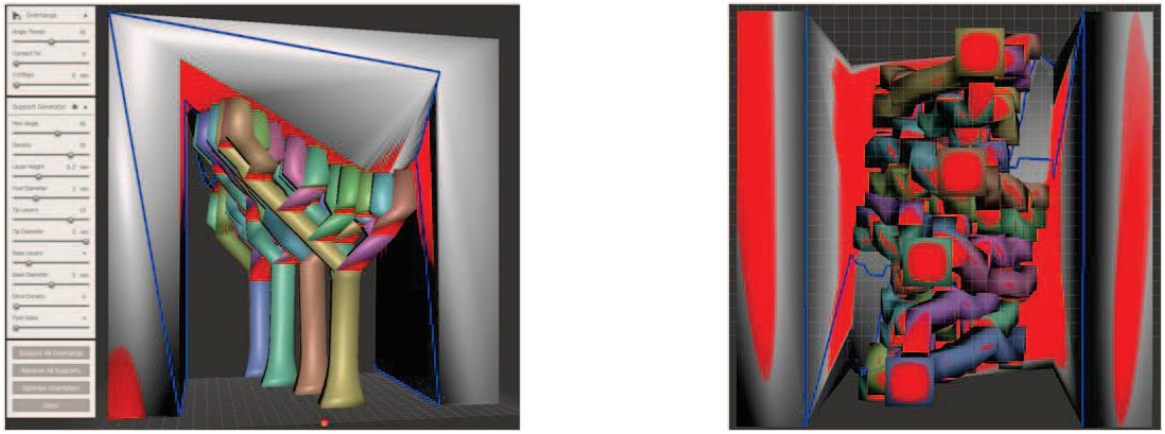
Comme nous l'avons vu dans notre état de l'art au Chapitre II2.1, la génération de support se fait actuellement lors de la phase de tranchage du modèle .stl de la pièce par des logiciels spécifiques. Certains de ces logiciels sont *open source*, comme ReplicatorG[34], d'autre sont propriétaires, comme MakerWare[35]. Cependant, dans les deux cas, la génération de support est une opération souvent simplifiée à l'extrême : là où il y a nécessité de support, un bloc de matière est généré. Les paramètres modifiables concernent uniquement la densité de matière de ce bloc, l'orientation des fibres ainsi que le diamètre du fil déposé. Certains logiciels permettent de générer un support davantage optimisé, tels que Magics[36] et MeshMixer[37], mais à partir d'un fichier CAO exporté au format stl, ce qui ne convient pas à notre méthodologie puisque cette opération impose une rupture de la chaîne numérique. Cependant, nous avons étudié ces deux derniers logiciels afin d'avoir un aperçu des géométries optimisées proposées.

Dans le cas de Magics, le concepteur est bridé aux seuls procédés de fabrication sur lit de poudre. Ce logiciel est donc inexploitable pour l'impression en FDM. De plus, l'optimisation du support ne tient pas compte de la géométrie interne des pièces. Ce qui amène parfois à des propositions où le support ne peut pas être retiré après fabrication. Enfin, le logiciel est autonome et ne prend comme type de fichier que des formats d'échange standard de solides morts, dont le .stl. Il y a donc une rupture dans la chaîne numérique, ce qui, comme nous l'avons exposé dans notre état de l'art, ne présente pas une solution satisfaisante dans le cadre de notre méthodologie.

Le logiciel MeshMixer est un logiciel de modélisation libre qui permet l'import de fichiers CAO convertis au format .stl. Cela impose donc une rupture dans la chaine numérique. Cependant, pour une pièce donnée, ce logiciel est capable d'analyser le placement de support en temps réel à partir de paramètres simples tel que l'angle maximal de support et la densité du support. Le support prend une forme d'arbre et se compose de trois parties : la base, les branches et les bourgeons. La base est une pyramide qui sert à ancrer le support sur le plateau (ou sur une surface déjà existante). Les branches sont des cylindres reliés entre eux par leurs extrémités. La première branche est donc reliée à la base. Chaque branche est prolongée par au moins deux branches. Un bourgeon se place à l'extrémité d'une branche. Chaque bourgeon relie le support à la surface de la pièce (Figure 61).

L'ensemble des parties du support est piloté par un même polygone. Ainsi, si le nombre d'arêtes choisi est de 4, la base, les branche et les bougeons seront de section carrée. Voici un exemple de support pour une densité de 75%, un diamètre de base de 5 mm, un diamètre de branche de 3 mm et un diamètre de bourgeon de 2 mm (diamètre maximum) pour une section carrée.

[34] http://replicat.org/
[35] http://www.makerbot.com/desktop
[36] http://software.materialise.com/magics
[37] http://software.materialise.com/magics



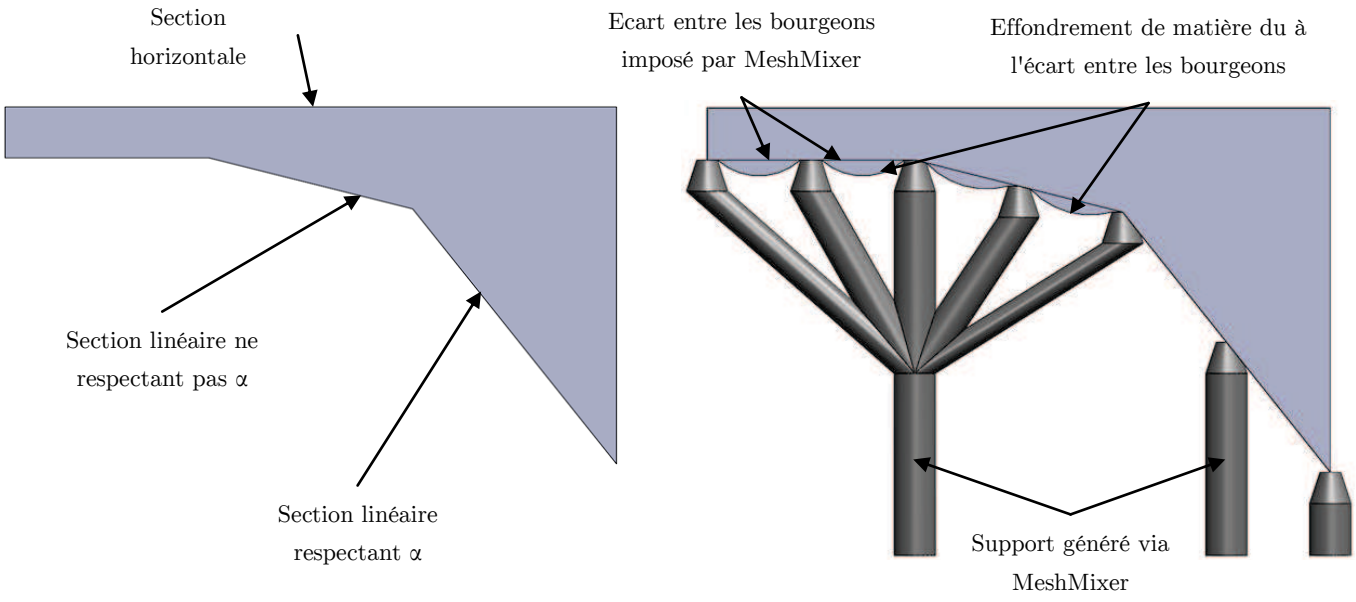
Vue de face

Vue de dessous

Figure 61 - Exemple de support généré par le logiciel MeshMixer

Nous développerons ce point en partie 3 de ce chapitre, mais il s'avère que la structure arborescente est le meilleur type de géométrie pour minimiser du volume du support tout en couvrant le maximum de surface sur la pièce à soutenir. En utilisant l'angle maximal de support, il est ainsi possible de générer un volume complexe de densité très restreint et assurant le maintien de la zone à supporter.

Ce logiciel impose certaines limitations pour la fabrication d'une pièce à l'aide du procédé FDM. Premièrement, le diamètre des bourgeons est bridé à 2 mm, ce qui ne permet pas de couvrir toute la surface de la pièce et qui fait s'effondrer localement la matière lors de l'impression (Figure 62).



Modèle CAO

Exemple de pièce fabriquée avec le type de support proposé par MeshMixer

Figure 62 - Effondrement de matière due aux dimensions des bourgeons de l'arbre

Deuxièmement, le support est généré perpendiculairement à la direction d'impression. Le contact entre le support et la pièce est donc partiel, ce qui crée des ruptures de forme (Figure 63).

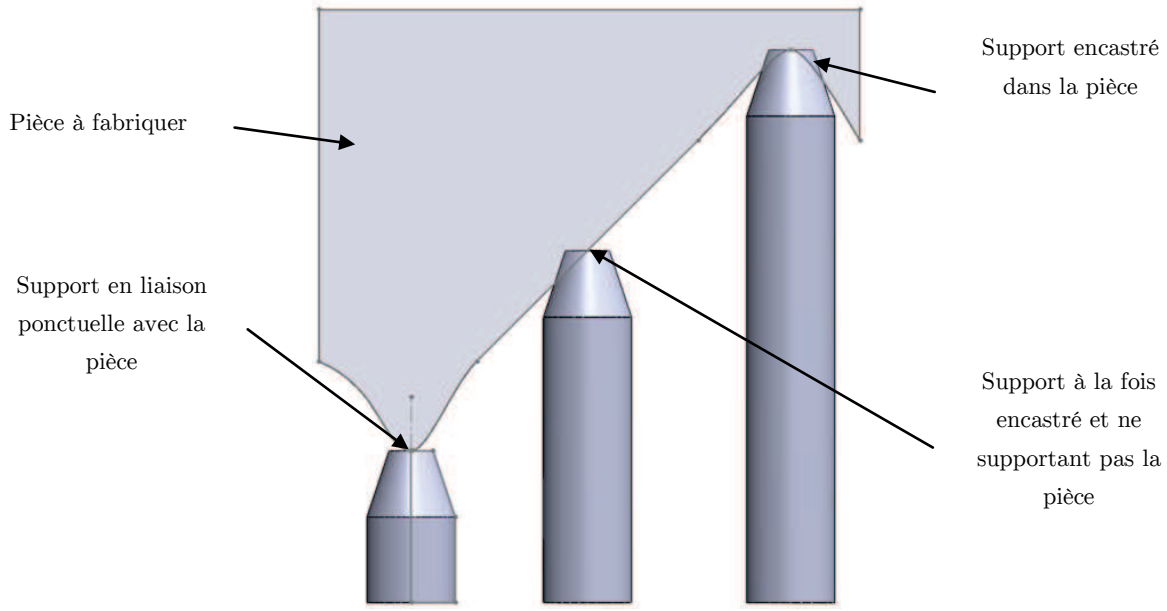
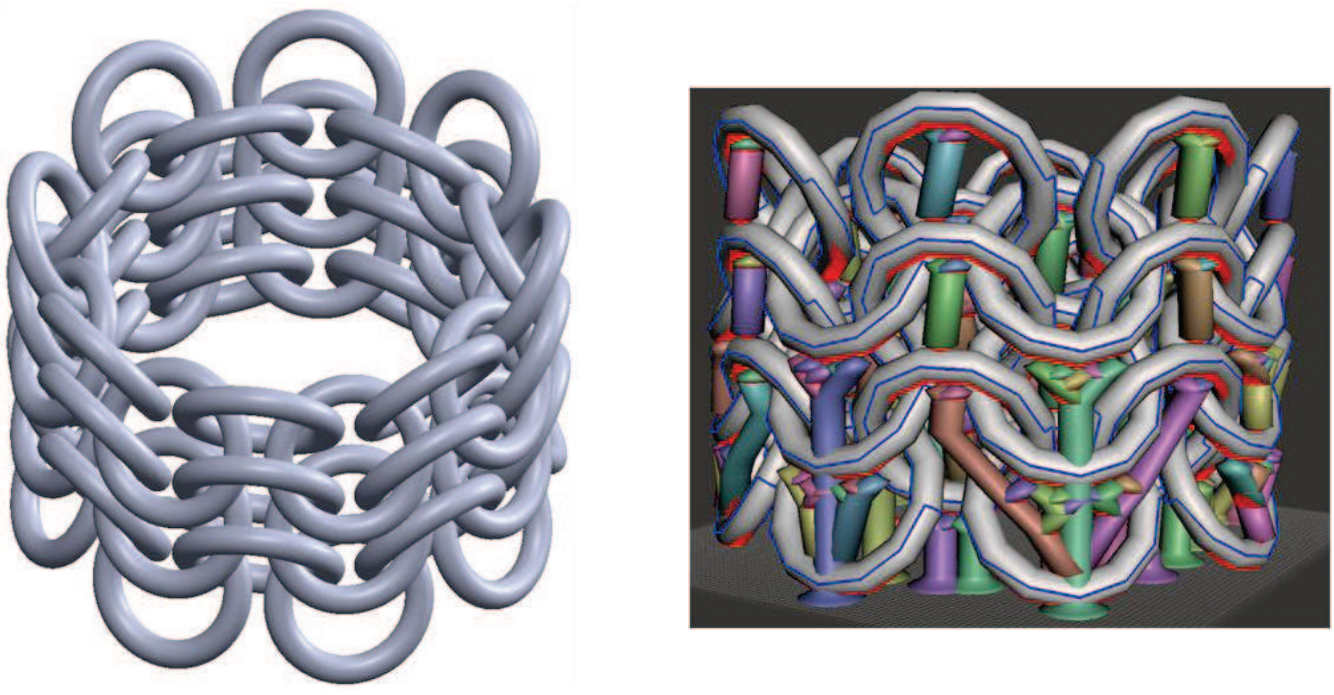


Figure 63 Ecarts de forme entre la pièce et le support

Troisièmement, bien que la structure globale du support soit bonne, le modèle proposé par le logiciel présente également des zones où les branches s'entrecroisent, ce qui implique une surconsommation de support par rapport à un support réellement optimisé. De plus, il arrive que le support s'entrecroise avec la pièce, ce qui est un critère d'élimination pour la génération de support à l'aide de ce logiciel (Figure 64).



Modèle CAO

Proposition de support par le logiciel MeshMixer

Figure 64- Erreur de génération de support : intersection entre le support et la pièce, étude d'une cote de maille

Nous voyons donc que MeshMixer ne propose pas une solution viable dans le cadre de nos travaux. Il existe également d'autres logiciels de tranchage présentant d'autres géométries de support (Strano, Hao, Everson, &

Evans, 2012) mais ces géométries sont basées sur un motif qui est répété en translation dans les directions X, Y et Z du repère de la pièce. Ce type de support permet de diminuer la quantité de matière utilisée, mais ne s'adapte pas réellement à la géométrie de la pièce. Il s'agit d'avantage d'un support dont la densité est réduite par rapport à un support standard.

Nous avons vu que la génération de support, en se basant sur les outils actuels, est une étape qui se déroule exclusivement sur un solide mort, après orientation de la pièce par rapport à la direction de fabrication. Or, et nous l'avons exposé dans notre méthodologie, il est bien plus pertinent, non seulement d'orienter une pièce en fonction du support qui sera nécessaire à sa fabrication, mais également de le faire lors de la conception de la pièce dans la continuité de la chaine numérique. Cela permettrait de mieux tenir compte des contraintes d'état de surface, de fabricabilité et de retrait de support directement lors de la phase de conception du modèle numérique.

L'absence de solution réellement pertinente pour l'intégration de support dans le cas de pièces complexes nous amène donc à la conclusion qu'il est nécessaire de réaliser cette étape dès la phase de conception de la pièce, soit le chapitre 5.2 de notre méthodologie. Pour ceci, nous allons tout d'abord établir les règles de conception pour la génération de support.

Section 2 Spécificités du support dans le cadre du procédé FDM

L'intégration du support est une étape importante de notre méthodologie puisqu'elle impacte fortement la quantité de matière consommée et l'état de surface de la pièce (Chapitre II1.2.b). Nous avons également vu que la présence de support est pilotée par la complexité de la pièce et par l'orientation de celle-ci (Chapitre II1.2.a). La géométrie du support doit donc être adaptée à la géométrie finale de la pièce. Elle doit également être validée avant l'opération de tranchage afin d'apporter d'éventuelles modifications au résultat de l'optimisation topologique de notre méthodologie (Chapitre III4.5).

Les règles de conception à respecter pour la génération de support sont les suivantes :

1) Les épaisseurs de matière de la pièce à fabriquer doivent être supérieures à un seuil e_{mini} pour éviter un bris lors du retrait du support.
2) Si une surface fonctionnelle est en contact avec du support, prévoir éventuellement une surépaisseur de matière pour un post-traitement de la surface.
3) Toutes les zones comportant du support doivent être accessibles pour permettre le retrait du support.
4) Une forme creuse ne peut être close.

La première règle n'impacte cependant que la pièce et ne donne pas d'information sur la géométrie du support. Il s'agit surtout de s'assurer de l'intégrité mécanique de la pièce finale. En effet, suivant les matériaux utilisés, le support accroche plus ou moins à la pièce. Dans le cas où la forme de la pièce présente des volumes fins et où le support est solide et doit être décroché manuellement, les efforts appliqués lors de la phase de nettoyage ne doivent pas conduire à une déformation plastique ou un bris de la pièce. De même, la seconde règle n'apporte aucune information quant à la géométrie du support. Le but est de valider l'état de surface final de la pièce.

Bien que la troisième règle n'apporte pas explicitement d'information sur la géométrie du support, elle vient fortement contraindre le volume autorisé. La dernière règle est un corollaire à la précédente. En effet, nous partons du principe que toutes les surfaces de la pièce sont fonctionnelles et, par conséquent, ne peuvent être closes.Il est possible de trouver des cas particuliers où ce corollaire ne s'applique pas (Figure 65). Cependant, dans le cadre de nos travaux, nous considèrerons le cas général où cette règle doit également être respectée.

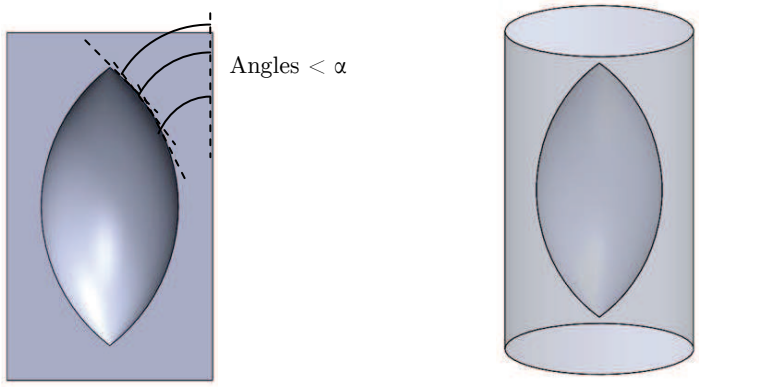


Figure 65 - Cas particuliers de volume clos et ne nécessitant pas de support

Les quatre règles précédentes sont valables pour tous les procédés de FA et permettent d'englober tous les cas de figures possibles, indépendamment de la géométrie de la pièce. Cependant, ces règles ne permettent pas de déterminer quelle géométrie de support sera la plus adaptée à tout type de pièce.

Bien évidemment, la solution la plus simple serait de générer un volume vertical pour toutes surfaces nécessitant du support. Ce volume est compris entre la surface à supporter et le projeté vertical de cette surface sur la surface la plus proche (Figure 66). Cette solution est celle proposée par les logiciels Makerware ou ReplicatorG et ne répond pas à la règle 3 dans le cas de géométries complexes (canal de refroidissement d'un moule d'injection, par exemple). De plus, elle ne permet pas d'optimiser le volume de matière utilisé, ce qui est un des objectifs secondaires de notre méthodologie que nous avons indiqué dans les chapitres précédents de ce mémoire..

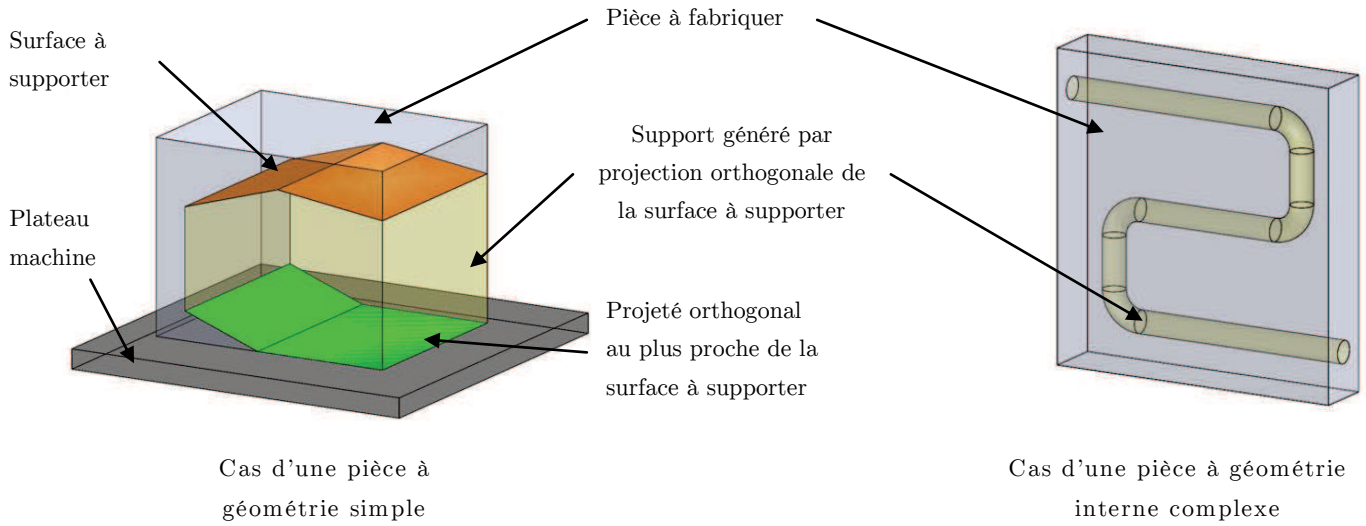


Figure 66 – Génération de support par projection orthogonale

Or, nous avons vu que dans le cas du dépôt de matière, la FA possède les deux spécificités suivantes :

- Il est possible de fabriquer une forme « en porte-à-faux » si l'angle minimal de support est respecté ;
- Il est possible de fabriquer une pièce dans un matériau soluble.

A l'aide de ces quatre règles et de ces deux spécificités, nous allons pouvoir étudier une géométrie optimisée de support.

Section 3 Géométrie idéale du support

En combinant les deux caractéristiques précédentes, nous arrivons à la conclusion qu'il est donc possible d'éliminer les problèmes d'accessibilité au support et de bris de pièce en réalisant des supports solubles. Actuellement, il existe différents polymères solubles tels que le PVA soluble dans l'eau ou le PLA soluble dans la soude. De plus, ces deux polymères sont compatibles avec l'ABS et l'ULTEM, ce qui offre des perspectives de recherche intéressantes pour la génération de support soluble. En effet, comme nous l'avons indiqué au chapitre 3.2.b, la géométrie de maquette numérique résultant d'une optimisation topologique présente des formes imprévisibles aux géométries internes complexes. Il est donc nécessaire d'envisager la présence d'un support soluble.

En générant une géométrie de support intégrant des pentes respectant l'angle minimal de support α, il est possible de diminuer la quantité de support consommée et, par conséquent, le temps de fabrication et le coût total de matière première. Cela permettra également de couvrir de manière continue toute la surface à supporter, ce qui permettrait de supprimer les défauts liés au support. En revanche, il n'est pas possible de gommer l'effet d'escalier.

3.1 Conditions de fabrication

Pour arriver à déterminer un type de support particulier, il est tout d'abord nécessaire de déterminer les contraintes et les conditions de fabrication à respecter. Tout d'abord, le support doit être fabricable sans support. Autrement dit, il ne doit être composé que de corps dont les surfaces en porte à faux respectent α. Le support doit également être en contact avec toutes les surfaces à couvrir. Enfin, le support doit être le plus compact possible..

On retrouve ce type de problème dans l'architecture et il est facile de faire l'analogie avec la construction d'un immeuble. En effet, dans les deux cas, le but est de réussir à soutenir une surface qui servira d'appui à des éléments volumiques. Il existe diverses solutions permettant d'y répondre. La solution la plus simple, comme nous l'avons indiqué, est le remplissage du volume projeté de la surface à supporter par de la matière de compacité 1. Cette solution correspond, en architecture, à la construction d'un mur (Figure 66). Comme nous l'avons indiqué, cette solution n'est pas satisfaisante car le coût en matière est trop important. Une seconde solution, beaucoup plus économique et contemporaine, consiste à remplir le volume projeté de la surface à supporter par une combinaison de piliers et de poutres. Cependant, cette solution ne permet pas de couvrir toute la surface à supporter ni de respecter α. Une troisième solution, plus astucieuse et également économique, consiste à remplir le volume projeté de la surface à supporter par des ogives, comme on le trouve par exemple à l'intérieur d'une cathédrale (Figure 67).

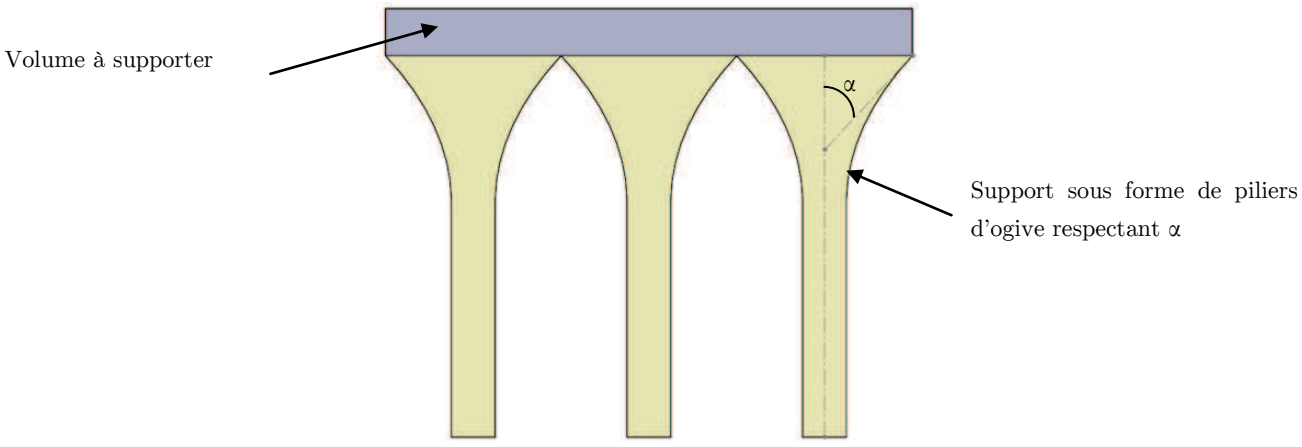


Figure 67 - Géométrie possibles de support – pilier d'ogive

Cette dernière solution répond en tout point aux règles de conception des supports. En effet, l'angle α est respecté et la faible densité du support permet l'accès à un solvant sur toutes les surfaces du support. Cependant, pour une même surface de départ et pour le respect du même angle α, la surface couverte par une ogive est moins importante que celle couverte par un cône. Une première proposition, simple à mettre en œuvre, est un cône inversé dont l'ensemble des génératrices forment un angle supérieur à α (Figure 68).

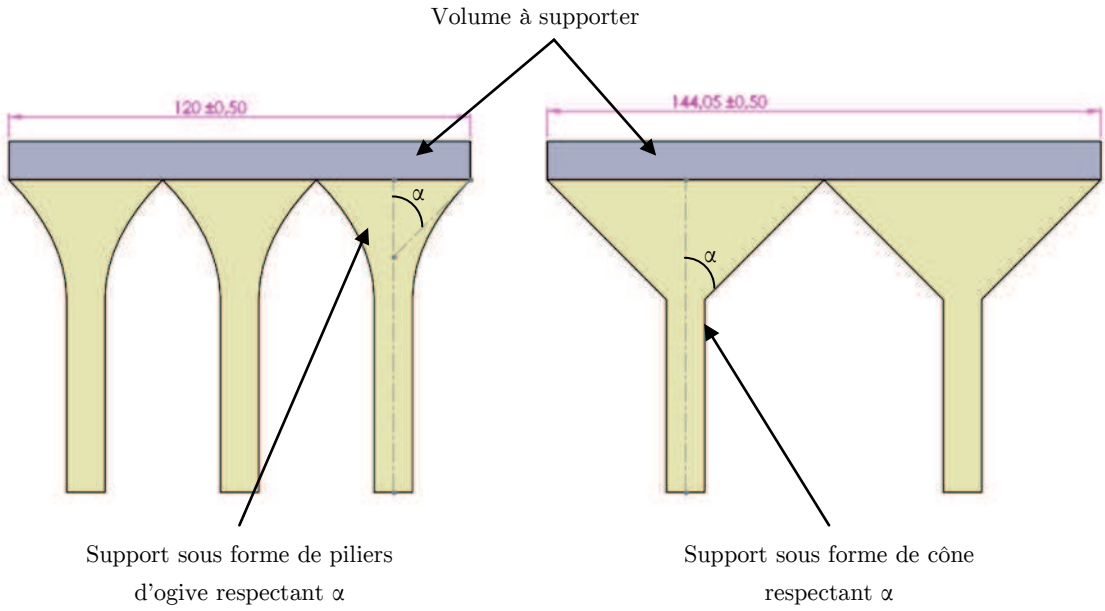


Figure 68 - Ebauche de proposition de support – comparaison entre cône et ogive

Ceci permet, tout en respectant la contrainte de fabricabilité du support, de supporter toute la surface de la pièce pour un volume de support restreint. Le volume d'un cône est égal au tiers du volume du prisme associé. En première approche, nous obtenons donc un gain de volume de 66%. Cependant, cette proposition n'est pas satisfaisante pour deux raisons. Premièrement, rien ne garantit que le volume présent sous la surface à supporter corresponde à celui du cône associé pour un angle entre les génératrices et la verticale au sommet égale à α. De plus, rien ne garantit non plus que la surface à supporter soit adaptée à la forme d'un cône (Figure 69).

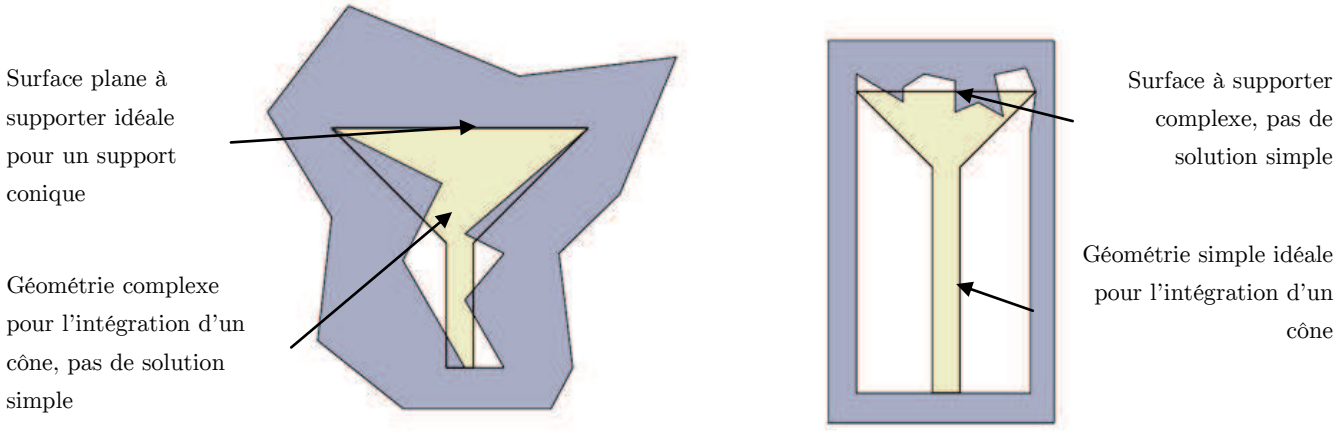


Figure 69 - limitations de la génération de support à partir d'un cône – vue de coupe

Ainsi, générer le support sous la forme d'un cône unique dont les dimensions sont fixées n'est pas une solution viable. Cela nous amène donc aux conclusions suivantes :

- le support doit être composé d'un ensemble de cônes de petite taille dont les dimensions sont à étudier ;
- les cônes doivent reposer sur une structure adaptable et simple à mettre en œuvre.

En effet, le support doit pouvoir être généré de manière automatique par le logiciel de CAO et paramétré par le concepteur. Dans l'idéal, le support doit donc se baser sur une géométrie simple à piloter et facile à reproduire.

La solution la plus simple est donc de faire reposer chaque cône sur une poutre verticale de hauteur variable. De plus, ceci permet d'approximer le volume de support au volume des poutres. Par la suite, nous appellerons « tête » le cône du support et « pilier » la poutre du support (Figure 70). L'ensemble portera le nom de « colonne ».

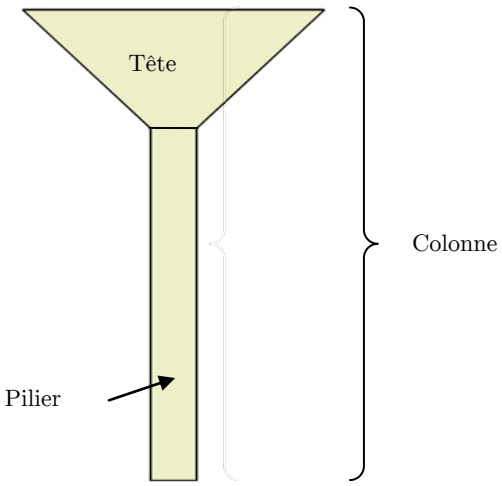


Figure 70 - Structure générale du support

3.2 Section du pilier

Nous avons défini la forme générale du support. Nous devons maintenant définir puis dimensionner la géométrie associée à cette forme. La première étape consiste à déterminer quelle forme de section attribuer au pilier. Pour ceci, nous considèrerons que la structure de la machine de FA utilisée sera de type 3 axes cartésienne. Ce choix est basé sur la structure la plus répandue des machines de FA. Bien qu'il existe des machines 3 axes cylindriques ou des machines 5 axes (cf Chapitre II1.1.b), la plupart sont des machines 3 axes cartésiennes.

3.2.a Dimensions de la section du pilier

Les dimensions de la section du pilier sont pilotées par deux contraintes. Tout d'abord, il est nécessaire d'avoir des dimensions les plus restreintes possible afin de limiter la quantité de matière nécessaire à la génération du support. Deuxièmement, la section de chaque pilier doit être suffisamment importante afin de supporter le restant du support à construire ainsi que la pièce à fabriquer. Afin de déterminer l'aire idéale de la section, nous avons fabriqué plusieurs piliers de section carrée, circulaire et triangulaire en ABS. L'aire de chaque section a été augmentée de 1 mm^2 par rapport à la section précédente en partant d'une section de $1mm^2$. Notre critère d'arrêt était le non-effondrement du pilier durant la phase de fabrication. Les piliers ont été réalisés sur une machine Makerbot 2X. Suite à ces essais, nous sommes arrivés à la conclusion qu'une section de 9 mm^2 était le minimum requis, indépendamment de la géométrie souhaitée. En effet, une section plus réduite génère des déformations de surface et un effondrement du pilier. Cela nous donne donc les dimensions minimales pour la fabrication la plus rapide d'un pilier. Cette donnée serait bien entendu à étudier pour d'autres machines en vue de généraliser notre méthode, mais cela serait assez simple à mettre en œuvre. Pour mener les tests suivants, nous avons choisi de réaliser des piliers d'une aire de section de 9 mm^2 et de $36mm^2$ afin d'observer l'évolution du temps de fabrication

en fonction de l'aire. En effet, il est possible que la comparaison des différents temps de fabrication soit négligeable pour des supports de faible section, or nous souhaitons déterminer la meilleure stratégie. Nous nous sommes cependant limités à ces dimensions de manière à observer un support viable. En effet, le but étant de limiter le volume nécessaire de support, nous devons observer des cas qui peuvent être mis en place sur des pièces réelles. Ceci correspond respectivement à une épaisseur minimale de matière de 3mm et de 6mm selon les axes X et Y.

3.2.b Géométrie de la section du pilier

Pour déterminer la géométrie idéale de section, nous prendrons comme critère le temps d'impression nécessaire à la génération de 16 piliers disposés sur une grille carrée, sur une grille triangulaire équilatérale et sur une grille hexagonale régulière. La distance entre chaque pilier dans le repère local de la grille est de 10 mm. La hauteur de chaque pilier est de 30 mm. Nous avons choisi d'observer 16 piliers afin de pouvoir considérer les trois types de motifs pour un même volume de matière. Cela permet donc de comparer directement les temps de fabrication. Les distances et hauteur on été choisies de manière arbitraire mais correspondent à des valeurs probables pour la réalisation de pièces. Il est donc possible d'extrapoler ces valeurs pour d'autres configurations. De plus, prendre des valeurs élevées nous permet de mieux observer l'évolution du temps de fabrication suivant le motif de la grille. Pour ces trois motifs de grille, nous avons choisi de réaliser des piliers de section circulaire, carrée et triangulaire équilatérale. Ceci permet de prendre en compte non seulement le temps de fabrication d'un pilier, mais également le temps de déplacement de la buse entre deux piliers (Figure 71). Ces motifs ont été choisis en accord avec les géométries qu'il est possible de donner aux têtes des colonnes (Figure 73). En effet, puisque nous souhaitons partir sur une forme générique de support, là encore il est nécessaire de ne prendre en compte que les cas utiles.

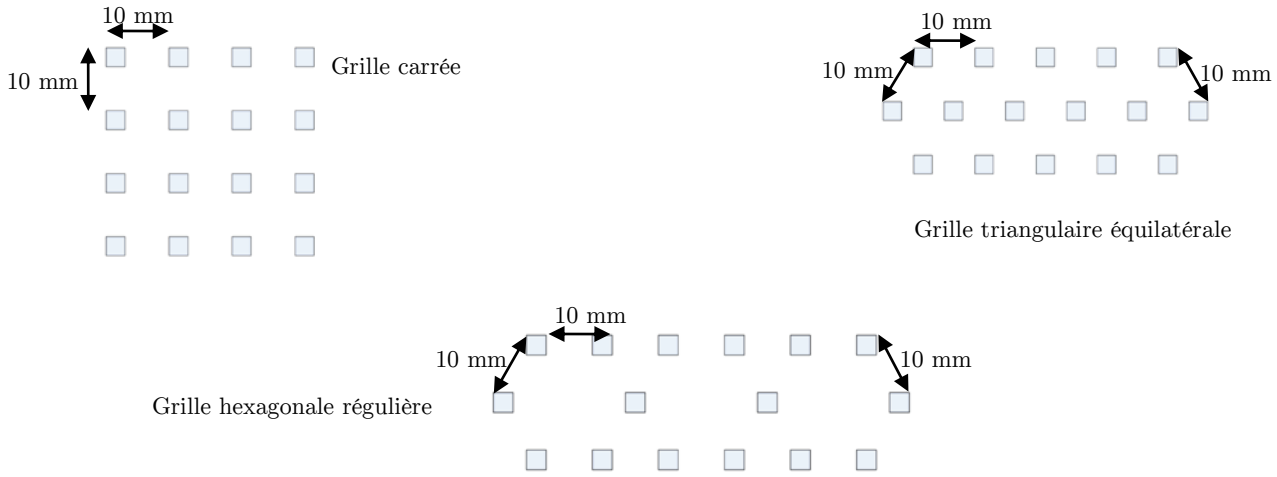


Figure 71 - Motifs de grille pour la comparaison des temps d'impression des différents types de section de pilier

Les temps estimés par le logiciel ReplicatorG, en minutes, sont les suivants (Tableau 1) :

	1 pilier	16 piliers grille carrée	16 piliers grille triangulaire	16 piliers grille hexagonale
Section carrée 9mm²	3	39	38	46
Section carrée 16mm²	6	81	80	82
Section triangulaire 9mm²	3	39	38	46
Section triangulaire 16mm²	6	87	85	87
Section circulaire 9mm²	4	54	54	63
Section circulaire 16mm²	7	103	104	104

Tableau 1 - Temps d'impression des différents types de section de pilier

A l'aide de ces données, nous pouvons donc établir le graphique suivant (Figure 72) permettant de déterminer visuellement la géométrie de section la plus adaptée pour la génération de support.

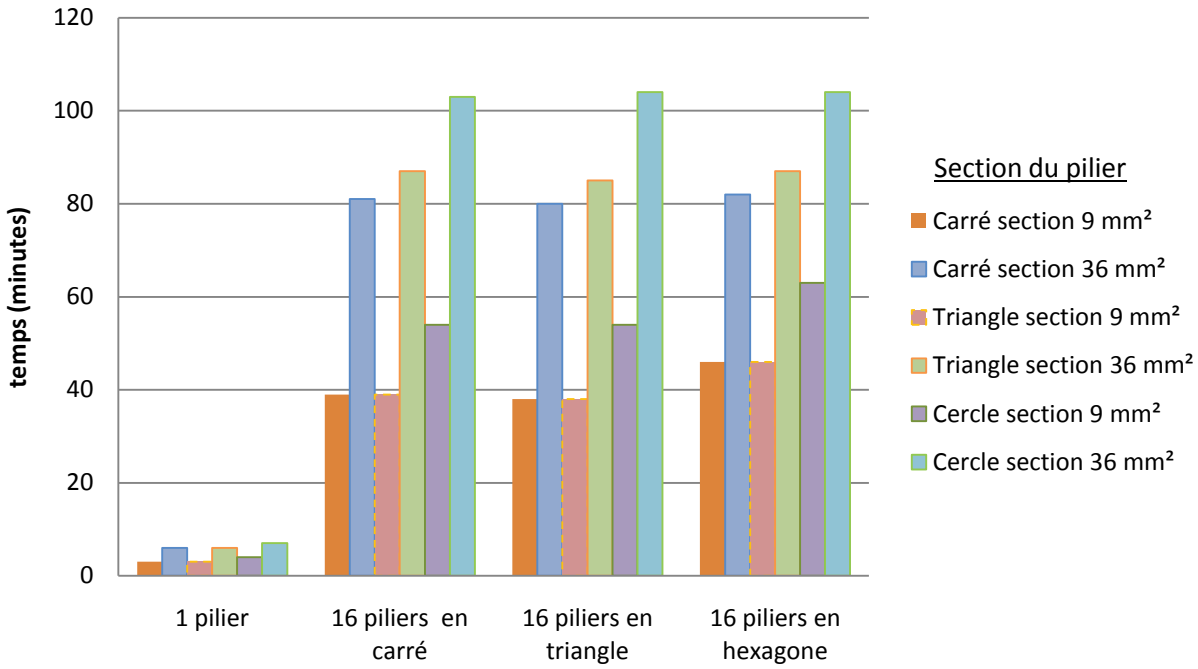


Figure 72 - Comparaison des différents types de section pour trois dispositions et deux dimensions données

Pour une géométrie donnée, on observe que le temps de fabrication croît naturellement avec l'augmentation de la surface de la section. On remarque également que le temps de fabrication pour un pilier à section circulaire est toujours plus élevé que celui pour un pilier à section carrée ou triangulaire. Bien qu'aucune différence ne soit observable pour des piliers dont l'aire de section est de 9 mm², on observe que les piliers à section carrée présentent un temps de fabrication inférieur de 6% à ceux présentant une section triangulaire pour une aire de section égale à 36 mm². Les piliers à section carrée semblent donc présenter un temps de fabrication plus court que les autres géométries, indépendamment du motif choisi. De plus, puisque le modèle CAO de la pièce dispose d'un repère orthogonal, il est également plus aisé de disposer des piliers à section carrée lors de la conception de la pièce. En effet, nous pourrons orienter la section des piliers par rapport aux axes X et Y du logiciel de CAO.

Pour la suite de nos travaux, la section des piliers du support sera donc carrée.

3.3 Forme de la tête et disposition des piliers

Après avoir déterminé la géométrie, les dimensions des piliers et les motifs de grille pour la génération du support, nous devons maintenant étudier les caractéristiques de la tête du support. Le rôle de la tête est de soutenir la pièce, il est donc nécessaire que les bases des cônes s'imbriquent parfaitement les unes avec les autres afin d'obtenir une surface continue. De plus, la géométrie de la tête est couplée au motif de disposition des piliers. En effet, il faut que chaque tête repose sur un pilier. De plus, comme nous l'avons indiqué, nous souhaitons que la génération de support soit la plus simple possible tout en sachant que le logiciel de CAO que nous allons utiliser propose une base de travail orthonormée. Nous allons donc étudier les géométries de tête simples permettant de couvrir la surface à supporter et s'accordant avec les motifs de grilles présentées. Nous évaluerons ensuite ces géométries afin de déterminer celle qui satisfait au mieux nos besoins en termes de simplicité de modélisation, de compacité de support et de temps de fabrication.

Dans un premier temps, nous considèrerons le projeté orthogonal de la surface à supporter. Cela nous permet de réaliser une étude en vue de dessus de la forme du motif et de la forme de la tête des piliers. Une fois la meilleure combinaison mailles/géométrie de tête trouvée, il nous suffira de déployer cette géométrie afin de générer le support.

Afin de respecter toutes ces contraintes, les combinaisons retenues sont les suivantes (Figure 73). Le maillage des piliers est représenté en pointillé : carré, hexagonal ou triangulaire équilatéral. Les géométries de tête retenues sont respectivement carrée ou octogonale/carrée, triangulaire équilatérale, hexagonale/triangulaire équilatérale ou hexagonale.

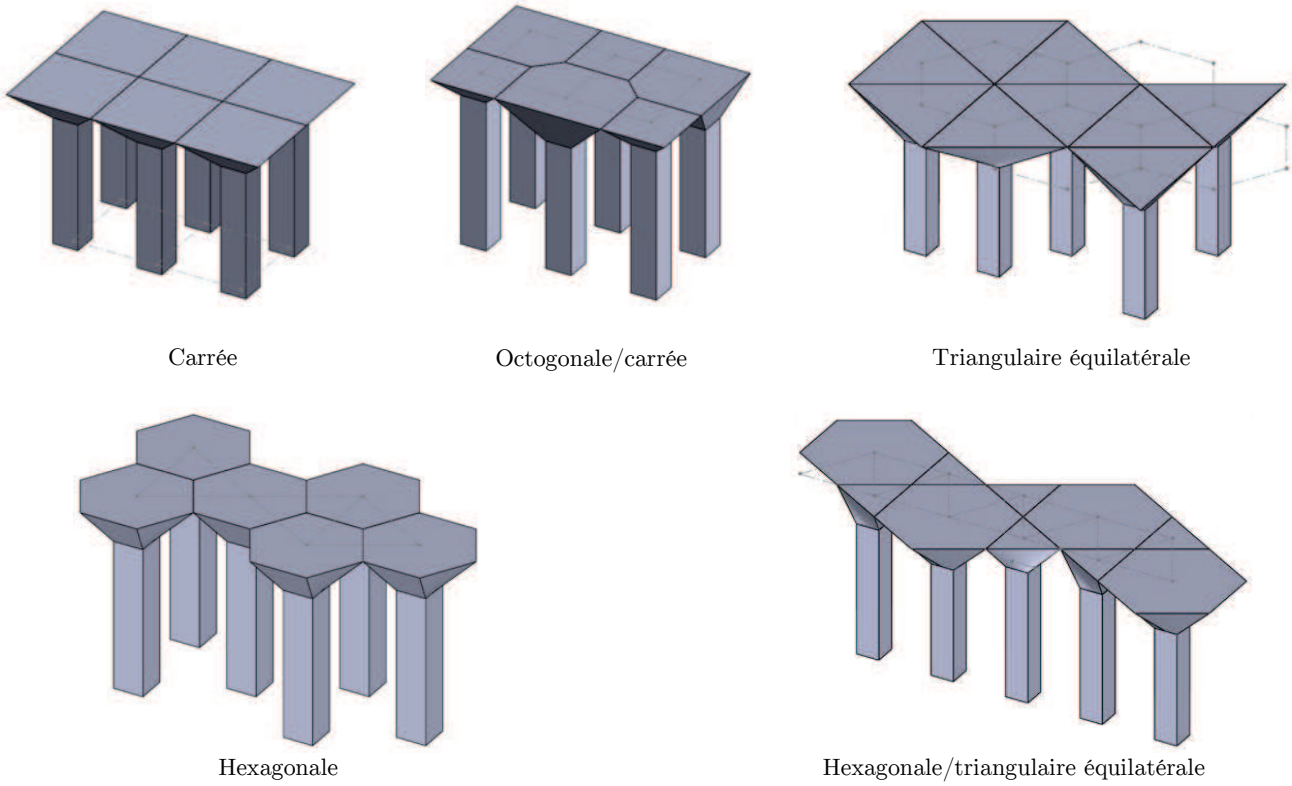


Figure 73 - Motifs de support et géométrie de tête retenus

Toutes ces formes sont paramétrables de manière à ce que le logiciel puisse générer automatiquement les supports. Bien évidemment, les dimensions minimales de chaque géométrie sont pilotées par les dimensions de la section du pilier (dont l'aire est au minimum égale à 9 mm^2).

Il nous faut maintenant déterminer le type de cône le plus intéressant d'un point de vue compacité de matière. Nous nous appuierons sur la définition de la compacité cristallographique : celle-ci correspond au rapport du volume occupé par la tête sur le volume occupé par le prisme prenant appui sur la base du cône et de même hauteur. Ainsi, la compacité est une valeur comprise en 0 (aucun support) et 1 (prisme droit). Plus cette valeur est faible, plus la géométrie de la tête est pertinente. Pour mener une étude comparative, nous avons choisi de prendre une section de pilier de forme carrée dont l'arête e vaut 3 ou 6 mm pour chaque géométrie de la Figure 73. Puis, pour ces deux valeurs d'arête, nous avons observé l'évolution de la compacité pour des distances a entre deux piliers de 10, 20 et 30 mm (Tableau 2).

cas	a (mm)	e (mm)
1	10	3
2	20	3
3	30	3
4	10	6
5	20	6
6	30	6

Tableau 2 - Table de comparaison des motifs et des formes de tête

Les résultats observés pour les différents cas sont ceux exprimés dans la figure suivante (Figure 74).

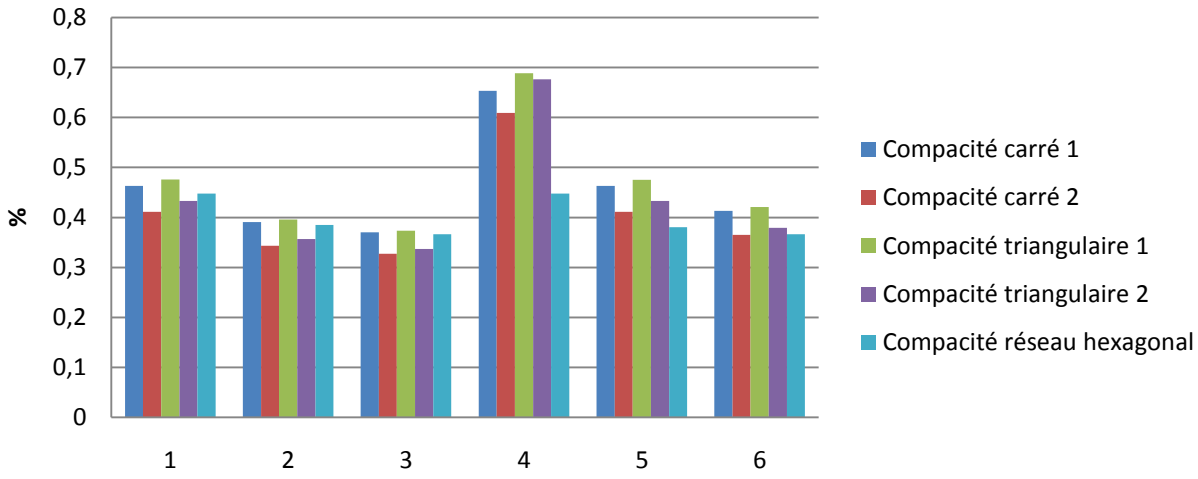


Figure 74 - Résultats comparatifs des différents motifs et des différentes formes de tête

De manière générale, on observe que la compacité diminue avec l'aire de la section du pilier, ce qui va dans le sens de réaliser des piliers avec une section la plus fine possible. Puisque la troncature du cône réduit la hauteur de celui-ci, on observe bien que la compacité diminue lorsque la distance entre deux sommets augmente. En revanche, dans le cas idéal, pour une surface à supporter plane traitée ici, (le cas numéro 3 : arête de section du pilier égale à 3 mm et distance entre piliers de 30 mm), la différence entre les compacités n'est pas significative (le gain est de 5%). Ceci s'explique par le fait que cette étude ne prend pas en compte la véritable topologie de la pièce et donc une éventuelle dégradation du support afin de réellement épouser la surface à maintenir (Figure 90, chapitre 4.4.a).

Pour discriminer la meilleure solution, il est nécessaire d'observer un second critère. Notre méthodologie doit proposer un support qui s'adapte facilement à tout type de géométrie de la pièce. De plus, le support doit être le moins dense possible. L'idéal est donc que le support soit proche d'une succession de piliers. Or, plus la hauteur de tête est réduite, plus le support s'apparente à un pilier. Le second critère de discrimination est donc la hauteur de tête du support. En reprenant les mêmes cas que précédemment (Tableau 2), nous avons donc comparé les hauteurs des différentes têtes. Le résultat est le suivant (Figure 75) :

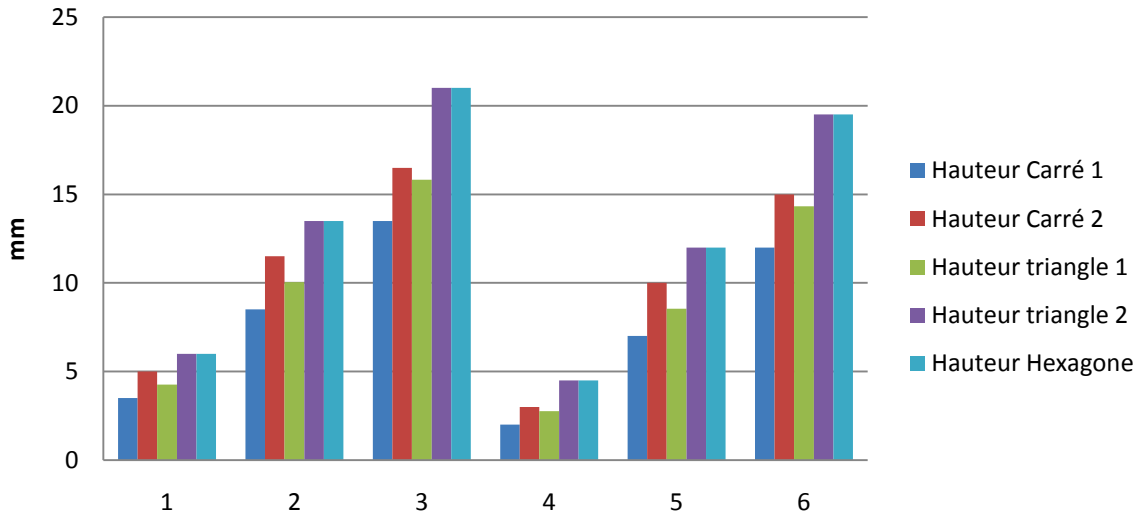


Figure 75 - Hauteurs des différentes têtes en fonction du motif

On remarque que la hauteur de la tête est bien proportionnelle à la longueur des arêtes du maillage. De plus, la hauteur diminue également légèrement pour des sections de pilier plus grandes, ce qui s'explique par une troncature plus large sur la tête, donc une hauteur réduite. En considérant ce critère, on observe cependant que la géométrie la plus intéressante est la « carré 1 » (Figure 73). Cette géométrie est très intéressante pour deux raisons. Premièrement, les deux sections étant carrées, la forme de la tête s'adapte parfaitement à celle des piliers. Deuxièmement, le motif de la grille, dans le cas idéal, est relativement simple à mettre en œuvre et s'adapte à la morphologie de la machine.

3.4 Géométrie sélectionnée

En combinant les résultats des précédentes analyses, on en déduit que le modèle géométrique idéal pour le support est donc celui à pilier à section carrée superposé par une tête de section carrée (Figure 76). Cette forme sera ensuite dupliquée de manière à couvrir toute la surface à supporter de la pièce.

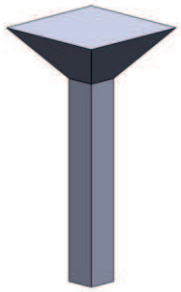


Figure 76 - géométrie final du support

Ce choix de géométrie permet également un compromis entre le temps de fabrication et la surface de contact du support. En effet, à aire équivalente, et en prenant comme référence une section carrée, la surface de contact d'un cylindre est de 88,5 %, la surface d'un prisme de base hexagonale est de 93 % et la surface d'un prisme de base triangulaire équilatérale est de 113 %. Cela nous permet donc d'obtenir une géométrie simple à mettre en œuvre, rapide à fabriquer et présentant la seconde meilleure surface de contact. Nous sommes capables de générer facilement cette forme générique en l'adaptant à la géométrie de la pièce à l'aide des paramètres suivants :

- Coordonnées du centre de la section du piler ;

- Arête de la section du pilier : cette valeur sera, par défaut, de 3mm ;
- Hauteur du pilier : connaissant la géométrie de la pièce, cette valeur contraint la surface couverte par la base de la tête.

Maintenant que nous avons défini le modèle optimisé de structure du support, nous allons étudier son intégration lors de la modélisation de la pièce dans le logiciel de CAO.

Section 4 Méthode d'optimisation du support

Nous avons donc validé, dans le chapitre précédent, la géométrie idéale du pilier. Pour rappel, nous 3 objectifs sont les suivants : établir une méthode permettant de générer de manière automatisée du support durant la phase de conception de la pièce, minimiser le volume de support (pour réduire les coûts de matière et de temps) et limiter le nombre de ruptures de la chaîne numérique. Nous avons déjà étudié la géométrie idéale du support en tenant compte du temps de fabrication, du volume de matière consommé et de la facilité à le générer automatiquement à l'aide d'un logiciel de CAO, ce qui répond aux deux premiers objectifs. Pour répondre au troisième objectif, nous proposons une méthode de génération du support qui sera basée sur un outil informatique intégré au logiciel de CAO. La méthode d'intégration et d'optimisation du support que nous proposons se déroule suivant le schéma suivant (Figure 77).

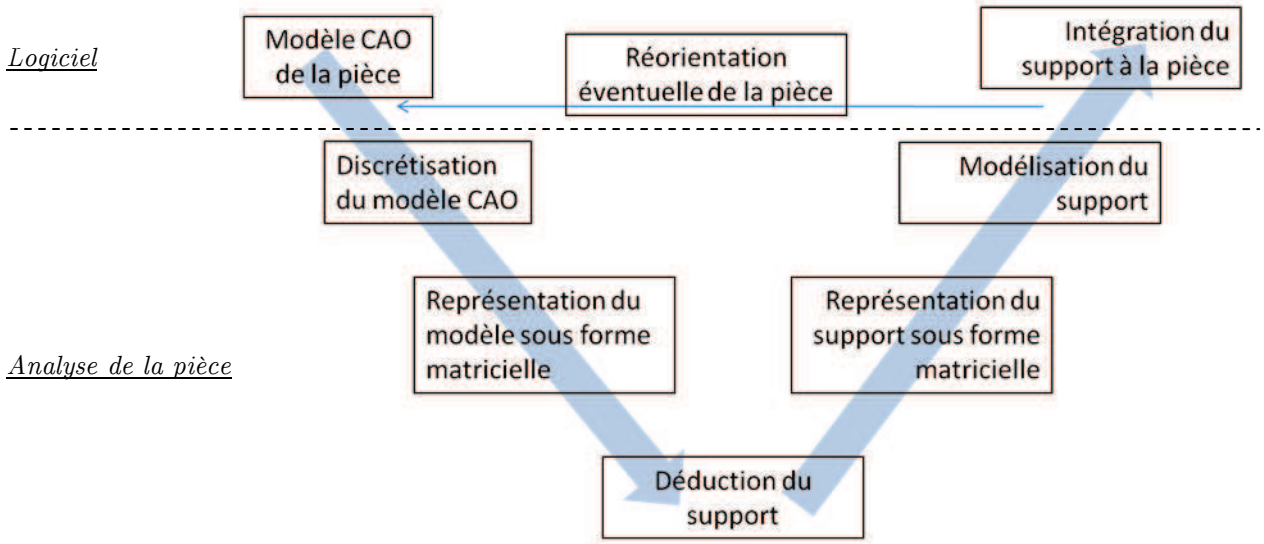


Figure 77 - Méthodologie d'optimisation du support

Le modèle CAO correspond à la pièce optimisée et orientée fournie par notre méthodologie de conception de pièce (Figure 77).

Les étapes allant de la discrétisation du modèle CAO à la modélisation du support n'ont pas de représentation physique dans la maquette numérique. Il s'agit d'une phase d'analyse permettant de générer la forme de support optimisée pour une pièce donnée. L'analyse de la pièce peut se faire de manière indépendante ou intégrée au logiciel de CAO. La discrétisation du modèle CAO consiste à décomposer le corps volumique de la pièce en octree. Il s'agit de la décomposition d'un volume parallélépipédique en huit parallélépipèdes de volumes égaux appelés octants. Chaque volume ainsi créé peut à nouveau être décomposé en huit sous-volumes et ainsi de suite (Figure 78). Chaque octant appartient à un rang, le rang 0 étant affecté au volume de départ.

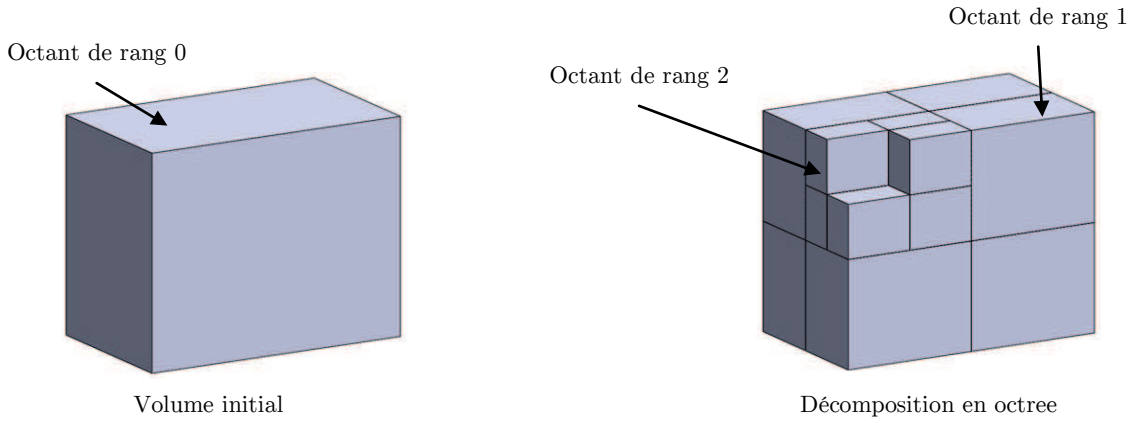


Figure 78 - Principe de composition en octree

L'intérêt de ce type de décomposition est de générer un maillage normé en trois dimensions de la pièce à fabriquer à partir de son modèle CAO afin d'en déduire les zones de support. Chaque octant est alors soit plein (dans la pièce), soit vide (en dehors de la pièce), soit partiellement rempli (intersection avec la surface de la pièce. Les coordonnées des octants en contact avec la surface de la pièce sont ensuite consignées dans une matrice. La représentation sous forme matricielle permet de déduire les zones où le support est nécessaire. Ce support est alors défini sous forme de matrices reprenant le même formalisme que celui du modèle. Un modèle 3D est alors généré à partir de ces matrices.

Enfin, l'intégration du support à la pièce correspond à l'intégration automatique du support dans la pièce à partir de la géométrie du support générée. L'ensemble de cette méthodologie est renseigné dans la méthodologie de conception de pièce de notre thèse (Chapitre III5.2).

Pour notre étude, nous utiliserons les logiciels SolidWorks comme modeleur CAO et Microsoft Excel comme cœur de calcul. Ces choix ont été faits de manière à permettre l'interopérabilité des logiciels. En effet, il est possible de réaliser des programmes en VBA communiquant entre eux à la fois dans SolidWorks et dans Excel. Cela permet également de respecter la continuité dans la chaîne numérique et de disposer d'une interface graphique permettant de valider pas à pas les différentes étapes de la méthodologie.

Dans ce chapitre, nous illustrerons nos travaux en définissant le support de la pièce suivante (Figure 79 a). Puisque la pièce a été orientée, afin de simplifier notre étude, nous nous restreindrons à la seule zone nécessitant du support (Figure 79 b).

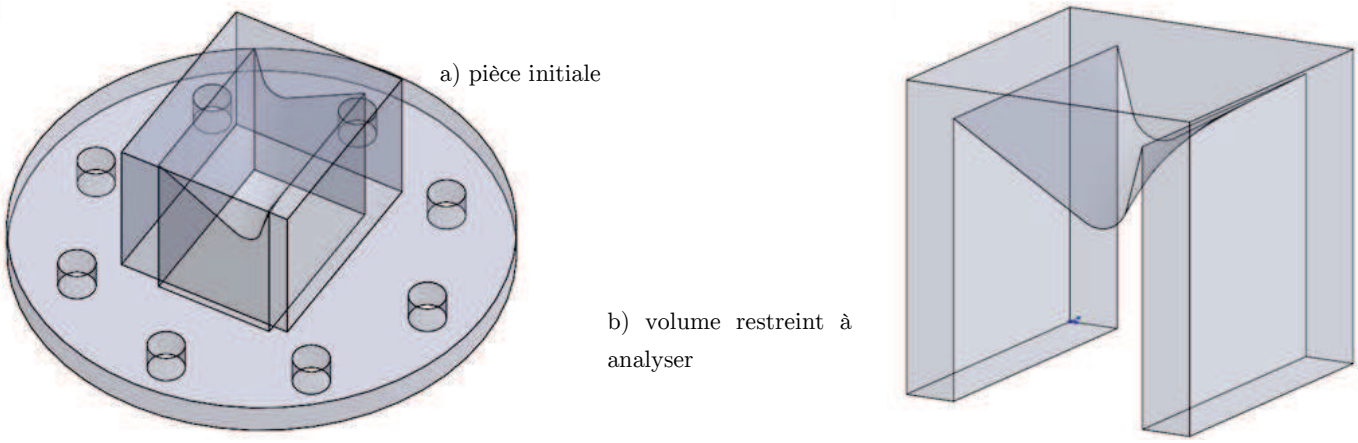


Figure 79 - Pièce d'étude pour l'optimisation du support

4.1 Modèle CAO de la pièce

4.1.a Préparation du modèle CAO

Le modèle numérique de la pièce à analyser est issu de l'étape d'optimisation topologique de notre méthodologie principale. Ce modèle est par conséquent composé d'un ou plusieurs corps volumiques. Dans un premier temps, nous ne traiterons que des pièces ne possédant qu'un seul corps volumique. Notre méthodologie reste cependant valable dans le cas d'assemblages indémontables. De plus, aucune restriction n'est imposée quant à la complexité des formes de la pièce.

Par convention, la pièce à analyser devra être positionnées dans le cadran des x, des y et des z positifs du repère pièce de SolidWorks. Le plan x-y correspondra à la représentation du plateau de la machine de fabrication additive. L'axe z correspondra donc à la direction de fabrication. Ce positionnement servira pour l'analyse de la pièce ainsi que pour la génération automatique de support.

4.1.b Application au cas d'étude

Nous reprenons ici la même charte graphique que celle du chapitre précédent : les sections correspondant au cas d'étude seront rédigées sur fond gris.

La pièce à analyser correspond à un cube de 30 mm d'arête. L'orientation de la pièce est donc celle donnée dans la Figure 79 a. La surface à supporter possède une symétrie axiale par rapport au centre de la pièce. Ceci nous permettra d'observer si le support généré présente lui aussi une symétrie de construction. La pièce étant déjà orientée par rapport à l'espace machine, il ne reste qu'à la positionner dans l'espace du logiciel de CAO (Figure 80).

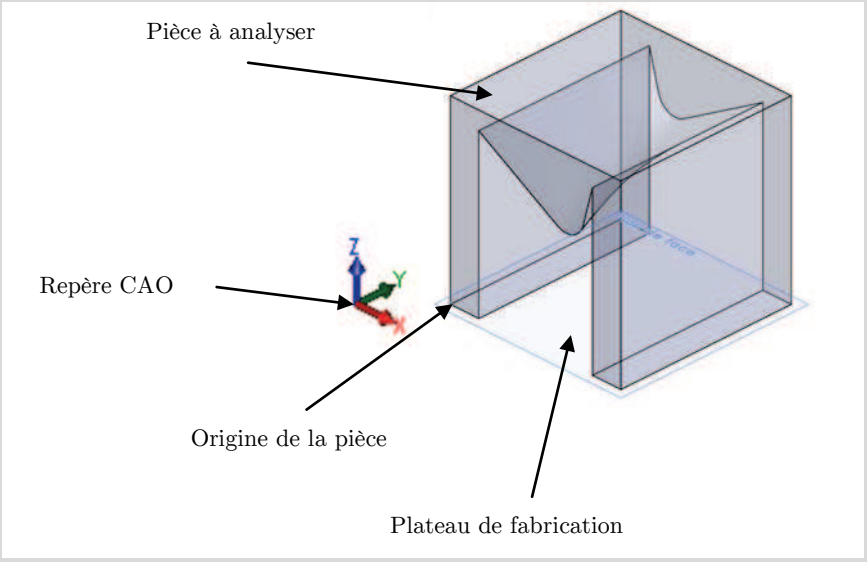


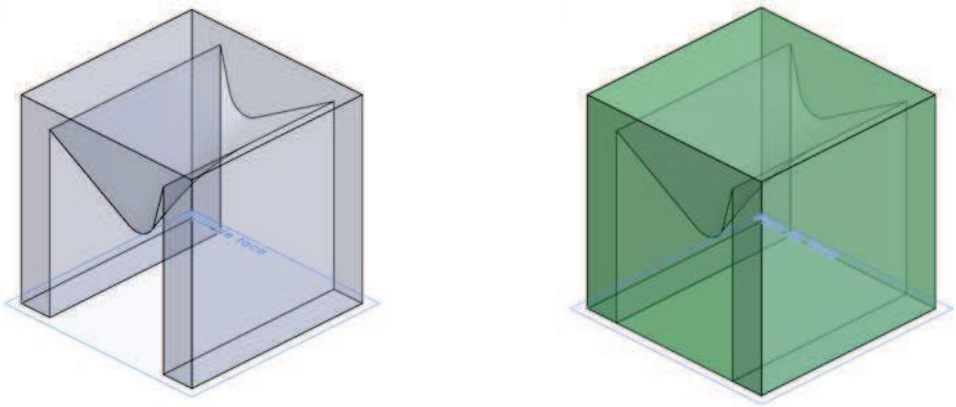
Figure 80 - Pièce positionnée dans le repère CAO

4.2 Discrétisation du modèle CAO

4.2.a Méthode de discrétisation du modèle CAO

Une fois la pièce correctement placée dans le repère du logiciel, elle est discrétisée à l'aide d'une décomposition en octree. Ce choix repose sur l'anticipation du tranchage de la pièce et sur l'angle α. En effet, l'opération de tranchage étant nécessaire, il est pertinent de générer un support dont la géométrie sera adaptée au modèle tranché de la pièce. De plus, de manière générale, la valeur de α avoisine 45°. Une discrétisation de la pièce en octants semble donc tout à fait adaptée à notre problème.

Le point de départ pour la décomposition est donc le plus petit cube V_0 englobant la pièce à fabriquer. Ce volume est orienté suivant les axes X, Y et Z de la machine. Grâce au bon positionnement de la pièce, trois des faces de V_0 sont confondues avec les plans x-y, x-z et y-z du repère CAO (Figure 81).



Pièce positionnée

Volume englobant associé en transparence de vert

Figure 81 - Initialisation de V_0

La décomposition doit fournir des octants dont les dimensions sont inférieures ou égales à la précision en z de la machine. Ainsi, la géométrie du support sera très proche de la géométrie de la pièce après conversion au format .stl et tranchage. Cela permet de gommer physiquement les approximations de l'analyse. Connaissant les coordonnées des sommets de chaque octants, il sera ensuite aisé de générer un support respectant un angle α de 45°.

Pour que l'impact de l'erreur d'approximation due à la décomposition soit négligeable, nous avons indiqué que la hauteur d'un octant soit inférieure ou égale au diamètre du fil en sortie de buse.

Or, l'arête a_i d'un octant du niveau de décomposition i est égale à :

$$a_i = \frac{a_0}{2^i}$$

Où a_0 est l'arête du volume V_0.

Le nombre d'octants à stocker est donné par la relation suivante :

$$n = \sum_{i=1}^{9} 8^i$$

En effet, pour permettre une analyse descendante depuis V_0 jusqu'au plus petit octant nécessaire, il est nécessaire de conserver chaque octant intermédiaire en mémoire. Nous nous baserons sur la méthode de décomposition en octants définie par O. Kerbrat (Olivier Kerbrat, 2009). Chaque octant doit contenir les informations suivantes :

- Numéro de l'octant : chaque octant de niveau n est numéroté « abcdef...lmn", avec $\{a, b, c, \dots, l, m, n\} \in [\![1; 8]\!]$. Ainsi, le sous-octant 3 du sous-octant 6 de l'octant 1 de V_0 est numéroté 163. Ceci permet d'associer un identifiant à chaque octant.
- Coordonnées de l'octant : il s'agit des coordonnées X, Y et Z du centre de la face du bas de l'octant. Ces coordonnées permettent à la fois de décomposer l'octant de niveau n en 8 sous-octants du niveau n+1, mais également de vérifier si deux octants appartiennent à la même pile d'octants (ces deux octants seront physiquement à la verticale l'un de l'autre). Deux octants appartiennent à la même pile si leurs coordonnées X et Y sont égales. Cette dernière information sera utilisée lors de la détermination des zones de présence du support.
- Couleur de l'octant : il s'agit d'une représentation chromatique de la matière contenue par l'octant. Nous utiliserons un jeu de 3 couleurs :
    - Blanc : l'octant est vide, il contient 0% de matière ;
    - Noir : l'octant est plein, il contient 100% de matière ;
    - Gris : l'octant contient entre 0 et 100% de matière, exclusivement ;
- Décomposition de l'octant : il s'agit d'un booléen indiquant si l'octant doit être décomposé.

Donc, chaque nouvel octant génère un set de 6 données à stocker : 1 numéro, 3 coordonnées, 1 couleur et 1 booléen.

4.2.b Application au cas d'étude

Dans notre cas, le diamètre du cordon de matière déposé par la buse est de 0,25 mm. La pièce à analyser est contenue dans un cube d'arête 30mm. Selon la formule donnée précédemment, pour $a_0 = 30$ mm, et $a_i < 0{,}25$ mm, il faut que i soit au moins égal à 6. Ce qui fait un total de 2 396 744 octants, dont 2 097 152 octants pour i = 6.

Or, une table Excel ne pouvant contenir que 1 048 576 lignes, il n'est pas possible de stocker tous les octants sous forme d'une liste continue. De plus, le programme d'O. Kerbrat, auquel nous avons eu accès, ne propose une décomposition en octree que pour une valeur maximale de i égale à 4. Enfin, ce programme ne permettait pas de trier les octants par coordonnée afin de générer une cartographie de la surface de la pièce. Par manque de temps, la décomposition automatique proposée par Olivier Kerbrat n'a donc pas pu être implémentée dans nos travaux, bien que nous ayons pu en vérifier sa validité sur un simple cube. Cependant, un travail de développement supplémentaire permettrait de répondre plus fidèlement à notre besoin. Nous avons donc décomposé manuellement la pièce sur la zone à supporter, ce qui n'est pas une méthode viable en termes de temps et de précision du maillage (limitation à quelques mm) pour des pièces complexes. C'est pourquoi la décomposition en octree est idéale. Dans notre cas, la surface supportée est strictement celle à analyser. Sous SolidWorks, nous avons donc d'abord délimité le contour de la surface de la zone à supporter à l'aide d'une esquisse. A l'intérieur de cette esquisse, une grille carrée de 2mm d'arête a été construite. Cette valeur arbitraire est un compromis entre une résolution minimum du support et le temps passé à discrétiser la surface à analyser. Sur cette grille, un assemblage de segments formant une courbe fermée a été dessiné. Ceci est dû à une limitation du logiciel pour la projection de forme sur des surfaces gauches. Cette courbe a ensuite été projetée sur la surface à supporter en suivant la direction de fabrication (Figure 82).

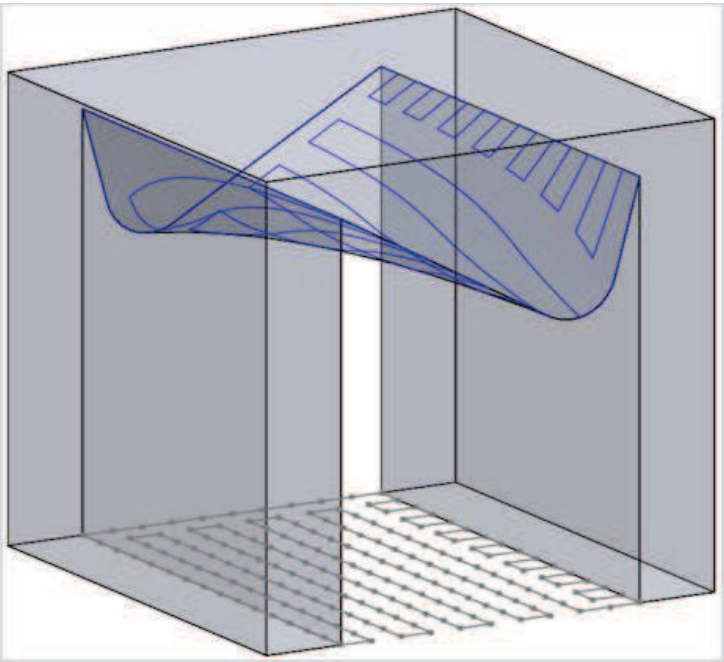


Figure 82 - Discrétisation de la surface à supporter

La dernière étape a consisté à mesurer la hauteur de chaque point de la grille ainsi projetée sur la surface à soutenir par rapport au plateau d'impression. Ces valeurs ont été enregistrées dans un fichier Excel permettant la génération du support. Dans ce cas d'étude la surface à couvrir est de 20x30 mm^2, ce qui nous donne 176 relevés. On se rend compte que l'automatisation de la discrétisation de la pièce est une partie nécessaire de notre méthodologie.

4.3 Représentation du modèle sous forme matricielle

4.3.a Modèle matriciel

Une fois la pièce décomposée en octants, ceux-ci sont extraits de la table par pile (Figure 83). Un pile contient tous les octants qui ont les mêmes coordonnées en X et en Y. Les octants de chaque pile sont ensuite triés par Z croissant. Pour chaque pile, une vérification de la présence d'octant gris est effectuée. En fonction de la présence d'un octant blanc ou d'un octant gris au dessus et/ou en dessous d'un octant gris, les deux types de surfaces de la pièce sont déduits : surface à supporter et surface permettant le positionnement des piliers.

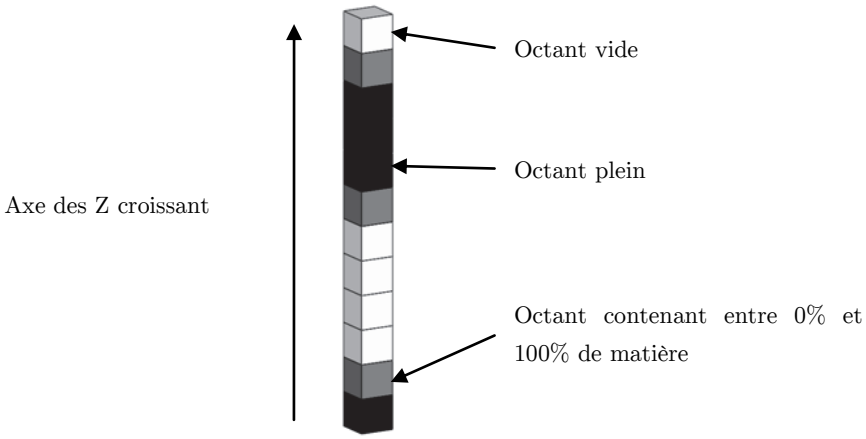


Figure 83 - Représentation graphique de la notion de pile d'octant

Une fois les surfaces à supporter définies, les coordonnées des octants blancs en contact avec la surface sont ensuite enregistrées dans des matrices de surface à supporter, que nous nommerons MSS (Figure 85). Ceci permet d'extraire les coordonnées du maillage de la surface à supporter. Chaque MSS est couplée à une matrice, de même taille, représentant la surface d'appui. En effet, les piliers du support que nous souhaitons générer doivent être construits sur de la matière. La surface d'appui peut être une combinaison de surfaces issues du plateau de fabrication de la machine et de la pièce en elle-même (Figure 84).

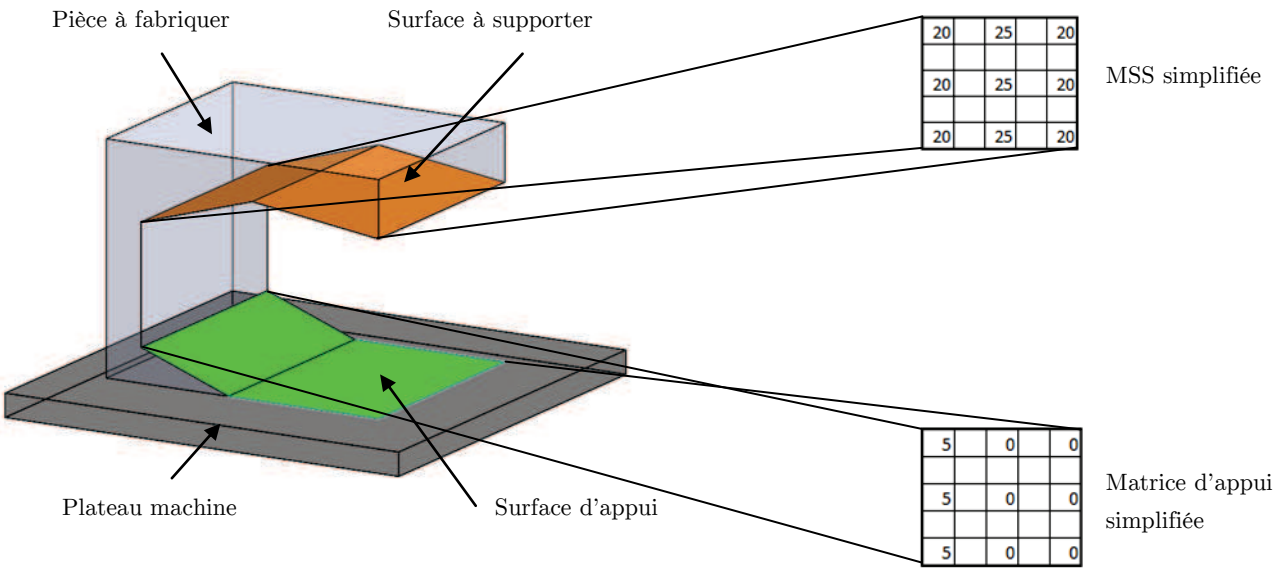
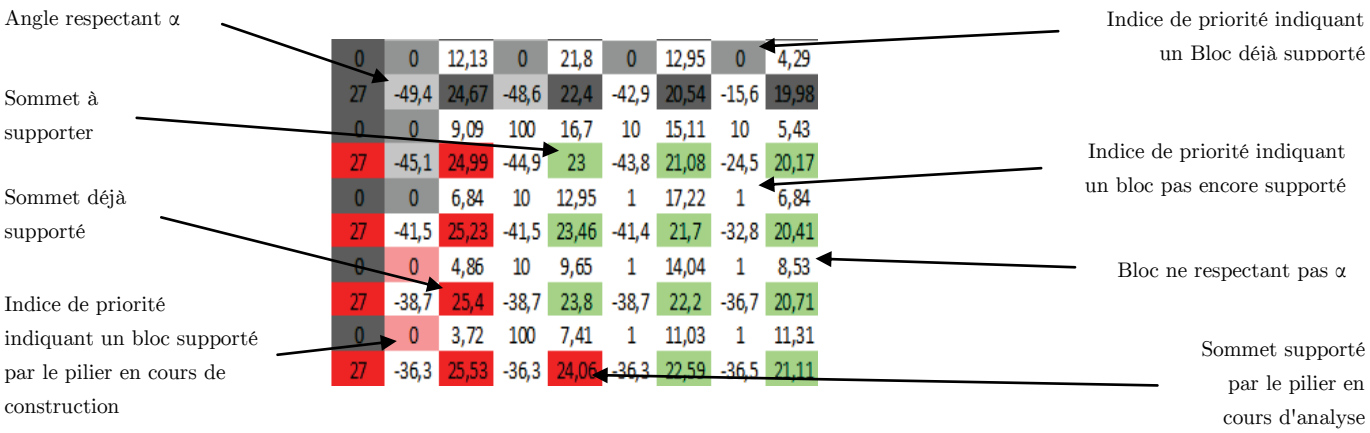


Figure 84 – Exemple de correspondance entre matrice d'appui, MSS et modèle numérique de la pièce

Une MSS est composée de données numéraires et de données chromatiques (Figure 85). La numérotation des cases commence à 1. Chaque case (i ; j) de la matrice contient une valeur numéraire :

- Si i et j impairs : la hauteur d'un point du maillage ;
- Si i et j pairs : l'indice de priorité du bloc à supporter (un bloc est défini comme étant une pile d'octants blancs);
- Si i impair et j pair : l'angle α entre les deux points de coordonnées (i ; j-1) et (i ; j+1);
- Si i pair et j impair : l'angle α entre les deux points de coordonnées (i-1 ; j) et (i+1 ; j).



Valeur de l'indice de priorité :	1 : faible priorité ; du support peut être construit sur ce bloc	10 : si possible, le bloc est à intégrer au support	100 : si possible, le bloc est à intégrer au support	1000 : le bloc doit être contenu dans le pilier en cours d'analyse

Figure 85 - Exemple de MSS

Pour chacune de ces cases, un code couleur est attribué en fonction de la valeur de la case.

La couleur d'un point du maillage donne l'indication suivante :

- Vert clair : ce point n'appartient à aucun bloc déjà supporté et ne peut être choisi pour le centre d'un pilier ;
- Vert foncé : ce point se situe à l'intersection de quatre blocs à supporter et peut être choisi comme centre de pilier
- Rouge : ce point englobé par la construction d'un pilier
- Gris foncé : ce point est déjà supporté

L'indice de priorité d'un bloc peut prendre cinq valeurs : 0, 1, 10, 100 ou 1000. Par défaut, la priorité d'un bloc est fixée à 1. Un bloc (i ; j) possède quatre blocs voisins physiques : (i+2 ; j), (i-2 ; j), (i ; j+2) et (i ; j-2). Si l'un des blocs voisins devient supporté, alors l'indice de priorité du bloc est multiplié par 10. Dans le cas où l'indice d'un bloc est égal à 1000, celui-ci doit nécessairement être intégré dans le pilier en cours de construction. Cela permet d'éviter la présence de blocs orphelins (trous dans le support) et donc de défauts sur la surface à supporter. Lorsqu'un bloc est supporté, son indice passe à 0.

La couleur d'un bloc de priorité peut prendre trois teintes :

- Blanc : le bloc est à supporter et n'est pas encore supporté ;
- Rose : le bloc sera supporté par le pilier en cours de construction ;
- Gris : le bloc est déjà supporté.

La valeur d'un angle permet de déterminer si les points adjacents nécessitent ou non du support. Ainsi, si la valeur absolue de l'angle entre les points situés en (i+1 ; j) et (i-1 ; j) est supérieur à α et que le point situé en (i+1 ; j) est plus bas que le point situé en (i-1 ; j), alors ce dernier ne nécessite plus de support dès le moment où le point situé en (i+1 ; j) est supporté.

La couleur d'un angle α peut être :

- Blanche : la valeur absolue de l'angle est inférieure à 45°;
- Gris clair : la valeur absolue de l'angle est supérieure à 45°.

Tout comme la décomposition de la pièce en octree, la construction de la MSS se fait entièrement de manière automatique. En effet, les coordonnées et la couleur des octants sont contenues dans un fichier de sauvegarde accessible au logiciel de CAO. A partir de ces données, le logiciel déduit les dimensions de la MSS coordonnées des sommets à supporter

4.3.b Application au cas d'étude

Une fois la pièce d'étude discrétisée, nous obtenons deux matrices. La première est donnée en Figure 86. Puisque le support repose uniquement sur le plateau, une seconde matrice, de même taille, composée uniquement de 0, servira pour déterminer la hauteur de la base du support.

27		20		18,61		18,92		20,07		21,23		22,38		23,54		24,69		25,85		27
	100		10		10		10		10		10		10		10		10		100	
27		21,61		19,24		19,02		19,95		21,13		22,3		23,48		24,65		25,83		27
	10		1		1		1		1		1		1		1		1		10	
27		22,83		19,93		19,32		19,77		20,98		22,18		23,39		24,59		25,8		27
	10		1		1		1		1		1		1		1		1		10	
27		23,65		20,69		19,68		19,74		20,78		22,02		23,27		24,52		25,76		27
	10		1		1		1		1		1		1		1		1		10	
27		24,24		21,6		20,08		19,83		20,49		21,8		23,01		24,41		25,7		27
	10		1		1		1		1		1		1		1		1		10	
27		24,67		22,4		20,54		19,98		20,29		21,5		22,88		24,26		25,63		27
	10		1		1		1		1		1		1		1		1		10	
27		24,99		23		21,08		20,17		20,19		21,11		22,59		24,06		25,53		27
	10		1		1		1		1		1		1		1		1		10	
27		25,23		23,46		21,7		20,41		20,14		20,71		22,2		23,8		25,4		27
	10		1		1		1		1		1		1		1		1		10	
27		25,4		23,8		22,2		20,71		20,14		20,41		21,7		23,46		25,23		27
	10		1		1		1		1		1		1		1		1		10	
27		25,53		24,06		22,59		21,11		20,19		20,17		21,08		23		24,99		27
	10		1		1		1		1		1		1		1		1		10	
27		25,63		24,26		22,88		21,5		20,29		19,98		20,54		22,4		24,67		27
	10		1		1		1		1		1		1		1		1		10	
27		25,7		24,41		23,1		21,8		20,49		19,83		20,08		21,6		24,24		27
	10		1		1		1		1		1		1		1		1		10	
27		25,76		24,52		23,27		22,02		20,78		19,74		19,88		20,69		23,65		27
	10		1		1		1		1		1		1		1		1		10	
27		25,8		24,59		23,39		22,18		20,98		19,77		19,23		19,93		22,83		27
	10		1		1		1		1		1		1		1		1		10	
27		25,83		24,65		23,48		22,3		21,13		19,95		19,02		19,24		21,61		27
	100		10		10		10		10		10		10		10		10		100	
27		25,85		24,69		23,54		22,38		21,23		20,07		18,92		18,61		20		27

Figure 86 - MSS vierge de la pièce d'étude

Nous ne nous intéresserons donc qu'à la MSS représentant la surface à supporter. Initialement, cette matrice ne contient que les hauteurs des points du maillage de la surface. Les priorités sont également initialisées par le logiciel de CAO en fonction de la position des blocs. On remarque donc que le bloc de coordonnées (2,2) a une priorité initiale de 100. En effet, ce bloc ne peut être relié physiquement au support que par les blocs (2,4) et (4,2). Cette priorité permet donc d'éviter que ce bloc ne devienne orphelin.

A partir de cette matrice, le logiciel peut déduire les angles entre les sommets des différents blocs et commencer à déterminer la géométrie du support.

4.4 Déduction du support

Dans la partie précédente, nous avons défini les différentes composantes d'une MSS. Nous allons maintenant présenter les règles permettant de déterminer les blocs de cette matrice qui composeront le support.

4.4.a Méthode de déduction du support

Maintenant que nous avons présenté le concept de MSS, voici les règles à appliquer successivement permettant de générer une colonne :

- Règle 1 : calculer tous les angles de la MSS ;
- Règle 2 : Indiquer les zones limites avec présence de matière. Ces zones correspondent aux sommets qui appartiennent à des blocs ne nécessitant pas de support. Cela arrive dans le cas où le bord de la surface appartient à la pièce à concevoir (). Elles sont donc colorées en gris foncé, ce qui permet de les considérer comme des zones virtuellement supportées ;

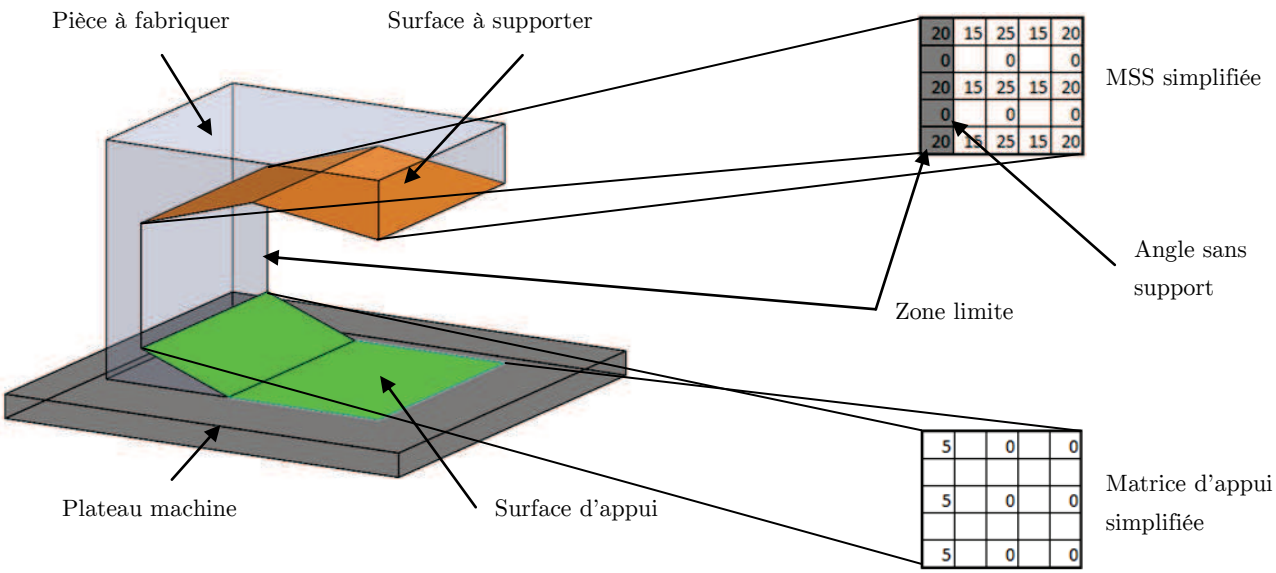


Figure 87 - Exemple de zone limite

- Règle 3 : A partir des angles et des zones limites, indiquer les points ne nécessitant pas de support (Figure 87). Ceux-ci sont également colorés en gris foncé dans la MSS ;
- Règle 4 : Localiser les emplacements potentiels pour les centres de pilier. A partir de ce moment, les cases de la matrice représentant les points à supporter sont soit vert clair, soit gris foncé. Connaissant la longueur de l'arête c de la section d'un pilier et la largeur a_{nfin} d'un octant du dernier niveau n_{fin}, le nombre p_{min} de blocs nécessaires pour la génération d'un pilier est le suivant :

$$\begin{cases} p_{min} = \left\lceil \frac{c}{a_{n_{fin}}} \right\rceil \; si \; \left\lceil \frac{c}{a_{n_{fin}}} \right\rceil \; impair \\ p_{min} = \left\lceil \frac{c}{a_{n_{fin}}} \right\rceil + 1 \; si \; \left\lceil \frac{c}{a_{n_{fin}}} \right\rceil \; pair \end{cases}$$

Le centre d'un pilier se situant sur un point, p_{min} doit être nécessairement impair. Ainsi, seuls tous les point situés à au moins

$$\frac{p_{min} - 1}{2} + 1$$

points du bord de la matrice et des points gris foncés sont éligibles. Ceux-ci sont alors colorés en vert foncé.

- Règle 5 : sélectionner l'origine du pilier à construire. Par défaut, il s'agit du point vert foncé de plus petite hauteur. Comme nous l'avons vu précédemment, la forme de la tête du support est une pyramide inversée. Or, le but est de minimiser le volume nécessaire de support à construire. Il est donc préférable que la tête de la colonne englobe le maximum de matière au niveau des surfaces à supporter de la pièce à construire (Figure 88).

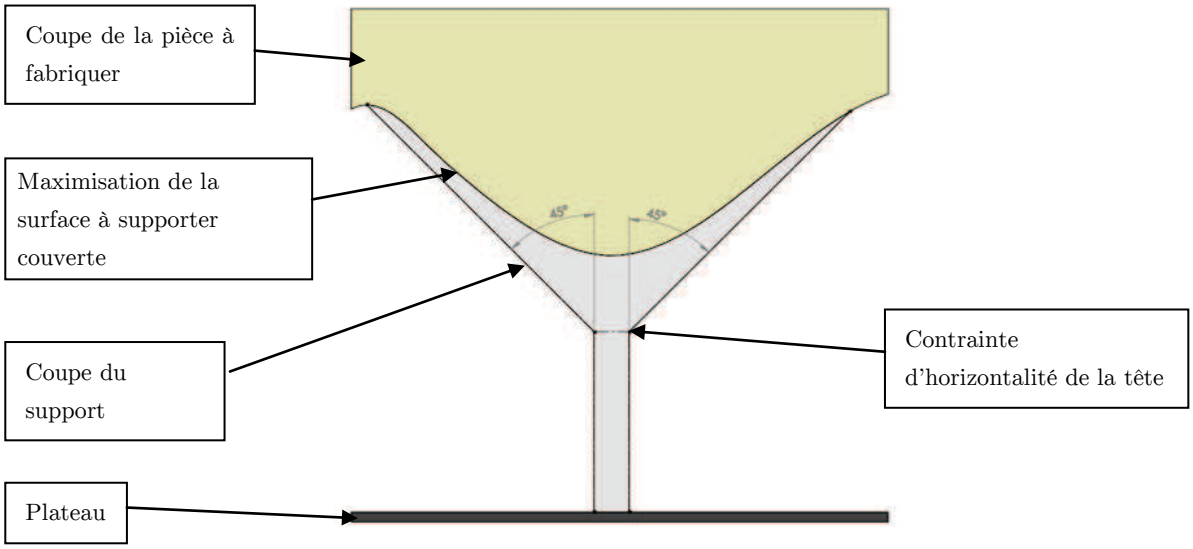


Figure 88 - Placement du centre du pilier

- Règle 6 : Le ratio entre le volume du support proposé et le volume de support maximal ne doit pas être supérieur à un seuil s. indiqué par le concepteur. Le volume de support maximal correspond au volume de matière déposé dans le cas où le tranchage serait réalisé par un logiciel standard. Il est aisé de le déduire car il correspond au volume des tous les octants blancs situés entre la surface à supporter et la surface sur la laquelle peuvent reposer les piliers. Ce ratio peut varier entre 0 et 1. Cependant, un seuil s = 1 correspond à une génération de support dont le volume est justement égal au volume de matière maximal tandis qu'un seuil s = 0 correspond à la fabrication d'une pièce sans support. Par défaut, la valeur s est fixée à 0,4, ce qui correspond à un gain minimum de 60% de support, mais elle peut être modifiée en fonction de la géométrie de la pièce. En effet, la génération du support que nous proposons se base sur une plus grande couverture possible de la surface à supporter. Or, plus la surface à supporter est grande, plus le pilier est petit et plus le volume du support est susceptible d'augmenter, ce qui est en contradiction avec le but de notre méthode (Figure 89). Ce seuil est donc nécessaire à la construction du support car il crée un critère d'arrêt pour la surface couverte par un seul pilier.

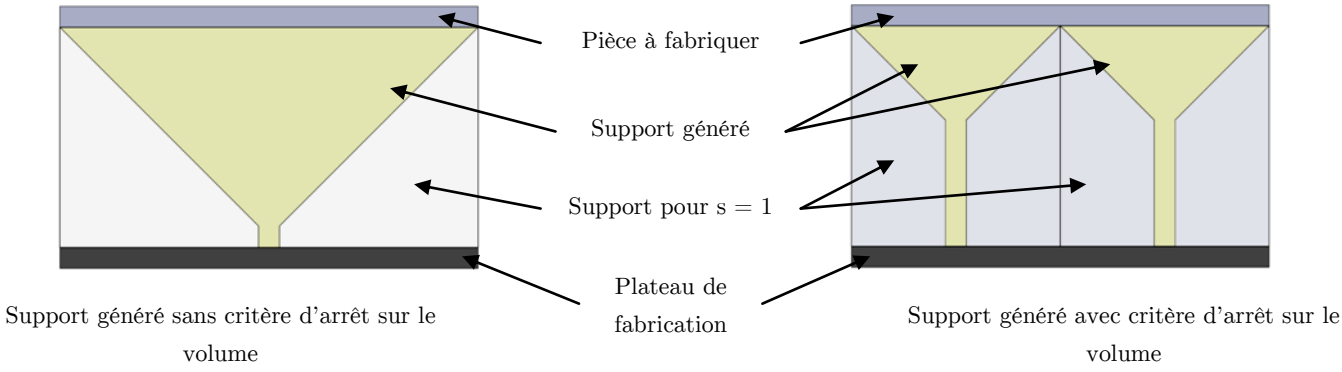


Figure 89 – Augmentation du volume de support proportionnellement à la surface à couvrir

- Règle 7 : il n'est pas permis de laisser des blocs orphelins. Un groupe de blocs est dits orphelin si la surface qu'ils couvrent est inférieure à l'aire de la section d'un pilier (Figure 90). Cette règle vient contrebalancer la précédente en dégradant volontairement le support dans le cas où la surface couverte par plusieurs blocs ne suffirait pas à intégrer un pilier (voir règle 4). Elle est assurée par l'indice de priorité affecté aux blocs. Pour éviter cela, le bas de la tête de la colonne en cours de construction est

volontairement abaissé pour intégrer une surface trop petite pour être supportée par un pilier. En effet, la fabricabilité de la pièce est prioritaire sur l'optimisation du support.

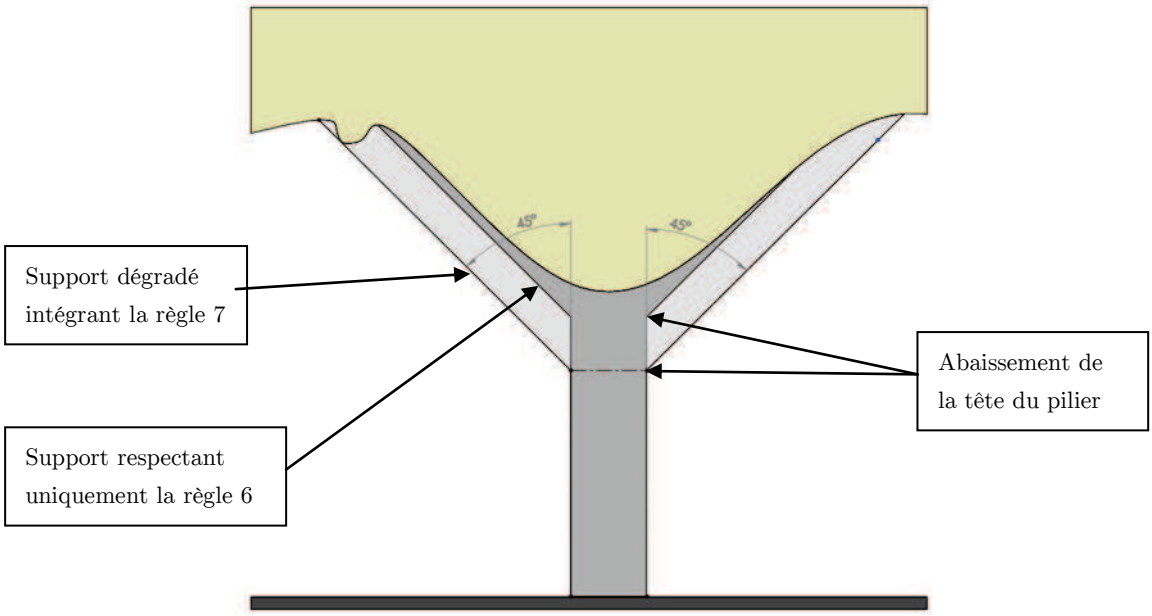


Figure 90 - Dégradation volontaire de la colonne afin de prendre en compte la topologie de la pièce

Une fois le centre du pilier défini, les blocs à considérer sont déduits de manière itérative. La hauteur de la base de la tête est d'abord fixée à la hauteur du sommet du centre du pilier. Une première passe est réalisée de manière à intégrer tous les blocs contenus à l'intérieur de la surface projetée de la tête. Puis, le volume de support est estimé afin de vérifier si le seuil s n'est pas dépassé. Si non, la tête de la colonne est abaissée petit à petit afin de couvrir la plus grande surface possible. Si le critère est dépassé, on revient à la hauteur précédente. Enfin, à chaque itération, on vérifie qu'aucun bloc n'est orphelin.

Une fois une colonne générée, les cases rouges et roses de la matrice sont basculées respectivement en gris foncé et gris pour permettre la construction de la colonne suivante. On retourne donc à la règle 3 de la déduction du support (Figure 91). Une fois l'intégration des blocs dans la colonne en cours d'analyse terminée, la colonne est sauvegardée sous forme matricielle. Une nouvelle analyse est lancée afin de déduire la prochaine colonne de support. Puis, lorsque toutes les colonnes sont définies, le support peut être généré sous SolidWorks. Nous allons détailler ces deux étapes dans les deux prochaines sections de ce chapitre.

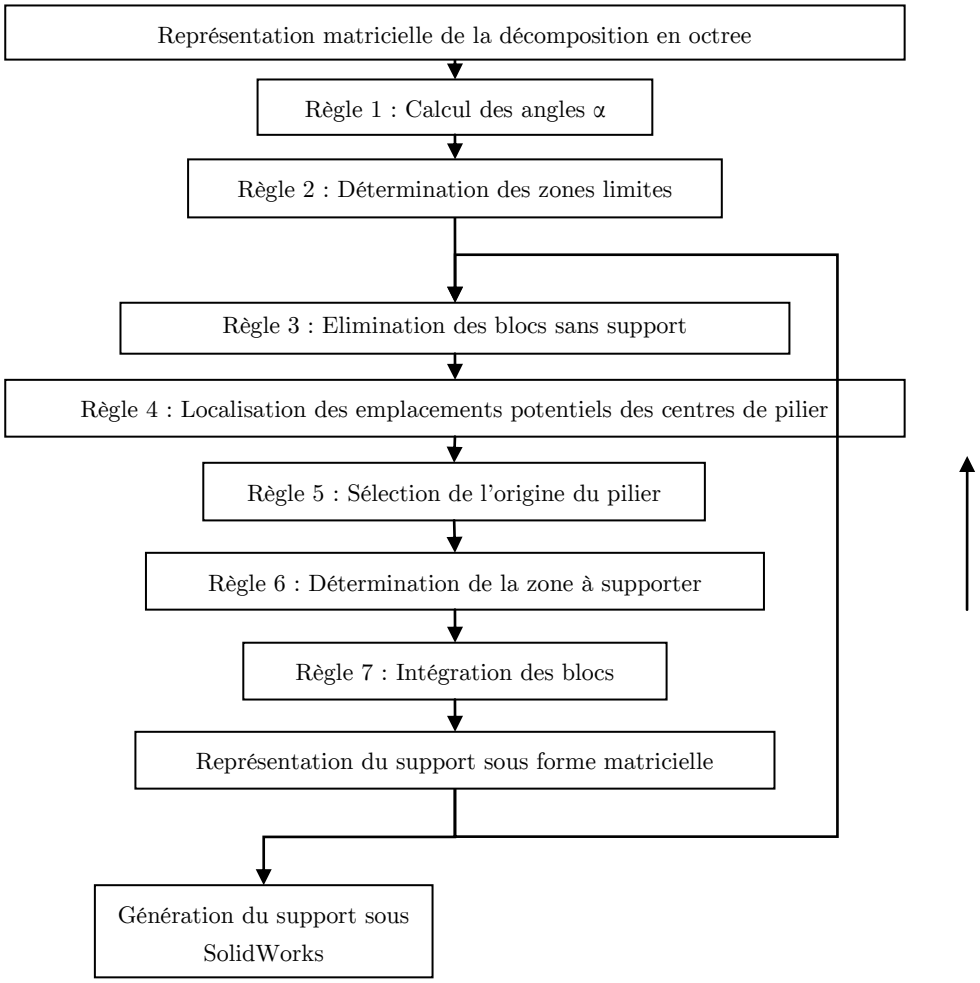


Figure 91 - Méthode de détermination d'une colonne à partir de la MSS

4.4.b Application au cas d'étude

Pour cette étape, nous nous appuierons directement sur le résultat final pour expliquer le déroulement de l'algorithme.

Etant donné les conditions initiales de cette optimisation, trois passes sont nécessaires pour la construction du support de notre pièce. Le centre du premier pilier est centré sur le sommet de hauteur 19,02, soit aux coordonnées (7,3) de la MMS (Figure 92). On remarque que l'analyse considère tous les sommets concernés par la tête du support. En revanche, seuls les blocs non supportés sont pris en compte pour la construction de la colonne. Le centre du second pilier est centré sur le sommet de hauteur 19,02, soit aux coordonnées (15,29) de la MMS. On remarque une symétrie entre la zone couverte par le premier et le second pilier, ce qui montre que notre méthodologie s'adapte bien à la morphologie de la pièce. Enfin, le dernier pilier est centré aux coordonnées (11,15) de la matrice. Nous faisons le choix arbitraire, en cas de hauteurs égales, de prendre le sommet dont les coordonnées dans la MMS sont les plus petites. Bien entendu, ce choix est discutable. En effet, il serait également possible de prendre le sommet le plus éloigné ou le plus proche de zones sans support. Cependant, bien que ce choix impacte sur la géométrie finale du support, il n'est pas possible, a priori, de définir quelle solution est la plus pertinente. Pour valider cette hypothèse, il faudrait effectuer une optimisation du support pour chaque sommet de plus petite hauteur. Or, pour une MSS décrivant une pièce avec une résolution inférieure au dixième de millimètre, il faut compter plus d'une heure de traitement. Ainsi, une réelle optimisation permettant de donner la solution

optimale de géométrie de support pourrait prendre plusieurs jours à calculer. La méthode que nous proposons, bien qu'elle ne soit pas parfaite, propose néanmoins une première optimisation du support pour un temps de calcul raisonnable.

4.5 Représentation du support sous forme matricielle

4.5.a Enregistrement de chaque colonne sous forme matricielle

A chaque fois qu'une colonne est générée, les données suivantes sont intégrées dans la MSS :

- Localisation des blocs à supporter ;
- Coordonnées des 4 sommets du haut de chaque bloc ;
- Hauteur de la face basse de la tête ;
- Le volume de matière de la colonne ;
- Le volume de matière maximal.

Chaque colonne est donc contenue dans une MSS qui lui est propre et qui est sauvegardée dans un nouveau fichier informatique. Les données numériques ainsi que les informations de couleur des MSS sont conservées. Pour la première MSS, dans le cas où aucune zone limite n'appartient au volume de la pièce, celle-ci ne contiendra alors aucune case grise. Réciproquement, la dernière matrice ne contient plus aucune case verte. Enfin, chaque matrice correspondant à une colonne de support, toutes contiennent donc un ensemble non vide de cases rouges et roses. Une fois l'analyse de la pièce terminée, l'utilisateur dispose donc d'un nombre de fichiers égal au nombre de colonnes de support à générer. Chaque matrice est ensuite lue par le logiciel de CAO pour la création automatique du support.

4.5.b Application au cas d'étude

Comme résultat de l'étape précédente, on obtient donc finalement trois matrices représentant le support (Figure 92, Figure 93 et Figure 94). Comme indiqué précédemment, la dernière matrice ne contient aucune case verte. En effet, la surface à supporter est totalement couverte par le support. L'intérêt d'utiliser le logiciel Excel pour nos travaux est d'apporter une aide visuelle. Les cases roses de la matrice nous fournissent ici un aperçu de la forme du support. En revanche, il est tout à fait possible de remplacer ce logiciel en intégrant directement les programmes d'analyse dans le logiciel de CAO. Cela revient à stocker un doublet dans chaque case de la matrice : (*valeur numérique*, *valeur chromatique*).

27	-74,1	20	-34,8	18,61	8,81	18,92	29,9	20,07	30,11	21,23	29,9	22,38	30,11	23,54	29,9	24,69	30,11	25,85	29,9	27
0	0	38,83	0	17,48	0	2,86	0	-3,43	0	-2,86	0	-2,29	0	-1,72	0	-1,15	0	-0,57	0	0
27	-69,6	21,61	-49,8	19,24	-6,28	19,02	24,94	19,95	30,54	21,13	30,33	22,3	30,54	23,48	30,33	24,65	30,54	25,83	30,33	27
0	0	31,38	0	19,03	0	8,53	0	-5,14	0	-4,29	0	-3,43	0	-2,58	0	-1,72	0	-0,86	0	0
27	-64,4	22,83	-55,4	19,93	-17	19,32	12,68	19,77	31,17	20,98	30,96	22,18	31,17	23,39	30,96	24,59	31,17	25,8	30,96	27
0	0	22,29	0	20,81	0	10,2	0	-0,86	0	-5,71	0	-4,57	0	-3,43	0	-2	0	-1,15	0	0
27	-59,2	23,65	-56	20,69	-26,8	19,68	1,72	19,74	27,47	20,78	31,8	22,02	32,01	23,27	32,01	24,52	31,8	25,76	31,8	27
0	0	16,44	0	24,47	0	11,31	0	2,58	0	-8,25	0	-6,28	0	-7,41	0	-3,15	0	-1,72	0	0
27	-54,1	24,24	-52,9	21,6	-37,2	20,08	-7,13	19,83	18,26	20,49	33,22	21,8	31,17	23,01	34,99	24,41	32,82	25,7	33,02	27
0	0	12,13	0	21,8	0	12,95	0	4,29	0	-5,71	0	-8,53	0	-3,72	0	-4,29	0	-2	0	0
27	-49,4	24,67	-48,6	22,4	-42,9	20,54	-15,6	19,98	8,81	20,29	31,17	21,5	34,61	22,88	34,61	24,26	34,41	25,63	34,41	27
0	0	9,09	100	16,7	10	15,11	10	5,43	10	-2,86	10	-11	10	-8,25	100	-5,71	0	-2,86	0	0
27	-45,1	24,99	-44,9	23	-43,8	21,08	-24,5	20,17	0,57	20,19	24,7	21,11	36,5	22,59	36,32	24,06	36,32	25,53	36,32	27
0	0	6,84	10	12,95	1	17,22	1	6,84	1	-1,43	1	-11,3	1	-11	1	-7,41	100	-3,72	0	0
27	-41,5	25,23	-41,5	23,46	-41,4	21,7	-32,8	20,41	-7,69	20,14	15,91	20,71	36,69	22,2	38,66	23,8	38,66	25,4	38,66	27
0	10	4,86	1	9,65	1	14,04	1	8,53	1	0	1	-8,53	1	-14	1	-9,65	10	-4,86	0	0
27	-38,7	25,4	-38,7	23,8	-38,7	22,2	-36,7	20,71	-15,9	20,14	7,69	20,41	32,82	21,7	41,35	23,46	41,51	25,23	41,51	27
0	1	3,72	1	7,41	1	11,03	1	11,31	1	1,43	1	-6,84	1	-17,2	1	-13	10	-6,84	0	0
27	-36,3	25,53	-36,3	24,06	-36,3	22,59	-36,5	21,11	-24,7	20,19	-0,57	20,17	24,47	21,08	43,83	23	44,86	24,99	45,14	27
0	1	2,86	1	5,71	1	8,25	1	11,03	1	2,86	1	-5,43	1	-15,1	1	-16,7	100	-9,09	0	0
27	-34,4	25,63	-34,4	24,26	-34,6	22,88	-34,6	21,5	-31,2	20,29	-8,81	19,98	15,64	20,54	42,92	22,4	48,62	24,67	49,36	27
0	1	2	1	4,29	1	6,28	1	8,53	1	5,71	1	-4,29	1	-13	10	-21,8	0	-12,1	0	0
27	-33	25,7	-32,8	24,41	-33,2	23,1	-33	21,8	-33,2	20,49	-18,3	19,83	7,13	20,08	37,23	21,6	52,85	24,24	54,07	27
0	1	1,72	1	3,15	1	4,86	1	6,28	1	8,25	1	-2,58	1	-5,71	10	-24,5	0	-16,4	0	0
27	-31,8	25,76	-31,8	24,52	-32	23,27	-32	22,02	-31,8	20,78	-27,5	19,74	4	19,88	22,05	20,69	55,95	23,65	59,16	27
0	1	1,15	1	2	1	3,43	1	4,57	1	5,71	1	0,86	1	-18	10	-20,8	0	-22,3	0	0
27	-31	25,8	-31,2	24,59	-31	23,39	-31,2	22,18	-31	20,98	-31,2	19,77	-15,1	19,23	19,29	19,93	55,41	22,83	64,38	27
0	1	0,86	1	1,72	1	2,58	1	3,43	1	4,29	1	5,14	1	-5,99	10	-19	0	-31,4	0	0
27	-30,3	25,83	-30,5	24,65	-30,3	23,48	-30,5	22,3	-30,3	21,13	-30,5	19,95	-24,9	19,02	6,28	19,24	49,84	21,61	69,64	27
0	1	0,57	10	1,15	10	1,72	10	2,29	10	2,86	10	3,43	10	-2,86	10	-17,5	1000	-38,8	0	0
27	-29,9	25,85	-30,1	24,69	-29,9	23,54	-30,1	22,38	-29,9	21,23	-30,1	20,07	-29,9	18,92	-8,81	18,61	34,8	20	74,05	27

Figure 92 - Déduction du premier pilier

27	-74,1	20	-34,8	18,61	8,81	18,92	29,9	20,07	30,11	21,23	29,9	22,38	30,11	23,54	29,9	24,69	30,11	25,85	29,9	27
0	0	38,83	0	17,48	0	2,86	0	-3,43	0	-2,86	0	-2,29	0	-1,72	0	-1,15	0	-0,57	0	0
27	-69,6	21,61	-49,8	19,24	-6,28	19,02	24,94	19,95	30,54	21,13	30,33	22,3	30,54	23,48	30,33	24,65	30,54	25,83	30,33	27
0	0	31,38	0	19,03	0	8,53	0	-5,14	0	-4,29	0	-3,43	0	-2,58	0	-1,72	0	-0,86	0	0
27	-64,4	22,83	-55,4	19,93	-17	19,32	12,68	19,77	31,17	20,98	30,96	22,18	31,17	23,39	30,96	24,59	31,17	25,8	30,96	27
0	0	22,29	0	20,81	0	10,2	0	-0,86	0	-5,71	0	-4,57	0	-3,43	0	-2	0	-1,15	0	0
27	-59,2	23,65	-56	20,69	-26,8	19,68	1,72	19,74	27,47	20,78	31,8	22,02	32,01	23,27	32,01	24,52	31,8	25,76	31,8	27
0	0	16,44	0	24,47	0	11,31	0	2,58	0	-8,25	0	-6,28	0	-7,41	0	-3,15	0	-1,72	0	0
27	-54,1	24,24	-52,9	21,6	-37,2	20,08	-7,13	19,83	18,26	20,49	33,22	21,8	31,17	23,01	34,99	24,41	32,82	25,7	33,02	27
0	0	12,13	0	21,8	0	12,95	0	4,29	0	-5,71	0	-8,53	0	-3,72	0	-4,29	0	-2	0	0
27	-49,4	24,67	-48,6	22,4	-42,9	20,54	-15,6	19,98	8,81	20,29	31,17	21,5	34,61	22,88	34,61	24,26	34,41	25,63	34,41	27
0	0	9,09	100	16,7	10	15,11	10	5,43	10	-2,86	10	-11	10	-8,25	100	-5,71	0	-2,86	0	0
27	-45,1	24,99	-44,9	23	-43,8	21,08	-24,5	20,17	0,57	20,19	24,7	21,11	36,5	22,59	36,32	24,06	36,32	25,53	36,32	27
0	0	6,84	10	12,95	1	17,22	1	6,84	1	-1,43	1	-11,3	1	-11	1	-7,41	100	-3,72	0	0
27	-41,5	25,23	-41,5	23,46	-41,4	21,7	-32,8	20,41	-7,69	20,14	15,91	20,71	36,69	22,2	38,66	23,8	38,66	25,4	38,66	27
0	0	4,86	10	9,65	1	14,04	1	8,53	1	0	1	-8,53	1	-14	1	-9,65	10	-4,86	0	0
27	-38,7	25,4	-38,7	23,8	-38,7	22,2	-36,7	20,71	-15,9	20,14	7,69	20,41	32,82	21,7	41,35	23,46	41,51	25,23	41,51	27
0	0	3,72	100	7,41	1	11,03	1	11,31	1	1,43	1	-6,84	1	-17,2	1	-13	10	-6,84	0	0
27	-36,3	25,53	-36,3	24,06	-36,3	22,59	-36,5	21,11	-24,7	20,19	-0,57	20,17	24,47	21,08	43,83	23	44,86	24,99	45,14	27
0	0	2,86	0	5,71	100	8,25	10	11,03	10	2,86	10	-5,43	10	-15,1	10	-16,7	100	-9,09	0	0
27	-34,4	25,63	-34,4	24,26	-34,6	22,88	-34,6	21,5	-31,2	20,29	-8,81	19,98	15,64	20,54	42,92	22,4	48,62	24,67	49,36	27
0	0	2	0	4,29	0	6,28	0	8,53	0	5,71	0	-4,29	0	-13	0	-21,8	0	-12,1	0	0
27	-33	25,7	-32,8	24,41	-33,2	23,1	-33	21,8	-33,2	20,49	-18,3	19,83	7,13	20,08	37,23	21,6	52,85	24,24	54,07	27
0	0	1,72	0	3,15	0	4,86	0	6,28	0	8,25	0	-2,58	0	-5,71	0	-24,5	0	-16,4	0	0
27	-31,8	25,76	-31,8	24,52	-32	23,27	-32	22,02	-31,8	20,78	-27,5	19,74	4	19,88	22,05	20,69	55,95	23,65	59,16	27
0	0	1,15	0	2	0	3,43	0	4,57	0	5,71	0	0,86	0	-18	0	-20,8	0	-22,3	0	0
27	-31	25,8	-31,2	24,59	-31	23,39	-31,2	22,18	-31	20,98	-31,2	19,77	-15,1	19,23	19,29	19,93	55,41	22,83	64,38	27
0	0	0,86	0	1,72	0	2,58	0	3,43	0	4,29	0	5,14	0	-5,99	0	-19	0	-31,4	0	0
27	-30,3	25,83	-30,5	24,65	-30,3	23,48	-30,5	22,3	-30,3	21,13	-30,5	19,95	-24,9	19,02	6,28	19,24	49,84	21,61	69,64	27
0	0	0,57	0	1,15	0	1,72	0	2,29	0	2,86	0	3,43	0	-2,86	0	-17,5	0	-38,8	0	0
27	-29,9	25,85	-30,1	24,69	-29,9	23,54	-30,1	22,38	-29,9	21,23	-30,1	20,07	-29,9	18,92	-8,81	18,61	34,8	20	74,05	27

Figure 93 - Déduction du second pilier

27	-74,1	20	-34,8	18,61	8,81	18,92	29,9	20,07	30,11	21,23	29,9	22,38	30,11	23,54	29,9	24,69	30,11	25,85	29,9	27
0	0	38,83	0	17,48	0	2,86	0	-3,43	0	-2,86	0	-2,29	0	-1,72	0	-1,15	0	-0,57	0	0
27	-69,6	21,61	-49,8	19,24	-6,28	19,02	24,94	19,95	30,54	21,13	30,33	22,3	30,54	23,48	30,33	24,65	30,54	25,83	30,33	27
0	0	31,38	0	19,03	0	8,53	0	-5,14	0	-4,29	0	-3,43	0	-2,58	0	-1,72	0	-0,86	0	0
27	-64,4	22,83	-55,4	19,93	-17	19,32	12,68	19,77	31,17	20,98	30,96	22,18	31,17	23,39	30,96	24,59	31,17	25,8	30,96	27
0	0	22,29	0	20,81	0	10,2	0	-0,86	0	-5,71	0	-4,57	0	-3,43	0	-2	0	-1,15	0	0
27	-59,2	23,65	-56	20,69	-26,8	19,68	1,72	19,74	27,47	20,78	31,8	22,02	32,01	23,27	32,01	24,52	31,8	25,76	31,8	27
0	0	16,44	0	24,47	0	11,31	0	2,58	0	-8,25	0	-6,28	0	-7,41	0	-3,15	0	-1,72	0	0
27	-54,1	24,24	-52,9	21,6	-37,2	20,08	-7,13	19,83	18,26	20,49	33,22	21,8	31,17	23,01	34,99	24,41	32,82	25,7	33,02	27
0	0	12,13	0	21,8	0	12,95	0	4,29	0	-5,71	0	-8,53	0	-3,72	0	-4,29	0	-2	0	0
27	-49,4	24,67	-48,6	22,4	-42,9	20,54	-15,6	19,98	8,81	20,29	31,17	21,5	34,61	22,88	34,61	24,26	34,41	25,63	34,41	27
0	0	9,09	0	16,7	0	15,11	0	5,43	0	-2,86	0	-11	0	-8,25	0	-5,71	0	-2,86	0	0
27	-45,1	24,99	-44,9	23	-43,8	21,08	-24,5	20,17	0,57	20,19	24,7	21,11	36,5	22,59	36,32	24,06	36,32	25,53	36,32	27
0	0	6,84	0	12,95	0	17,22	0	6,84	0	-1,43	0	-11,3	0	-11	0	-7,41	0	-3,72	0	0
27	-41,5	25,23	-41,5	23,46	-41,4	21,7	-32,8	20,41	-7,69	20,14	15,91	20,71	36,69	22,2	38,66	23,8	38,66	25,4	38,66	27
0	0	4,86	0	9,65	0	14,04	0	8,53	0	0	0	-8,53	0	-14	0	-9,65	0	-4,86	0	0
27	-38,7	25,4	-38,7	23,8	-38,7	22,2	-36,7	20,71	-15,9	20,14	7,69	20,41	32,82	21,7	41,35	23,46	41,51	25,23	41,51	27
0	0	3,72	0	7,41	0	11,03	0	11,31	0	1,43	0	-6,84	0	-17,2	0	-13	0	-6,84	0	0
27	-36,3	25,53	-36,3	24,06	-36,3	22,59	-36,5	21,11	-24,7	20,19	-0,57	20,17	24,47	21,08	43,83	23	44,86	24,99	45,14	27
0	0	2,86	0	5,71	0	8,25	0	11,03	0	2,86	0	-5,43	0	-15,1	0	-16,7	0	-9,09	0	0
27	-34,4	25,63	-34,4	24,26	-34,6	22,88	-34,6	21,5	-31,2	20,29	-8,81	19,98	15,64	20,54	42,92	22,4	48,62	24,67	49,36	27
0	0	2	0	4,29	0	6,28	0	8,53	0	5,71	0	-4,29	0	-13	0	-21,8	0	-12,1	0	0
27	-33	25,7	-32,8	24,41	-33,2	23,1	-33	21,8	-33,2	20,49	-18,3	19,83	7,13	20,08	37,23	21,6	52,85	24,24	54,07	27
0	0	1,72	0	3,15	0	4,86	0	6,28	0	8,25	0	-2,58	0	-5,71	0	-24,5	0	-16,4	0	0
27	-31,8	25,76	-31,8	24,52	-32	23,27	-32	22,02	-31,8	20,78	-27,5	19,74	4	19,88	22,05	20,69	55,95	23,65	59,16	27
0	0	1,15	0	2	0	3,43	0	4,57	0	5,71	0	0,86	0	-18	0	-20,8	0	-22,3	0	0
27	-31	25,8	-31,2	24,59	-31	23,39	-31,2	22,18	-31	20,98	-31,2	19,77	-15,1	19,23	19,29	19,93	55,41	22,83	64,38	27
0	0	0,86	0	1,72	0	2,58	0	3,43	0	4,29	0	5,14	0	-5,99	0	-19	0	-31,4	0	0
27	-30,3	25,83	-30,5	24,65	-30,3	23,48	-30,5	22,3	-30,3	21,13	-30,5	19,95	-24,9	19,02	6,28	19,24	49,84	21,61	69,64	27
0	0	0,57	0	1,15	0	1,72	0	2,29	0	2,86	0	3,43	0	-2,86	0	-17,5	0	-38,8	0	0
27	-29,9	25,85	-30,1	24,69	-29,9	23,54	-30,1	22,38	-29,9	21,23	-30,1	20,07	-29,9	18,92	-8,81	18,61	34,8	20	74,05	27

Figure 94 - Déduction du troisième et dernier pilier

4.6 Modélisation du support

4.6.a Méthode de modélisation du support

La génération du support par le logiciel de CAO est effectuée colonne après colonne. Chaque colonne est générée dans un nouveau fichier pièce. Par convention, nous considèrerons que l'origine de chaque colonne est confondue avec le point repéré par la case (1; 1) de la matrice. Cela permet donc de positionner correctement chaque colonne du pilier par rapport à V_0 et, donc, par rapport à la pièce. Ainsi, par une simple contrainte de coïncidence des origines, le support sera directement positionné et orienté par rapport à la pièce.

Pour générer une colonne, le logiciel de CAO utilise à la fois la MSS de cette colonne ainsi que la matrice d'appui correspondante. Pour rappel, cette matrice contient les hauteurs des points de la surface située en dessous de la surface à supporter. La surface d'appui appartient soit à la pièce, soit au plateau, soit aux deux et peut être discontinue. A partir de ces deux matrices, le logiciel de CAO génère des blocs de matière de section carrée. Si ces blocs appartiennent au pilier, alors le bloc est un volume vertical reliant la surface à supporter et la surface d'appui. Si le bloc appartient à la tête du pilier, alors la face du haut du bloc est générée grâce à la MSS. La face du bas est générée en fonction de la distance du bloc par rapport au centre du pilier et à l'angle α (Figure 95).

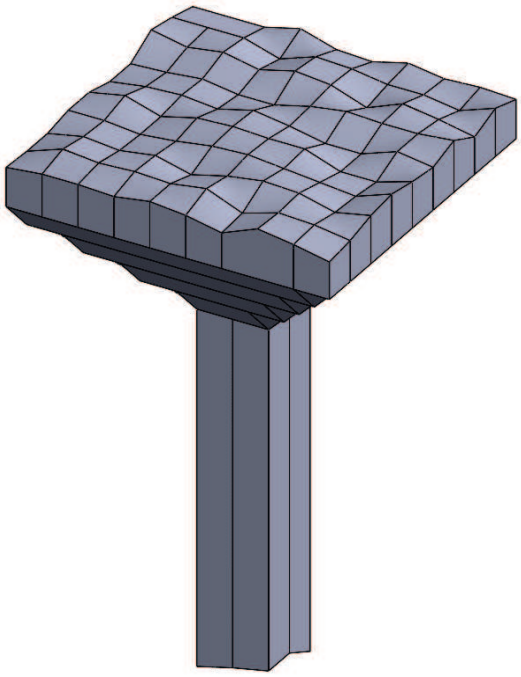


Figure 95 - Génération du modèle CAO d'une colonne à partir de sa MSS et de la matrice d'appui

4.6.b Application au cas d'étude

La MSS de chaque pilier est lue bloc par bloc par SolidWorks. Pour chaque bloc de couleur rose, une esquisse 3D est générée. Le projeté de cette esquisse dans le plan x-y est un carré dont la longueur de l'arête correspond à la résolution de notre grille, soit, dans le cas présent, 2mm.

Ensuite, chaque pilier est généré en suivant les explications précédentes. Tout bloc appartenant au pilier est un volume reliant la surface à supporter et la surface d'appui. Pour rappel, dans notre cas, la surface d'appui correspond au plateau. La hauteur de chaque point est donc égale à 0. Les blocs appartenant exclusivement à la tête de la colonne forment un cône de base carré et d'angle α.

Chaque colonne est ensuite enregistrée automatiquement dans un fichier séparé. Pour notre exemple, nous avons choisi de colorer les colonnes (Figure 96). La couleur sert uniquement d'aide visuelle et n'est pas intégrée lors de la fabrication de la pièce.

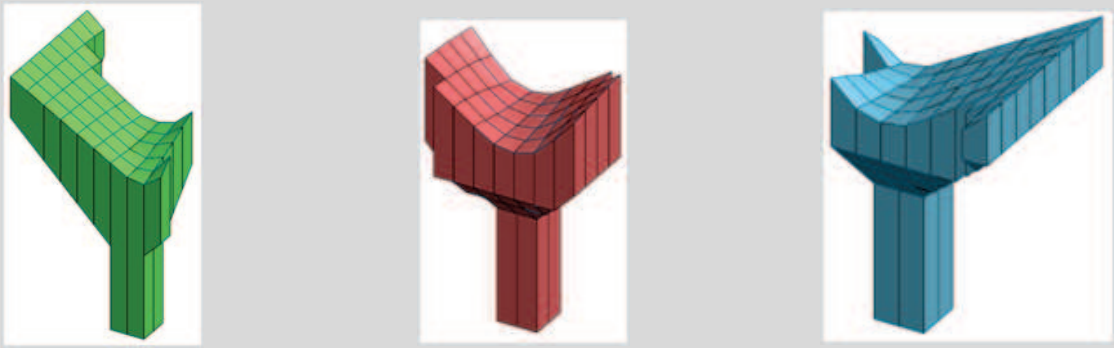


Figure 96 - Modèle CAO des colonnes obtenues à partir de la représentation sous forme matricielle

4.7 Intégration du support à la pièce

4.7.a Méthode d'intégration du support à la pièce

Une fois toutes les colonnes générées, celles-ci sont intégrées à la pièce à fabriquer par le biais d'un assemblage. Ceci permet de valider visuellement le positionnement du support et de vérifier si d'éventuelles erreurs ont été commises. De plus, le but de la méthodologie est d'apporter une aide à la conception. Si le concepteur le désire, il peut adapter le support proposé en modifiant les fichiers générés automatiquement.

L'assemblage des différentes colonnes se fait donc par correspondance de l'origine de chaque pièce.

4.7.b Application au cas d'étude

La dernière étape consiste à intégrer, pour validation, le support dans la pièce modélisée par le concepteur.

Dans un premier temps, nous avons assemblé les trois colonnes issues de notre analyse (Figure 97). On remarque bien une symétrie centrale de notre support, ce qui tend à montrer que notre analyse est pertinente par rapport à la topologie de la pièce et aux contraintes d'économie de matière, de coût et de temps.

Une fois les colonnes assemblées, nous les avons intégrées dans le modèle de notre pièce (Figure 98). On observe que le support présente ici quelques défauts et n'épouse pas parfaitement la surface de la pièce. Ceci est dû à la faible résolution de notre support. Idéalement, la résolution du support sera inférieure à 250 microns, ce qui permettra, lors de la fabrication, de gommer les défauts des modèles des colonnes par rapport au modèle tranché de la pièce. Malgré ces erreurs, la forme du support est une représentation discrète relativement fidèle de celle de la pièce et les dimensions de la surface à supporter sont respectées. Puisque le support et la pièce sont contenus dans un fichier assemblage, il est possible de réaliser deux exports de fichier au format .stl afin de bien dissocier les différents volumes et leur matériau associé lors de l'opération de tranchage.

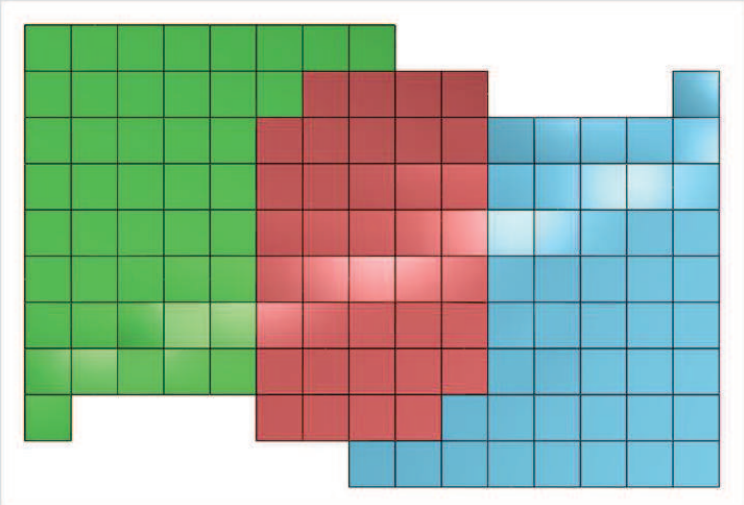


Figure 97 - Assemblage des trois colonnes, vue de dessus

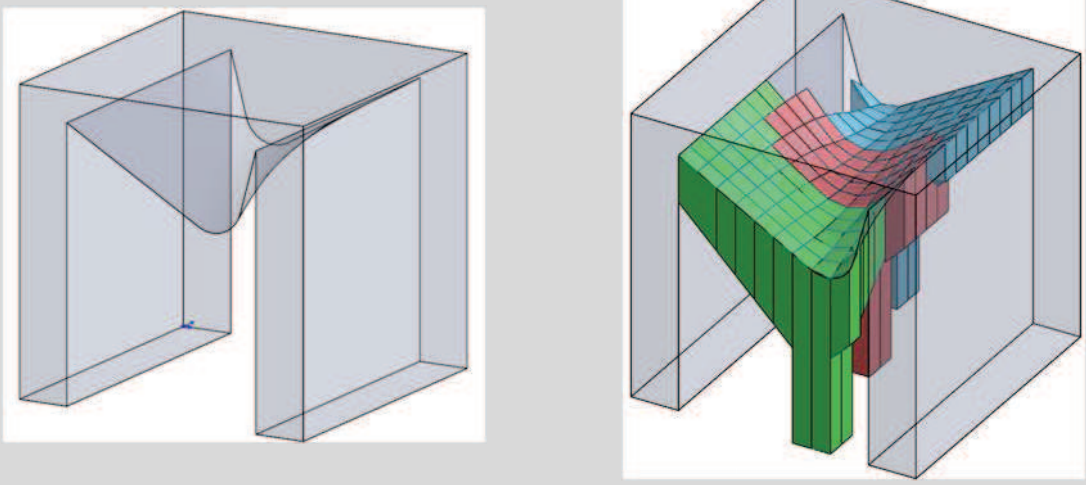


Figure 98 - Intégration du support dans le modèle CAO de la pièce

4.8 Analyse critique du support obtenu

4.8.a Modification éventuelle de la pièce

Dans le but de rendre notre méthode d'analyse plus pertinente, il est envisageable de réaliser plusieurs itérations de notre méthodologie pour différentes configurations de la pièce. De plus, il est également possible de renseigner si une surface doit ou non être en contact avec du support. Ceci permettrait d'effectuer une proposition d'orientation de la pièce dépendante d'une contrainte fixe (présence de support interdite) et modulable (minimisation de la quantité de support proposée).

Ainsi, à partir du résultat brut de l'optimisation topologique de notre méthodologie générale (Chapitre III4.5), une première analyse permettrait de déterminer les zones où le support est nécessaire et la quantité de support que cela demanderait. Le concepteur pourrait alors dégrader légèrement le résultat de l'optimisation topologique en ajoutant de la matière de manière à obtenir des surfaces respectant α. Ainsi, une seconde phase d'analyse fournirait une seconde proposition de support, acceptable ou non. Cela suppose que le concepteur puisse ajouter de la matière et donc alourdir sa pièce. Ce qui n'est pas le cas pour des pièces aéronautiques, par exemple.

4.8.b Application au cas d'étude

Pour valider notre méthodologie, nous avons analysé puis fabriqué notre pièce en utilisant une Makerbot Replicator 2X. Le tranchage de la pièce a été réalisé à l'aide du logiciel ReplicatorG. Le matériau utilisé pour la pièce est de l'ABS noir.

Dans un premier temps, nous avons fabriqué la pièce à l'aide d'un support généré automatiquement. Le support a également été fabriqué en ABS noir. Le volume estimé de support est de 27000 mm^3 pour un temps de fabrication de 67 minutes.

Dans un second temps, nous avons fabriqué une seconde pièce avec un support en ABS blanc afin de valider la fabrication de la pièce à l'aide d'un support sur mesure dans un second matériau. L'utilisation de l'ABS blanc apporte ici une aide purement visuelle. Le volume estimé de support est de 17575 mm^3 pour un temps de fabrication de 63 minutes.

Le gain en matière est donc de 35% et celui en temps est de 6%. Cependant, il est possible d'affiner le support de manière à augmenter ces gains. Le faible gain en temps de fabrication s'explique ici par la structure du support. Dans le cas d'un support généré automatiquement, le support est fabriqué entièrement de manière alvéolaire, y compris sa surface. Dans le cas d'un support optimisé, puisque le modèle est issu d'un logiciel de CAO, le logiciel de tranchage respecte obligatoire la surface de la géométrie. Ainsi, bien que le volume final de matière soit réduit, le temps de fabrication reste élevé à cause du respect de l'intégrité de la surface du support. Il serait donc intéressant d'étudier la faisabilité d'un support dont la structure globale serait alvéolaire mais dont la surface en contact avec celle de la pièce serait préservée.

Enfin, dans un dernier temps, nous avons fabriqué une troisième pièce dont le support a été réalisé en PVA. Bien que le temps de nettoyage de la pièce soit plus important, l'état de surface de la pièce est nettement amélioré par rapport à un support généré automatiquement. Cependant, cette solution convient mieux à des pièces de géométrie complexe dont l'accès au support n'est pas possible à l'aide d'outils standard.

Section 5 Synthèse

Nous avons exposé dans notre état de l'art qu'il existait diverses solutions pour intégrer le support à une pièce. Bien que toutes cherchent à diminuer la quantité de support consommée, elles présentent des limitations : rupture de chaîne numérique, simple diminution du support, pas de prise en compte de l'accessibilité... La solution que nous proposons s'adapte au mieux aux besoins du concepteur et du fabriquant en tirant profit des solutions existantes. Nous proposons donc une structure basique modulable et adaptable à tout type de pièce tout en tenant compte du retrait du support. Nous permettons également au concepteur de valider la génération du support tout au long de la CAO. Cependant, notre démarche comporte encore quelques limitations. Si la solution proposée par le logiciel MeshMixer ne convient pas au procédé FDM, leur structure est plus optimisée que celle que nous proposons. Nous pourrions par exemple évider la tête en générant des colonnes en structure d'arbre (Figure 99). Cependant, une telle géométrie est beaucoup plus complexe à mettre en œuvre.

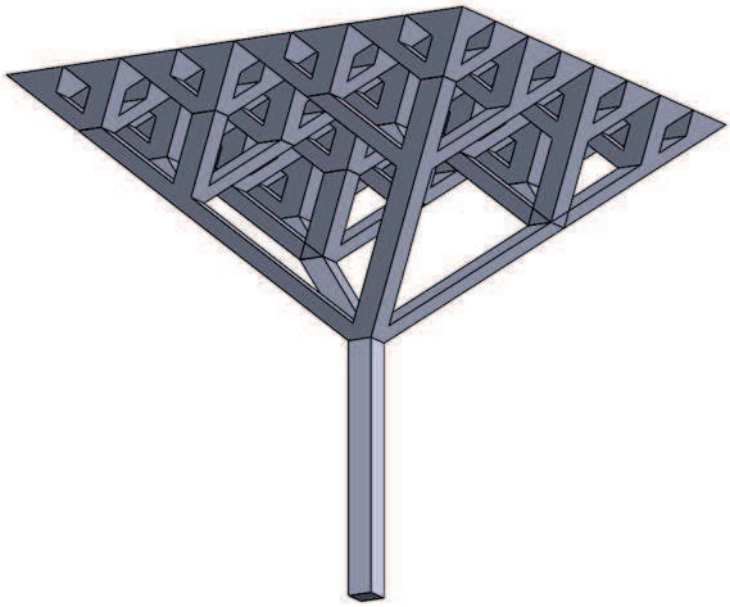


Figure 99 - Evidement de la tête d'une colonne, cas d'une surface plane à supporter

Les études réalisées pour valider notre méthodologie sont également limitée par le matériel à notre disposition et ne permettent pas actuellement une résolution plus fine que 250 microns. Or, certains procédés FDM parviennent à fabriquer des pièces avec une précision de 50 microns. Il est donc nécessaire d'améliorer le traitement de la partie analyse de notre méthodologie par le logiciel de CAO afin de s'adapter à la résolution de la machine. En effet, comme nous venons de le voir, la méthode que nous proposons permet d'obtenir un support optimisé permettant effectivement de réduire les coûts en temps de fabrication et en consommation de matière du support, bien qu'il soit possible d'encore améliorer ce gain avec un remplissage interne du volume du support en nid d'abeille, par exemple. Actuellement, plusieurs étapes doivent encore être réalisées manuellement. Dans l'idéal, et cela est possible, l'analyse de la pièce et la création du support devraient s'effectuer en un clic. En effet, nous partons de la géométrie initiale de la pièce pour arriver à la génération automatique de volume sans aucune rupture dans la chaîne numérique. Ainsi, les seules tâches à effectuer par le concepteur sont le placement de la pièce à étudier par rapport au repère CAO et le renseignement du seuil s pour le ratio entre le volume de support souhaité et le volume de support maximum. Toutes les autres étapes étant basées sur de l'analyse de matrice et de la comparaison de valeurs, celles-ci sont automatisables.

Chapitre V Parachèvement à l'acétone

Dans les parties précédentes, nous avons développé une méthodologie de conception pour la réalisation de pièces en FA. Pour ceci, nous avons illustré notre méthodologie à l'aide d'une pièce conçue en ULTEM. Nous avons également proposé une méthode de génération de support en matériaux solubles dans le cas de pièces réalisées en dépôt de matière permettant de réduire le temps de fabrication et la quantité de matière utilisée ainsi que de permettre le nettoyage des formes internes complexes. Nous avons illustré cette méthode par l'analyse d'une pièce conçue en ABS et dont le support a été fabriqué en PVA.

Or, nous avons vu que la réalisation d'une pièce en FA générait des défauts de surface dépendamment de son orientation. Afin de proposer une méthodologie optimisée, nous souhaitons donc valider la possibilité de parachever par un procédé de post-traitement les surfaces de pièces fabriquées en FA. Afin d'apporter une cohérence avec les exemples précédents, nous étudierons ici des pièces réalisées en ABS via le procédé FDM. Ainsi, même si notre démarche n'explore qu'une fraction des procédés de FA, nous souhaitons proposer des pistes de réflexion pour les autres types de procédés et les autres matériaux existants.

Dans un premier temps, nous discuterons des procédés de parachèvement/traitement de surface existant et nous verrons en quoi l'attaque par conversion chimique de l'ABS par attaque chimique à l'acétone est le procédé le plus pertinent dans notre cas.

Dans un second temps, nous réaliserons un essai visant à déterminer les paramètres ayant un rôle prédominant pour ce type de procédé. Nous analyserons ici de manière qualitative l'état de surface, les déformations globales de la géométrie de la pièce et les modifications éventuelles des caractéristiques mécaniques.

Dans un troisième temps, nous nous baserons sur les résultats de ce premier essai pour étudier plus finement l'état de surface de la pièce. Pour ceci, nous réaliserons un plan d'expérience dans le but de construire un modèle prédictif du procédé en fonction des paramètres précédents.

Enfin, nous réaliserons un second plan d'expérience visant à déterminer les caractéristiques mécaniques de la pièce une fois l'attaque par conversion chimique effectuée. En effet, puisque notre méthodologie intègre les contraintes mécaniques pour piloter la fabriquer de la pièce, celle-ci doit toujours répondre au cahier des charges, même après un parachèvement.

Les résultats obtenus à l'issue de ces expérimentations ont pour but de compléter les connaissances métiers relatives au procédé utilisées lors du déroulement de la méthodologie de conception décrite au chapitre III de ce mémoire.

Section 1 Choix du procédé

Comme nous l'avons vu au Chapitre III3.5.c, toute pièce réalisée en FA présente un défaut d'état de surface lié à son orientation et à la résolution de la machine utilisée. Le pire cas se produit pour des surfaces planes proches de l'horizontale.

Il existe différents procédés de parachèvement et de traitement de surface pour les pièces manufacturées[38]. Cependant, la plupart de ces procédés sont mécaniques et davantage adaptés aux pièces métalliques (meulage, grenaillage, ébavurage, surfaçage,...). De plus, ces procédés imposent notamment des surépaisseurs de matière et peuvent engendrer des déformations locales dues à l'effort de l'outil de coupe. Ils présentent également l'inconvénient majeur de ne pouvoir être appliqués qu'aux surfaces extérieures des pièces, ou tout du moins accessibles par l'outil. Or, l'intérêt majeur de la fabrication additive est de permettre la fabrication de pièces aux géométries internes complexes. Dans le cas d'écoulements fluides, il est souvent nécessaire d'avoir un état de surface le plus fin possible afin de limiter les pertes de charge. Il semble donc pertinent de trouver un procédé permettant de traiter toutes les surfaces des pièces réalisées par dépôt de matière. Nous souhaitons également que ce procédé puisse être mis en place à la fois pour des machines professionnelles et pour des machines domestiques, soit pour des raisons mécaniques, soit pour des raisons esthétiques.

Il existe également trois procédés de traitement de surface ne faisant pas appel à un outil mécanique. Ces procédés sont la transformation structurale par voie thermique, le dépôt d'un revêtement par voie humide ou par voie sèche et la conversion par attaque chimique.

La transformation structurale par voie thermique n'est cependant pas adaptée à notre besoin. En effet, ce procédé consiste à chauffer la pièce afin de modifier les caractéristiques de sa surface, dont la tenue mécanique. Or l'ABS a une température de fusion d'environ 200°C et est un matériau thermoplastique, ce procédé risque donc d'apporter des déformations globales à la pièce. De plus, dans le cas présent, le but est d'améliorer l'état de surface et non d'améliorer la tenue mécanique de la pièce.

Le dépôt de revêtement semble plus pertinent à mettre en œuvre. En effet, il s'agit ici de placer la pièce dans une enceinte à l'intérieur de laquelle toutes les surfaces de la pièce seront en contact avec un matériau de dépôt présent sous forme liquide ou gazeux. Les techniques de dépôt par voie humide les plus courantes sont l'électrodéposition, qui consiste à déposer un film métallique sur la surface d'un autre matériau, généralement métallique, en plongeant celui-ci dans une solution saline ou encore le dépôt chimique dynamique qui consiste à projeter un film métallique sur une surface quelconque en combinant une solution saline et une solution réductrice. Les techniques par voie sèche les plus utilisées sont la projection thermique qui consiste à projeter des gouttelettes de matière en fusion sur la pièce à recouvrir ou le dépôt chimique en phase gazeuse qui consiste à combiner, sous l'effet de la chaleur, des particules en phase gazeuse avec la surface de la pièce. Cependant, ce type de procédé présente plusieurs inconvénients. Tout d'abord, l'épaisseur de la couche de matière déposée, de l'ordre du micromètre, n'apporte aucune garantie sur le respect de l'état de surface final. Deuxièmement, ces procédés sont basés sur une interaction thermique ou électrique avec la pièce, ce qui n'est pas compatible avec l'ABS (il s'agit d'un matériau non-conducteur et ayant une température de fusion aux alentours de 210°) Enfin, ces procédés imposent d'ajouter un second matériau à la pièce, ce qui réduit donc les possibilités de recyclage de la pièce. De plus, pour des pièces aux géométries internes complexes, il est difficile de contrôler la quantité de matière déposée.

[38] http://fr.wikipedia.org/wiki/Traitement_de_surface

La conversion par attaque chimique correspond à une modification de la surface de la pièce par l'action d'un agent chimique présent sous forme liquide ou gazeuse. Ce type de traitement, dans des conditions contrôlées, présente l'avantage de réaliser une attaque homogène de la surface de la pièce et de conserver le matériau initialement choisi pour la pièce. De plus, la géométrie de la pièce n'impacte pas sur le procédé. Or, il a été montré que l'acétone était un agent chimique qui, à faible concentration, permet une dissolution partielle de la surface d'une pièce en ABS. De plus, après évaporation de l'acétone, l'ABS reprend une phase solide[39]. Ainsi, il serait donc possible de réaliser un traitement de surface d'une pièce en ABS sans biais mécanique, thermique ou électrique, ni sans ajout d'un autre matériau tout en ayant l'assurance d'une action homogène.

C'est donc ce dernier type de traitement que nous choisirons d'étudier par la suite.

[39] http://makezine.com/2014/09/24/smoothing-out-your-3d-prints-with-acetone-vapor/

Section 2 Essais préliminaires

2.1 Etat de surface

Dans un premier temps, nous souhaitons valider le procédé de conversion par attaque chimique. Le principe est le suivant : en conservant l'orientation machine de la pièce, l'acétone vient dissoudre la surface de la pièce. Le surplus de matière de chaque couche s'écoule grâce à la gravité et vient combler les creux de la surface (Figure 100). L'acétone est ensuite évaporée afin de rendre sa rigidité à la surface rectifiée.

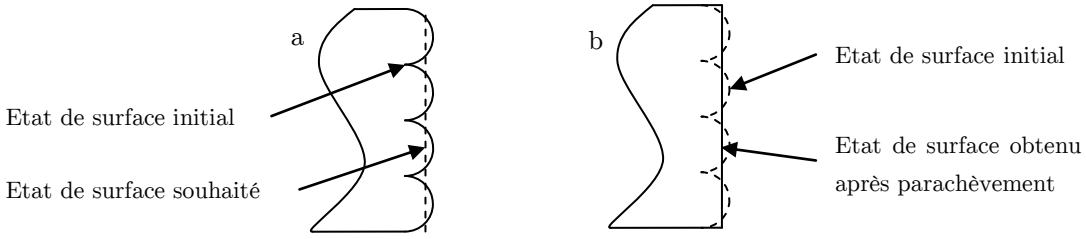


Figure 100 - Principe de traitement de surface d'une pièce en ABS par de l'acétone

Cependant, il est nécessaire de maîtriser parfaitement les paramètres de ce procédé. En effet, si l'acétone agit trop longuement, il y a un risque de déformation, voire de destruction, de la pièce. Nous avons donc choisi de mener un essai préliminaire permettant de déterminer une plage de temps d'exposition et de température. Nous utiliserons de l'acétone sous phase gazeuse afin de limiter sa concentration et d'assurer l'homogénéité du solvant sur toute la pièce. En effet, une application manuelle de l'acétone n'assurerait pas une quantité égale de solvant sur toute la surface et, dans le cas de pièces aux géométries complexes, certaines zones pourraient être inaccessibles à l'opérateur.

Pour ce test préliminaire, la pièce sera composée de différents éléments permettant de visualiser les effets de l'acétone (Figure 101) :

a) Deux cylindres verticaux dont l'un sera percé aux extrémités afin d'observer les effets de l'acétone sur la structure interne de la pièce ;
b) Deux cylindres horizontaux dont l'un sera percé aux extrémités afin d'observer les effets de l'acétone sur la structure interne de la pièce ;
c) Un bloc parallélépipédique permettant d'observer à l'œil nu une déformation pour des trous cylindriques débouchant verticaux et horizontaux, un trou cylindrique horizontal borgne, un trou parallélépipédique horizontal borgne et un trou prismatique horizontal borgne proposant des inclinaisons à 30°, 45° et 60° avec présence de matière au dessus ou en dessous des surfaces
d) Une sphère ;
e) Une surface réglée de type hyperboloïde parabolique avec une inclinaison de 0° à 21° de manière à obtenir une surface en escalier.

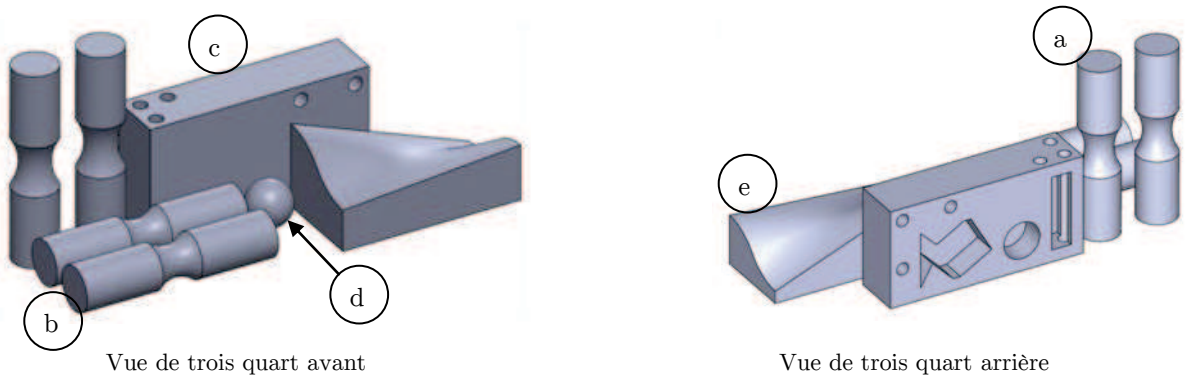


Figure 101 - Pièce de test pour essai préliminaire d'attaque à l'acétone

Les différents éléments de cette pièce ont chacun un rôle particulier pour l'observation qualitative des effets de l'acétone. Nous avons essayé de réunir ici la plupart des géométries et des cas de figures qui peuvent se présenter pour de vraies pièces industrielles : cylindres, plans inclinés selon différents angles, sphère, surface gauche, perçage débouchant ou non, poche, surface gauche,... Le but est ici d'observer un maximum de configurations possibles. Le rôle des cylindres est à la fois de valider l'effet de l'acétone sur la structure interne de la pièce mais également de visualiser les effets sur une même pièce imprimée dans deux directions différentes. La géométrie de la surface réglée a été pensée de manière à obtenir des effets d'escalier irréguliers. L'angle de 21° correspond à une inclinaison pour laquelle l'effet d'escalier commence à s'estomper.

Pour ce premier test, nous disposons d'une cuve à bain-marie ainsi que d'une cuve en verre (Figure 102). La cuve en verre sera lestée et déposée dans le bain-marie. Elle contiendra 250 ml d'acétone pour assurer une vapeur homogène autour et à l'intérieur des éléments. Cette quantité d'acétone compense largement les pertes par évaporation et nous permettra de déterminer la quantité d'acétone évaporée. La pièce sera déposée sur une plaque percée recouverte de téflon et maintenue au dessus de l'acétone liquide. Le téflon ne réagissant pas à l'acétone et étant un matériau antiadhésif, il permet un retrait de la pièce sans risque d'accroche. Les perçages permettent une meilleure répartition de l'acétone dans la cuve.

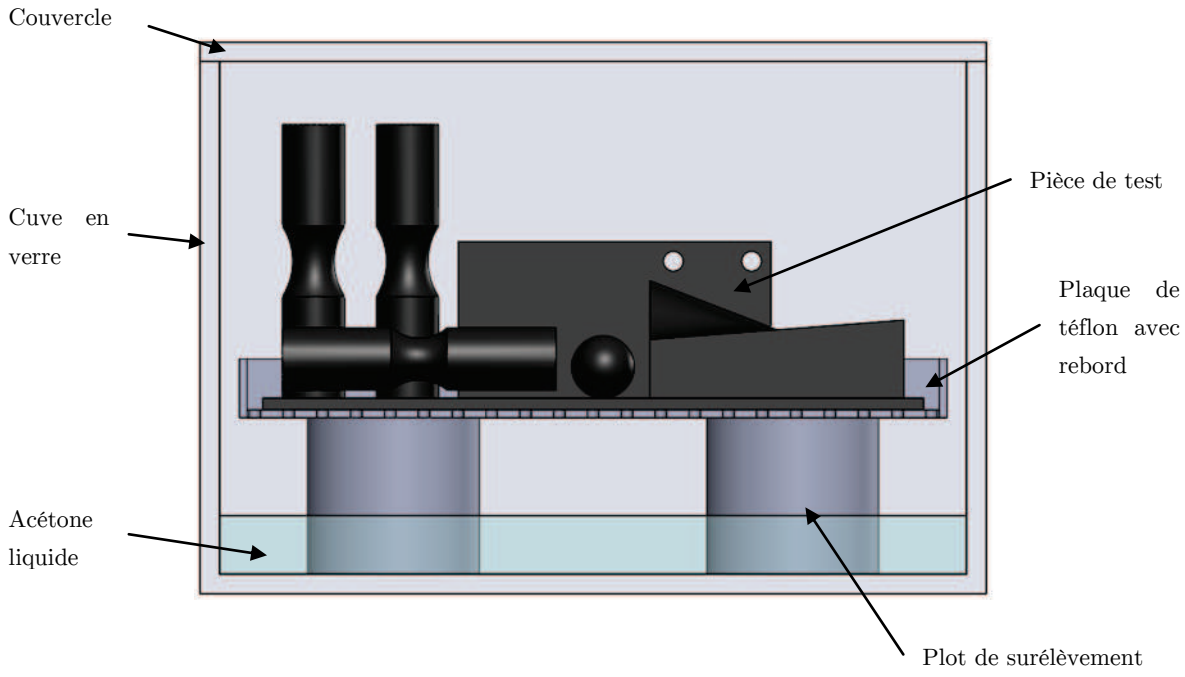


Figure 102 - Mise en place du matériel pour l'essai préliminaire d'attaque à l'acétone

La température d'ébullition de l'acétone est de 56°C à pression ambiante[40]. L'acétone est également un solvant volatile à l'air ambiant. Etant donné que nous souhaitons simplement avoir une attaque de la pièce par des vapeurs d'acétone, il n'est donc pas nécessaire d'atteindre la température d'ébullition de celui-ci. De plus, l'acétone est un produit inflammable et explosif. Pour assurer la sécurité de l'expérimentation, nous prendrons une température de chauffe inférieure à 56°C. Nous laisserons également une légère ouverture dans l'enceinte de manière à limiter la pression dans la cuve.

Pour cette première expérimentation, nous avons donc choisi une température de contrôle de 25°C (température ambiante) pour une durée d'exposition de 24H00.

Dans un premier temps, nous allons exposer les effets de l'acétone sur les éléments a, b, c et d de la pièce (Figure 103).

Figure 103 - Résultat de l'essai préliminaire d'attaque à l'acétone : exposition de 24H à 25°C

Tout d'abord, nous pouvons remarquer que l'acétone agit effectivement sur les surfaces de la pièce. Ce procédé peut donc permettre un traitement de surface tel que nous l'avons décrit précédemment. Cependant, lors d'une surexposition à l'acétone, la géométrie de la pièce peut être modifiée, ce qui n'est pas souhaitable dans notre cas. Pour cette étude préliminaire, ceci est dû au fait que le temps d'exposition n'était pas contrôlé. Dans le cas de pièces présentant des porosités, l'acétone dissout effectivement la structure interne des pièces. Ceci est visible sur le cylindre vertical percé ainsi que sur les cylindres horizontaux présentant des défauts d'impression sur la surface en contact avec le support. Un corollaire de l'observation précédente est que les pièces fabriquées par le procédé FDM sont donc étanches. Ainsi, pour un temps d'exposition plus court, il est possible de ne traiter que la surface extérieure.

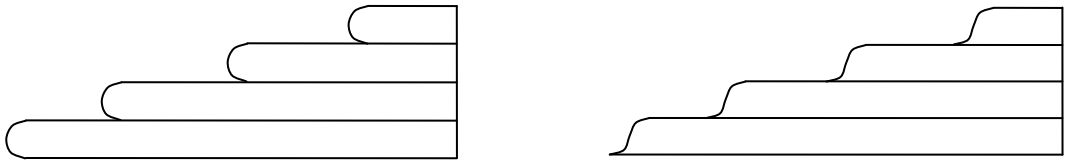
L'acétone semble également générer un effet de rectification de la surface indépendamment de l'orientation de celle-ci. Enfin, nous observons que le support non retiré fusionne avec la pièce et se densifie, or cet effet n'est pas désiré. En effet, le rôle du support est uniquement d'aider à la fabrication de la pièce. Si celui-ci fusionne avec la pièce, la géométrie obtenue n'est plus conforme à celle imposée par le cahier des charges. Il est donc nécessaire d'effectuer un retrait intégral du support avant le traitement de la pièce.

[40] http://fr.wikipedia.org/wiki/Ac%C3%A9tone

Les surfaces présentant qualitativement le meilleur état de surface sont les surfaces horizontales et verticales. En revanche, l'acétone ne permet pas de rectifier une surface présentant un effet d'escalier prononcé (Figure 104).

Figure 104 - Effets de l'acétone sur une surface présentant un effet d'escalier

Ainsi, sur la pièce *e*, on remarque que l'effet d'escalier est partiellement gommé par l'action de l'acétone sur la pièce. Cependant, plus l'inclinaison de la surface est proche de l'horizontale, plus l'effet d'escalier persiste. La seule déduction possible est que ce défaut provient du principe d'écoulement de matière par gravité de notre procédé. Lorsque l'inclinaison de la pièce est trop faible, le bord de chaque marche est lissé, mais la surface conserve un aspect de génération par palier (Figure 105).



Pièce avec effet d'escalier avant effet de l'acétone

Pièce avec effet d'escalier après effet de l'acétone

Figure 105 - Difficulté de la rectification de l'effet d'escalier

Cependant, les surfaces réputées planes avant l'expérimentation présentent des défauts de planéité observables à l'œil nu après le traitement de surface.

Cette première approche nous a permis de déterminer certaines hypothèses quant aux paramètres qui peuvent influer sur l'état de surface final de la pièce :

- La température de l'acétone : nous supposons qu'en chauffant l'acétone, il est possible d'accélérer le processus ;
- Le temps d'exposition à l'acétone : nous supposons que la durée d'exposition semble conditionner l'effet de l'attaque ;
- L'épaisseur des surfaces : nous supposons qu'en augmentant l'épaisseur des parois, il est possible de limiter les déformations globales de la pièce ;
- L'orientation des surfaces : le procédé dépendant de la gravité, nous supposons que l'orientation de la pièce conditionne l'efficacité du procédé.

Il est donc nécessaire de réaliser un plan d'expérimentation permettant de valider si le procédé permet d'effectuer un traitement de surface sans déformation de la pièce et si les hypothèses que nous venons de présentées sont valides. Dans le cas d'une réponse positive, ce plan nous permettra de déterminer la valeur optimale des paramètres précédents.

2.2 Essai de traction

Un second champ d'étude vise à déterminer si l'acétone modifie qualitativement les propriétés mécaniques de l'ABS. Pour ceci, nous souhaitons intégrer à notre plan d'expérience des essais de traction sur éprouvette. Les résultats de ces essais seront analysés séparément.

Afin d'observer un quelconque effet de l'acétone sur les caractéristiques mécaniques de la pièce, cet essai sera réalisé en deux temps. Tout d'abord, nous fabriquerons un premier lot d'éprouvettes « témoins » qui ne seront pas soumises à l'action de l'acétone. Ces éprouvettes seront réalisées selon deux orientations. En effet, lors de la fabrication d'une pièce par FDM, le polymère est déposé suivant des couches successives. De manière générale, les fibres de chaque couche sont orientées perpendiculairement aux fibres de la couche précédente. En première approximation, nous pouvons donc supposer que la pièce possède un comportement orthotrope. Ceci nous permet donc de réaliser deux lots d'éprouvettes. Le premier lot d'éprouvettes sera fabriqué horizontalement, le second lot sera fabriqué verticalement. Cela nous permettra, par combinaison des résultats de ce test de traction, de prédire le comportement d'une éprouvette fabriquée dans une direction intermédiaire.

Bien que nos essais soient prioritairement qualitatifs, nous espérons que le comportement orthotrope des éprouvettes sera conservé après action de l'acétone. Pour ceci, nous fabriquerons un second lot d'éprouvettes qui seront soumises à l'acétone durant le plan d'expérience. Chaque éprouvette subira donc une exposition différente des autres. Ce second lot sera ensuite traité pour définir un modèle prédictif quantitatif du comportement mécanique en traction de l'ABS après action de l'acétone.

Les données standard pour les éprouvettes de tractions sont fournies pour des matériaux homogènes et principalement métalliques. Dans notre cas, nous réaliserons donc des éprouvettes de longueur utile 40 mm. Pour nos tests, chaque éprouvette mesure 3mm d'épaisseur et la longueur de zone d'épaulement est de 25 mm (Figure 106).

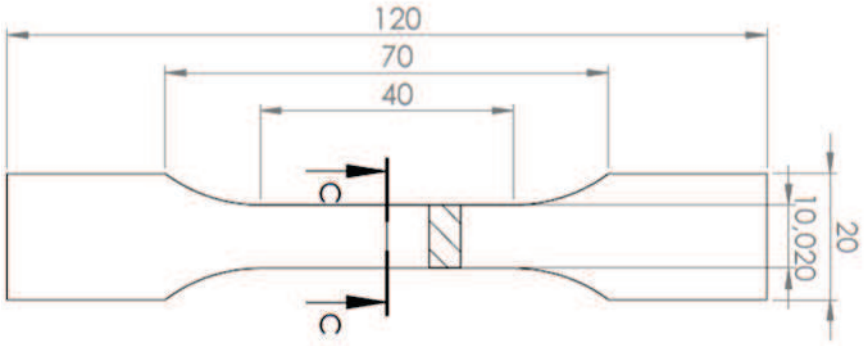


Figure 106 - Eprouvette standard utilisée pour les essais de traction préliminaires

Pour cet essai, nous avons fabriqué cinq éprouvettes horizontales (essais 1à 5) et cinq éprouvettes verticales (essais 6 à 10). Les résulats de ces essais de traction sont fournis sur la Figure 107. On remarque tout d'abord que les courbes obtenues correpondent effectivement à un essai de traction standard. On remarque également que le comportement des éprouvettes est conforme à nos attentes. En effet, l'orientation des éprouvettes impacte sur leur résistance à la traction : les éprouvettes imprimées horizontalement ont un plus grand Rm que celles imprimées verticalement. Cette observation est cohérente avec l'orientation des fibres. On observe également que les éprouvettes imprimées verticalement ont un comportement proche de celui d'éprouvettes fabriquées en ABS injecté (Persson, 2004), ce qui est rassurant vis-à-vis du matériau utilisé et de l'orientation des fibres.

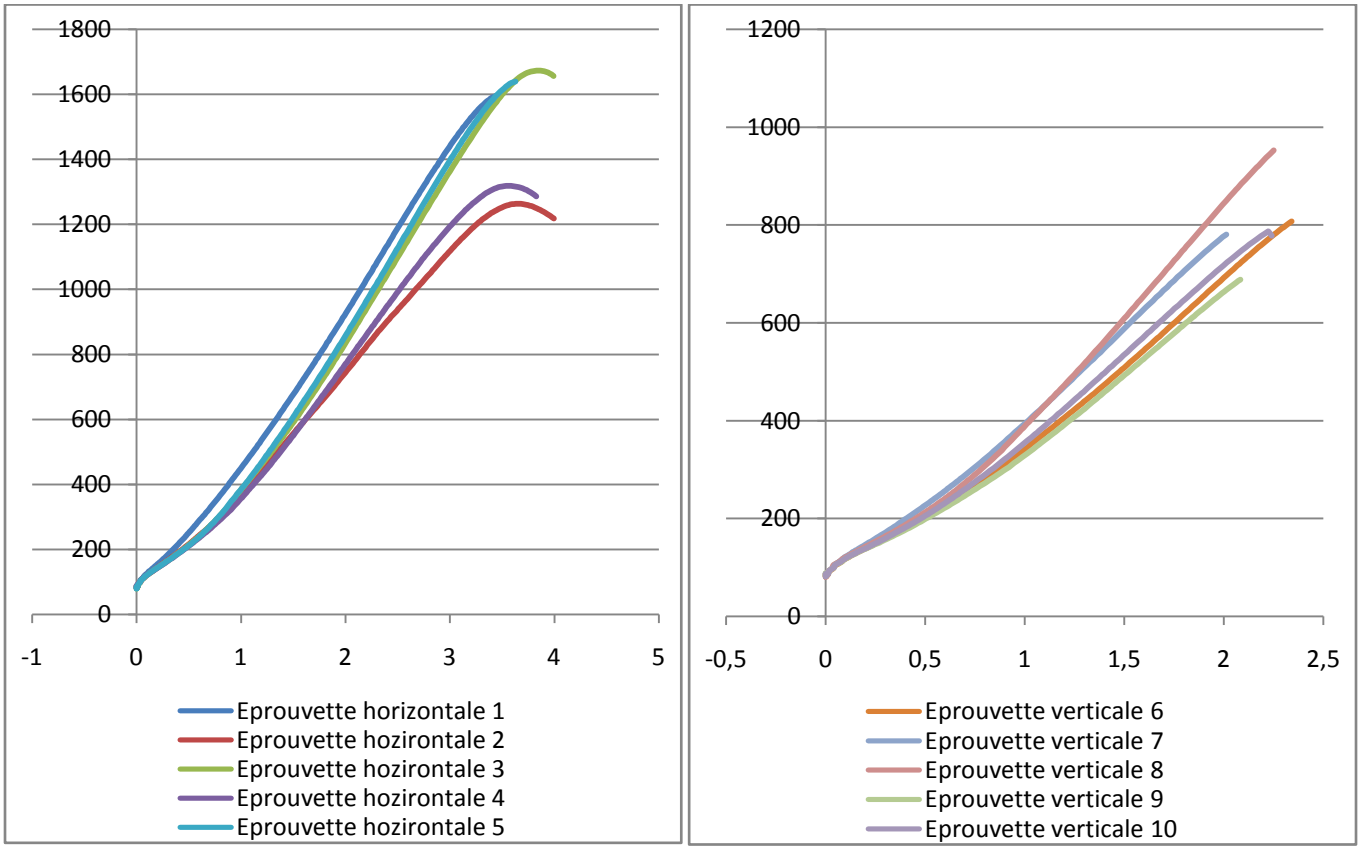


Figure 107 – Essais de traction préliminaires : effort mesuré (N) en fonction de l'allongement (%)

Grâce à ces essais préliminaires, nous avons pu déterminer un profil de traction pour des éprouvettes standard non soumises à l'acétone. La seconde étape de cette expérimentation consistera à fabriquer un couple d'éprouvettes pour chaque essai du plan d'expérience détaillé ci-après, de soumettre ces éprouvettes à l'action de l'acétone puis d'effectuer un essai de traction sur chaque éprouvette. Les résultats ainsi obtenus nous permettront donc de déterminer si l'acétone agit sur la résistance à la traction de pièces fabriquées en ABS via FDM, si cette action renforce ou détériore la tenue mécanique de la pièce et le nouveau Rm.

Section 3 Plan d'expérience pour l'état de surface

3.1 Définition des critères

Pour notre plan d'expérience, nous considèrerons le temps d'exposition à l'acétone, la température de l'enceinte, l'épaisseur des parois et la l'inclinaison de la surface. L'épaisseur des parois sera donnée en nombre de fibres. L'inclinaison des surfaces est donnée en degrés par rapport à l'horizontale. Ces facteurs ont été choisis d'après les essais préliminaires réalisés sur la pièce de test.

Le but de ce plan d'expérience est d'observer si l'attaque à l'acétone permet un lissage global des surfaces exposées, mais pas nécessairement une planéité de la surface. Nous souhaitons donc obtenir une valeur globale estimative du lissage de la surface. Pour chaque essai, nous mesurerons ainsi le *Ra* de la surface rectifiée. En effet, le *Ra* correspond à la moyenne arithmétique des distances entre les pics et les creux successifs de la surface et englobe à la fois les informations du *Rt* (valeur crête à crête max) et du *Rp* (crête max).

Toutes les pièces utilisées pour ce plan d'expérience seront fabriquées en ABS noir, ce qui correspond à la teinte naturelle de ce polymère. Bien qu'il existe d'autres teintes pour l'ABS utilisé sur une machine FDM, nous ne vérifierons donc pas si ce facteur influe sur les réponses observées.

3.2 Table du plan d'expérience

Pour ce plan d'expérience, nous nous baserons sur une table de Doehlert (Tableau 3). Ce choix est basé sur le nombre de facteurs à étudier et sur la possibilité de mettre en place les différents niveaux de chacun de ces facteurs.

N° Expé	Température (°C)	Temps exposition (min)	Angle inclinaison (°)	Nombre de parois
1	43,00	240,00	45,00	6,00
2	23,00	240,00	45,00	6,00
3	38,00	395,89	45,00	6,00
4	28,00	84,11	45,00	6,00
5	38,00	84,11	45,00	6,00
6	28,00	395,89	45,00	6,00
7	38,00	291,96	81,74	6,00
8	28,00	188,04	8,26	6,00
9	38,00	188,04	8,26	6,00
10	33,00	343,92	8,26	6,00
11	28,00	291,96	81,74	6,00
12	33,00	136,08	81,74	6,00
13	38,00	291,96	54,19	9,95
14	28,00	188,04	35,81	2,05
15	38,00	188,04	35,81	2,05
16	33,00	343,92	35,81	2,05
17	33,00	240,00	72,56	2,05
18	28,00	291,96	54,19	9,95
19	33,00	136,08	54,19	9,95
20	33,00	240,00	17,44	9,95
21	33,00	240,00	45,00	6,00

Tableau 3 - Plan d'expérience pour le traitement d'une pièce en ABS par l'acétone

En fonction de la plage de valeurs à étudier, les niveaux de chaque critère sont imposés par le plan d'expérience. Nous avons donc affecté les valeurs les plus complexes aux critères les plus simples à piloter, soit le temps d'exposition et l'inclinaison de la surface à étudier.

Afin de valider notre plan d'expérience, la dernière ligne du plan sera répétée 4 fois. Cette ligne correspond au centre de notre plan. Ceci nous permettra de déterminer la cohérence de nos mesures.

3.3 Définition de la pièce

La pièce que nous utiliserons pour ce plan d'expérience sera la même pour chaque test. Elle est composée de sept plans inclinés conformément au plan d'expérience (Figure 108). Le *Ra* de chaque surface à mesurer sera déterminé à l'aide d'un rugosimètre électromécanique. La forme de la pièce permet son positionnement et son retrait de la cuve servant à l'exposition à l'acétone sans risque de modification de l'état de surface.

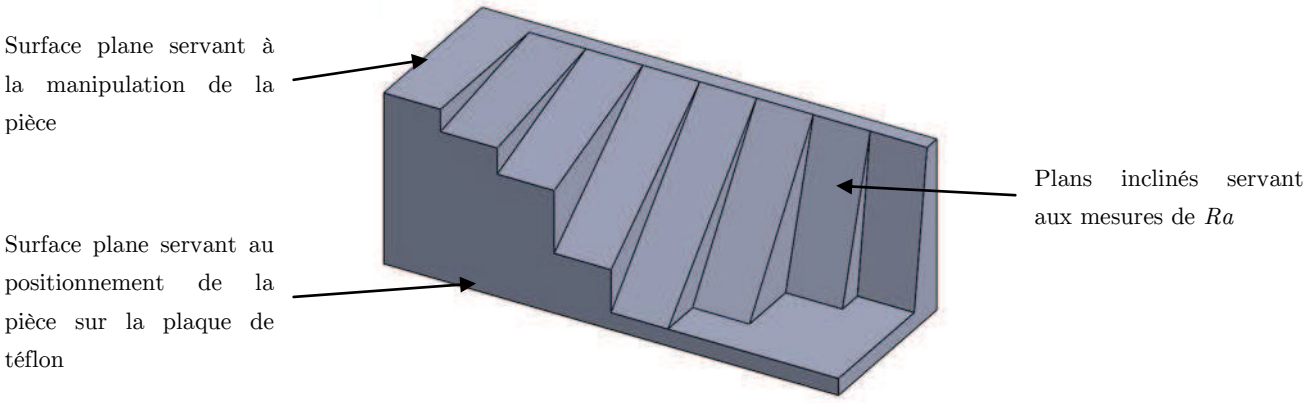


Figure 108 - Pièce générique utilisée pour le plan d'expérience

3.4 Résultats obtenus

Les résultats obtenus pour ce plan d'expérience sont donnés dans le tableau suivant (Tableau 4).

N° Expé	Température (°C)	Temps exposition (min)	Angle inclinaison (°)	Nombre de parois	Ra (Mpa)
1	43,00	240,00	45,00	6,00	5,44
2	23,00	240,00	45,00	6,00	5,23
3	38,00	395,89	45,00	6,00	5,70
4	28,00	84,11	45,00	6,00	6,65
5	38,00	84,11	45,00	6,00	8,28
6	28,00	395,89	45,00	6,00	5,13
7	38,00	291,96	81,74	6,00	7,44
8	28,00	188,04	8,26	6,00	58,29
9	38,00	188,04	8,26	6,00	53,14
10	33,00	343,92	8,26	6,00	52,77
11	28,00	291,96	81,74	6,00	9,48
12	33,00	136,08	81,74	6,00	12,76
13	38,00	291,96	54,19	9,95	5,65
14	28,00	188,04	35,81	2,05	9,12
15	38,00	188,04	35,81	2,05	8,59
16	33,00	343,92	35,81	2,05	8,73
17	33,00	240,00	72,56	2,05	5,82
18	28,00	291,96	54,19	9,95	8,00
19	33,00	136,08	54,19	9,95	6,52
20	33,00	240,00	17,44	9,95	48,74
21	33,00	240,00	45,00	6,00	7,38
22	33,00	240,00	45,00	6,00	7,37
23	33,00	240,00	45,00	6,00	7,60
24	33,00	240,00	45,00	6,00	7,42
25	33,00	240,00	45,00	6,00	7,36

Tableau 4 - Mesures de *Ra* effectuées en accord avec le plan d'expérience

3.5 Analyse

Les résultats obtenus ont été analysés à l'aide du logiciel Nemrodw (Tableau 5). La valeur estimée des coefficients est calculée par la méthode des moindres carrés à partir des résultats mesurés. Le logiciel nous fournit également la valeur du facteur d'inflation associé à chaque coefficient. Puisque notre plan d'expérience intègre un point test

(répétition de la ligne 21 de la matrice d'expérience), nous avons également accès à l'écart-type du coefficient, à la valeur du t. exp. associée ainsi qu'au résultat du test de significativité. C'est cette dernière valeur qui nous intéresse. En effet, le test de significativité permet de valider la fiabilité du modèle. La fiabilité est proportionnelle au nombre d'astérisques. On remarque que le résultat du test de significativité de chaque coefficient est inférieur à 2,75. Ceci nous permet d'avoir une confiance à plus de 97 % dans le modèle proposé par le logiciel.

Nom	Coefficient	F. Inflation	Ecart-Type	t. exp.	Confiance (%)	Singnificativité
b0	7,426		0,044676616	166,22	>99,99	***
b1	-0,745	1	0,044676616	-16,38	>99,99	***
b2	-1,526	1	0,044676379	-34,16	>99,99	***
b3	-27,48	1	0,044676538	-615,08	>99,99	***
b4	5,795	1	0,044676583	129,71	>99,99	***
b1-1	-2,091	1,22	0,083582295	-25,02	>99,99	***
b2-2	-0,618	1,22	0,083581408	-7,39	99,821	***
b3-3	38,008	1,21	0,078448902	484,49	>99,99	***
b4-4	1,293	1,17	0,074087776	17,45	>99,99	***
b1-2	-0,612	1,22	0,11535391	-5,31	99,393	***
b1-3	2,121	1,18	0,12896989	16,44	>99,99	***
b2-3	-0,437	1,18	0,12896891	-3,39	97,25	*
b1-4	-1,475	1,12	0,13402971	-11,01	99,961	***
b2-4	0,965	1,12	0,13402883	7,2	99,803	**
b3-4	-9,901	1,12	0,13403071	-73,87	>99,99	***

t.exp est la valeur des variables déterminées par le test de Student ; *** correspond à $0{,}0001 < p < 0{,}001$; ** correspond à $0{,}001 < p < 0{,}01$; * correspond à $0{,}01 < p < 0{,}05$

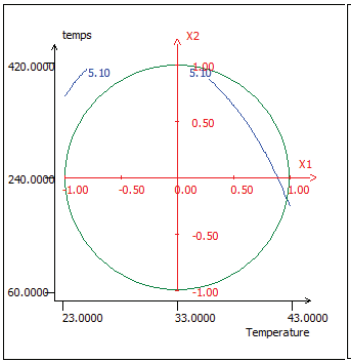
Tableau 5 – Estimation des coefficients du plan d'expérience

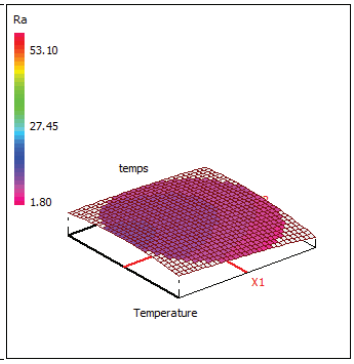
De plus, l'analyse de la variance du modèle nous indique que celui-ci est cohérent par rapport aux mesures renseignées (Tableau 6). On ne retient ici que les résultats des tests de significativité. Celui de la régression permet de s'assurer que la surface de réponse calculée ne s'éloigne pas trop des points de mesure. Celui de la validité permet de s'assurer que la variance expérimentale est cohérente à la variance du modèle.

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré Moyen	Rapport	Significativité
Régression	7,14E+03	14	5,10E+02	51110,5358	<0,01 ***
Résidus	2,36E+01	10	2,36E+00		
Validité	2,35E+01	6	3,92E+00	392,9665	<0,01 ***
Erreur	3,99E-02	4	9,98E-03		
Total	7,16E+03	24			

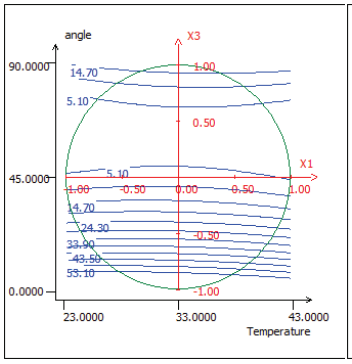
Tableau 6 – Tableau d'analyse de la variance du modèle de Ra

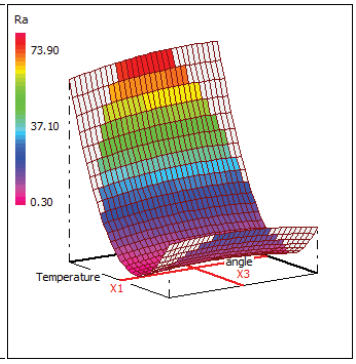
Grâce à ces résultats, nous avons pu reconstruire les différentes surfaces de réponse de notre plan d'expérience (Figure 109). Pour chaque surface de réponse, deux paramètres sont étudiés afin de fournir une visualisation en deux dimensions (gauche) et en trois dimensions (droite) des courbes de niveaux du *Ra*. Les deux paramètres restant sont fixés à la valeur médiane du plan d'expérience : 45° pour l'angle d'inclinaison, 33°c pour la température, 240 minutes pour le temps d'exposition et 6 couches de matières pour l'épaisseur de la pièce. Ces courbes nous présentent donc à la fois l'importance du rôle des facteurs étudiés mais également les valeurs de ces facteurs pour atteindre un *Ra* souhaité.



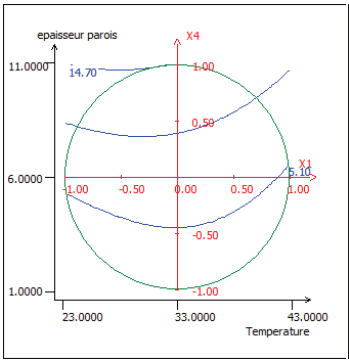


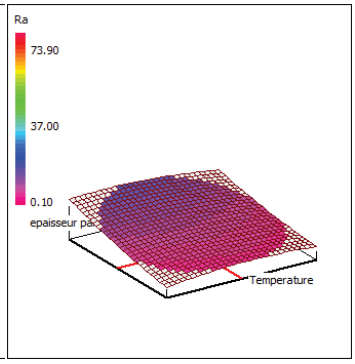
Surface de réponse Temps-Température pour un angle de 45° et une épaisseur de 6



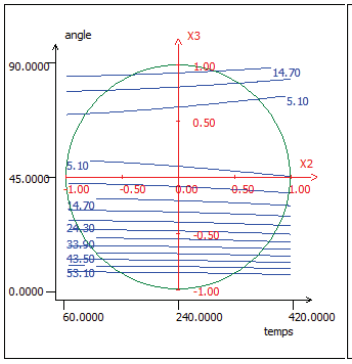


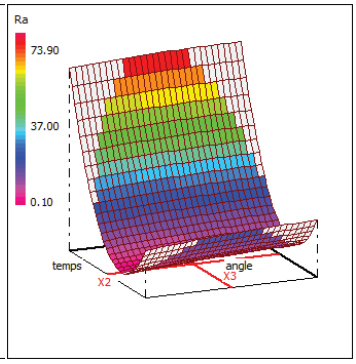
Surface de réponse Angle-Température pour un temps de 240 m et une épaisseur de 6



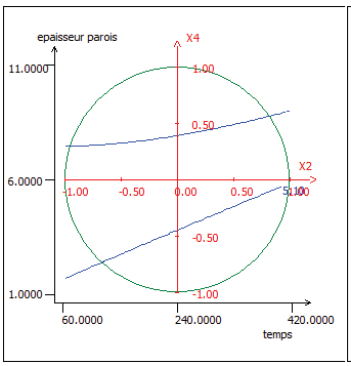


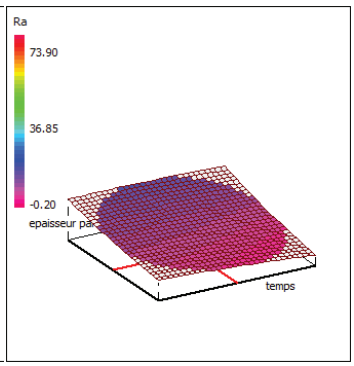
Surface de réponse Epaisseur-Température pour un angle de 45° et un temps de 240 m



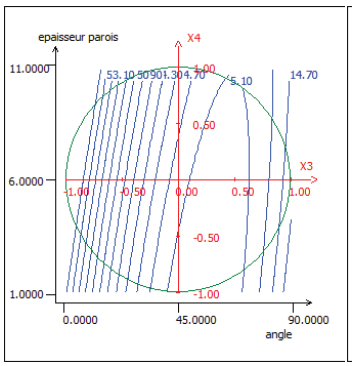


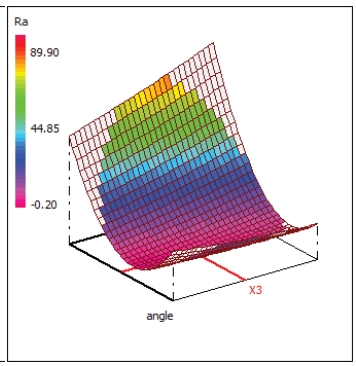
Surface de réponse Angle-Temps pour un une épaisseur de 6 et une température de 33°C





Surface de réponse Epaisseur-Temps pour un angle de 45° et une température de 33°C





Surface de réponse Epaisseur-Angle pour un temps de 240 m et une température de 33°C

Figure 109 – Surfaces de réponses du plan d'expérience

On remarque donc que l'évolution du Ra est fortement dépendante de l'angle d'inclinaison de la surface. Ainsi, le meilleur résultat est obtenu pour des surfaces dont l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale est compris entre environ 50° et 70°. Ces données sont très intéressantes puisque nous avons au chapitre 3 de notre manuscrit que la qualité de l'état de surface était la meilleure pour une inclinaison nulle (surface horizontale) ou pour une inclinaison proche de la verticale, soit un angle compris entre environ 80 et 90°.

On remarque également que la valeur du Ra est proportionnelle à l'épaisseur des parois de la pièce (traduite en nombre de couches de matière). Or, les déformations globales de la géométrie des pièces sont qualitativement plus importantes dans le cas de faible épaisseur de paroi. Il sera donc nécessaire de trouver un compromis entre déformation de la pièce et amélioration de l'état de surface.

Enfin, on observe que l'augmentation du temps et de la température permettent d'améliorer l'état de surface de manière fine.

3.6 Conclusion

Grâce à ce premier plan d'expérience, nous pouvons conclure que la conversion chimique par attaque à l'acétone est un procédé viable pour le traitement de surfaces de pièces réalisées en ABS. En effet, on observe que l'état de surface des pièces, pour une inclinaison donnée, peut être amélioré à l'aide d'un temps d'exposition et d'une température contrôlée. De plus, le meilleur état de surface est obtenu pour une surface inclinée entre 50° et 70° par rapport à la verticale pour des pièces soumises à l'acétone tandis que le meilleur état de surface est obtenu pour des surfaces pour des surfaces proches de la verticale dans le cas de pièces non-traitées.

Nous avons donc pu valider les hypothèses émises à l'issue de l'essai préliminaire. Ainsi, l'inclinaison de la pièce a un rôle important sur l'état de surface obtenu. La durée d'exposition et la température de l'enceinte influent également sur l'état de surface.

Ce plan nous permet également de proposer un modèle prédictif de l'état de surface. Ainsi, en intégrant ces données dans le logiciel de CAO, il serait possible d'indiquer au concepteur les surfaces dont l'état peut être amélioré lors de la préorientation de la pièce (Chapitre III4.1).

Comme nous l'avons vu en partie 2 lors des essais préliminaires, une exposition trop longue peut entraîner une déformation globale de la géométrie de la pièce. Cet aspect ne rentrant pas dans le cadre de notre expérimentation, nous ne l'avons pas traité ici. Cependant, afin de proposer un modèle complet, il serait nécessaire de réaliser des tests complémentaires afin de valider ce procédé conformément aux tolérances géométriques imposées sur la pièce.

Section 4 Tests de traction

4.1 Définition des conditions expérimentales

Pour réaliser ce test de traction, nous avons donc fabriqué deux éprouvettes de traction pour chaque ligne de notre plan d'expérience. La première a été fabriquée horizontalement et la seconde verticalement. Chaque éprouvette a été fabriquée sur la même machine FDM à partir de la même bobine de fil et du même fichier CAO afin d'assurer la meilleure cohérence possible des mesures. Ces éprouvettes ont subi la même durée d'exposition à la même température que les pièces génériques. La géométrie et les dimensions des éprouvettes sont identiques à celles de la Figure 106. Pour chaque essai de traction, nous avons mesuré la résistance à la rupture. Cependant, les facteurs pris en compte pour les éprouvettes sont uniquement la température et le temps d'exposition. Ainsi, nous avons utilisé une matrice de Doehlert (5,3) afin de dépouiller notre plan d'expérience. Cette matrice reprend les valeurs des niveaux de précédents paramètres mais se limite à trois niveaux temps d'exposition au lieu de sept. Nous avons ainsi réduit le nombre d'essais et effectué des répétitions sur les points du plan d'expérience présentant une même température et un même temps d'exposition (par exemple, les points 7 et 13).

4.2 Résultats obtenus

Les résultats obtenus sont donnés dans le Tableau 7.

N° Expé	Température (°C)	Temps exposition (min)	Rm Vertical (Mpa)	Rm Horizontal (Mpa)
1	43,00	240,00	23,53	25,51
2	23,00	240,00	21,67	28,04
7	38,00	291,96	22,17	27,57
8	28,00	188,04	23,69	26,97
9	38,00	188,04	22,15	27,56
11	28,00	291,96	23,68	27,58
13	38,00	291,96	22,55	25,21
14	28,00	188,04	23,50	24,43
15	38,00	188,04	22,39	22,68
17	33,00	240,00	22,37	27,57
18	28,00	291,96	24,09	27,27
20	33,00	240,00	22,39	25,84
21	33,00	240,00	22,64	25,10
22	33,00	240,00	21,88	26,99
23	33,00	240,00	21,46	26,00
24	33,00	240,00	22,66	26,95
25	33,00	240,00	22,91	25,16

Tableau 7 – Résultats des tests de traction relatifs au plan d'expérience

4.3 Analyse

Pour les mesures correspondant aux essais de tractions effectués sur les éprouvettes fabriquées verticalement, l'analyse de la variance nous indique que la fidélité du modèle construit par le logiciel est limitée bien que les résultats des répétitions des différents tests soient cohérents (Tableau 8). Ainsi, le modèle proposé n'est pas exploitable sans mesures complémentaires pour assurer sa fiabilité.

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré Moyen	Rapport	Significativité
Régression	2,17E+00	5	4,34E-01	2,5415	9,2
Résidus	7,26E+00	11	6,60E-01		
Validité	5,55E+00	1	5,55E+00	32,45	0,0199 ***
Erreur	1,71E+00	10	1,71E-01		
Total	9,43E+00	16			

Tableau 8 - Tableau d'analyse de la variance du modèle de Rm Vertical

En revanche, l'analyse de la variance du modèle proposé pour les essais de tractions sur les éprouvettes fabriquées horizontalement indique que ni les répétitions de mesures n'apporte une cohérence suffisante, ni le modèle n'apporte une confiance suffisante (Tableau 9).

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré Moyen	Rapport	Significativité
Régression	9,50E+00	5	1,90E+00	0,8823	52,4
Résidus	2,37E+01	11	2,15E+00		
Validité	2,09E-01	1	2,09E-01	0,0891	77,1
Erreur	2,35E+01	10	2,35E+00		
Total	3,32E+01	16			

Tableau 9 - Tableau d'analyse de la variance du modèle de Rm Horizontal

La faible confiance dans la fidélité du modèle peut s'expliquer par la faible disparité des résultats mesurés. En effet, il est difficile de déterminer si les variations entre les mesures sont dues à un réel impact de l'acétone sur la pièce ou à la fiabilité de l'outil de mesure. De plus, chaque test du plan d'expérience ayant été mené une seule fois, rien ne garantit non plus que la valeur mesurée est fidèlement représentative du comportement de l'éprouvette. Ainsi, il n'est pas possible de valider les surfaces de réponses proposées par le logiciel. Nous proposons donc de comparer les valeurs mesurées après attaque à l'acétone avec celles effectuées durant les essais préliminaires (Tableau 10).

	Rm avant acétone		Rm après acétone		
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Variation de la moyenne
Eprouvette horizontale	31,32	4,45	26,11	1,27	-16,63%
Eprouvette verticale	16,97	2,03	22,68	0,97	+33,65%

Tableau 10 – Comparaison des Rm obtenu avant et après attaque à l'acétone

Ces résultats ne permettent d'exprimer qu'une tendance de la variation du Rm en fonction de l'action de l'acétone. On note néanmoins une amélioration de la tenue mécanique en traction dans la direction d'impression. En revanche, l'acétone semble détériorer la tenue mécanique en traction dans le plan d'impression d'une pièce en ABS.

4.4 Conclusion

Grâce à ces essais, nous avons pu voir qu'une conversion chimique par attaque à l'acétone d'une pièce réalisée en ABS via le procédé FDM modifiait la tenue mécanique en traction de celle-ci. De même que pour les résultats obtenus lors de la mesure de l'état de surface, ces données pourraient être intégrées dans notre méthodologie de conception lors de la détermination du module d'Young équivalent de la pièce (Chapitre III4.4).

Cependant, on observe que ce procédé influence négativement la tenue mécanique en traction dans le plan d'impression. Dans notre méthodologie, nous privilégions la tenue mécanique de la pièce à l'état de surface. Il sera

donc important de réaliser des expérimentations plus fines afin de proposer un modèle d'évolution de la tenue mécanique d'une pièce en fonction de l'action de l'acétone. Ce modèle pourrait alors être intégré lors de la phase de pré-orientation de la pièce de notre méthodologie (Chapitre III4.1). Cela permettrait d'indiquer au concepteur la valeur maximale atteignable pour le Rm tout en préservant la tenue mécanique de la pièce.

Le plan d'expérience que nous avons mené ne permet néanmoins pas de déterminer de quelle manière la température et le temps d'exposition influent sur la tenue mécanique. En effet, les résultats que nous avons obtenus ne permettent pas de constituer une surface de réponse fiable.

Chapitre VI Conclusion

L'objectif des travaux de cette thèse est de proposer une méthodologie de conception pour la réalisation de pièces en fabrication additive.

Notre état de l'art a montré que la FA était une famille de procédés de fabrication récents qui présentaient de nouvelles caractéristiques par rapport aux procédés de fabrication conventionnels tels que la réalisation de géométries complexes, la fabrication de pièce en multimatériaux, l'intégration de support ou la possibilité de concevoir des assemblages indémontables. La FA est présente à la fois dans les milieux industriel et domestique, et le procédé qui possède aujourd'hui le plus grand niveau de pénétration est le FDM. Les attentes de ces deux catégories de clients restent cependant très similaires : la production de pièces de qualité. Parmi les trois leviers d'action que sont les matériaux mis en œuvre, la machine utilisée et la conception de la pièce à fabriquer, permettant d'obtenir une pièce conforme aux besoins exprimés dans le cahier des charges, nous avons choisi de nous orienter sur la conception afin de proposer une méthodologie permettant un accompagnement des concepteurs dans la prise en compte des spécificités de la FA, depuis les contraintes exprimées par le cahier des charges jusqu'à la proposition d'une maquette numérique prête à être fabriquée sur une machine de FA.

La méthodologie que nous proposons se décompose en 11 étapes regroupées en trois sections principales. La première section de notre méthodologie vise à produire un solide répondant purement aux contraintes du cahier des charges : tenue mécanique, états de surface et matériaux de fabrication. Pour ceci, le concepteur s'aide du graphe des fonctions. Il s'agit d'un outil, intégré au logiciel de CAO, permettant la représentation des contraintes du cahier des charges sous forme de surfaces fonctionnelles. Ces surfaces sont ensuite positionnées et orientées les unes par rapport aux autres suivant les tolérances dimensionnelles. Il est possible d'affecter à chaque surface un état de surface et un matériau spécifique. Un solide est alors généré à partir de ces surfaces par une triangulation de Delaunay. La seconde section a pour but de réaliser une optimisation topologique du volume de ce solide, basée sur des critères renseignés par le concepteur, afin de réduire le temps de fabrication, la quantité de matière consommée et, donc, le coût de revient de la pièce. Pour ceci, un module d'Young équivalent est calculé en fonction du matériau, de l'orientation de la pièce et de la direction des efforts extérieurs. Enfin, la troisième section de notre méthodologie permet d'assurer la fabricabilité de la pièce en déterminant automatiquement les zones nécessitant du support pour la fabrication de la pièce et en intégrant ce support directement dans le logiciel de CAO utilisé pour réaliser la maquette numérique.

Ainsi, la notre méthodologie présente une structure qui répond de manière globale aux problématiques soulevées dans notre état de l'art. En effet, la réflexion menée sur l'intégration d'outils mathématiques existants au sein d'un même logiciel de CAO permet un déroulement avec un minimum de ruptures de la chaîne numérique. Il en reste encore néanmoins deux qui sont au niveau du résultat de l'optimisation topologique et du modèle discrétisé de la pièce servant de base pour la génération du support. Actuellement, au regard des choix que nous avons formulés, les outils actuels ne permettent pas encore d'éliminer ces deux ruptures. Le cas d'étude de notre méthodologie (la conception d'une pièce industrielle à l'aide du logiciel SolidWorks) démontre également l'application de notre méthodologie aussi bien pour un milieu industriel que pour un usage domestique. En effet, le logiciel SolidWorks est un logiciel simple d'utilisation et relativement intuitif disposant d'un module d'optimisation topologique, simpliste

mais fonctionnelle, et intégrant une interface de programmation en C# et en VBA. Bien que le prix de la licence ne soit pas abordable pour des particuliers, il est raisonnable de penser que des structures non-industrielles adaptées, telles que les *Fab Lab*s, puissent en faire l'acquisition afin mettre à disposition ce logiciel. Enfin, la méthodologie que nous proposons prend en compte les spécificités de la FA en permettant la conception de pièces aux géométries complexes, composées de plusieurs matériaux et pouvant intégrer des assemblages indémontables tout en tenant compte de la notion de support.

Néanmoins, certains points des deux premières sections de cette méthodologie nécessitent encore d'être approfondis.

Actuellement, tout le travail consistant à établir le graphe des fonctions puis à déterminer le solide de départ se fait manuellement par le concepteur. Bien que ce travail ne puisse être remplacé en intégralité par des algorithmes informatiques, il serait tout de même intéressant d'automatiser certaines étapes afin de réduire le temps de conception. Par exemple, la création des surfaces fonctionnelles à partir des contraintes du cahier des charges, la génération de l'assemblage de ces surfaces et la vérification des volumes de travail pourraient être réalisées par le logiciel de CAO. De même, pour l'instant, le principe de densification des surfaces, qui vise à maximiser le nombre de surfaces fonctionnelles par volume fabricable, consiste simplement à augmenter manuellement le nombre de surfaces fonctionnelles par set. Il serait donc envisageable d'automatiser cette étape afin de demander au logiciel de CAO un panel de solutions proposées à l'issue d'une étape d'optimisation multi objectifs prenant en compte les volumes de travail des différentes machines et la nécessité de séparation de certaines surfaces, parmi lesquelles le concepteur viendrait sélectionner le résultat le plus satisfaisant.

De même, pour la seconde section de la méthodologie, l'étape de pré-orientation de la pièce, dépendamment de l'état de surface et des efforts imposés par le cahier des charges, devrait dans l'idéal être réalisée par le logiciel de CAO à l'aide d'un algorithme d'optimisation multi objectifs. La complexité de cette étape relève du caractère quasi infini des possibilités d'orientation de la pièce dans le cas où les dimensions de la pièce à fabriquer sont très petites devant celle du volume de travail de la machine. Ainsi, bien que la détermination de l'orientation idéale de la pièce soit nécessaire à la préparation de l'optimisation topologique, cette étape peut nécessiter un long temps de calcul de l'ordre de plusieurs heures.

Le quatrième chapitre de notre thèse présente à la fois la méthode de génération automatique de support ACSG (Automated CAD Support Generation) évoquée dans la troisième section de notre méthodologie de conception et la détermination de la géométrie idéale du support.

Nous avons vu que la géométrie idéale du support était celle d'un arbre, composée d'un prisme vertical (le pilier) surmonté d'un cône (la tête). Cette géométrie permet de s'adapter à toute forme de surface à supporter tout en minimisant la quantité de matière nécessaire à la fabrication du support. Afin de réduire le temps de fabrication dans le cas de machines sérielles trois axes, les sections du prisme et du cône ont été déterminées carrées. Cela fournit également un modèle simple à générer par le logiciel de CAO. Nous avons également vu que, pour assurer le maintien et la fabricabilité du support, la section du pilier ne devait pas être inférieure à $9mm^2$. Néanmoins, la forme du support que nous proposons repose sur l'angle minimal de support α correspondant au dévers maximum que peut accuser le support avant de s'effondrer (généralement égal à 45°). Ainsi, il est tout à fait possible d'optimiser encore le support en aménageant la tête de manière à la composer de poutres de sections carrées inclinées à 45°. De plus, le support que nous proposons est considéré comme une pièce CAO, ce qui implique que le logiciel de tranchage veille à respecter l'intégrité de toute sa surface extérieure. Seule la surface en contact avec la pièce à fabriquer étant importante dans notre cas, il serait donc possible de réduire le temps de fabrication du support en réalisant le pilier et le cône de manière alvéolaire.

La méthode de génération automatique du support par le logiciel de CAO se déroule en six étapes à partir du modèle numérique de la pièce. Pour ceci, la pièce est tout d'abord discrétisée par une étape de décomposition en *octree* afin d'obtenir un maillage régulier fin en trois dimensions de la pièce. Idéalement, la résolution du maillage doit être inférieure à la résolution de la machine de FA sélectionnée afin de gommer physiquement les erreurs numériques dues aux approximations de la décomposition. Une fois la pièce décomposée, la surface de celle-ci est représentée sous forme matricielle. Cela permet de déterminer les zones nécessitant du support et les zones sur lesquelles le support peut prendre appui afin de générer des matrices de surface à supporter (MSS). A partir de ces MSS et à l'aide d'outils mathématiques, les caractéristiques du support sont déduites de manière automatique : emplacement et hauteur du pilier et géométrie de la tête. Là encore, ces données sont enregistrées sous forme matricielle. Le support peut alors être généré automatiquement en trois dimensions par le logiciel de CAO à l'aide de ces informations et intégré à la pièce à concevoir.

Bien que les étapes de génération de support soient techniquement réalisables de manière automatique, comme nous l'avons montré à travers le cas d'application d'une pièce simple, l'intelligence proposée par notre méthodologie reste encore limitée aujourd'hui. En effet, s'il est possible d'intégrer un support optimisé en termes de quantité de matière, les problématiques liées à l'extraction du support après la fabrication de la pièce n'ont pas été étudiées. Ainsi, bien que le concepteur ait la garantie de la fabricabilité de la pièce, il doit néanmoins vérifier manuellement que le support proposé puisse effectivement être retiré afin d'obtenir une pièce réellement fonctionnelle. Avec les travaux menés sur le sujet, il est probable que l'anticipation de l'extraction du support puisse être intégrée de manière automatique à notre méthodologie dans les années à venir. De plus, notre méthode de génération de support est encore limitée aux géométries internes pour lesquelles le projeté orthogonal de la surface à supporter est composé d'une unique entité continue. Il serait donc intéressant de proposer une méthode d'analyse permettant de supporter des géométries internes complexes telles que des spirales ou des créneaux. Enfin, le logiciel Excel que nous avons utilisé pour notre cas d'étude est un outil d'analyse pour lequel la taille des matrices est limitée. Ainsi, pour une décomposition en *octree* à de pièces de l'ordre de la dizaine de centimètres, il n'est pas possible de descendre à une résolution inférieure à 1,5 mm. Il est donc nécessaire, pour une application viable, de remplacer cette solution par un outil d'analyse permettant le stockage de données plus volumineuses (comme l'utilisation de fichiers xml ou de fichiers texte par exemple).

Le cinquième chapitre de notre thèse nous a permis de démontrer que la conversion chimique par attaque à l'acétone était un procédé qui pouvait être utilisé pour le parachèvement de pièces fabriquées en ABS par un procédé FDM. L'hypothèse de départ était une amélioration du Ra (rugosité arithmétique) sur les surfaces de la pièce. Pour ceci, nous avons mené une expérimentation préliminaire qui nous a permis de valider cette hypothèse. Nous avons également pu observer que les pièces réalisées en ABS semblaient présenter une étanchéité à ce solvant. A partir de ces résultats, nous avons mené un plan d'expérience afin de proposer un modèle prédictif de l'évaluation du Ra en fonction de la température de l'acétone, du temps d'exposition, de l'orientation des surfaces et de l'épaisseur de la pièce. Les résultats fournis par ce plan d'expérience ont permis de construire une surface de réponse fiable à plus de 97%. Les résultats issus de ce chapitre peuvent donc être intégrés à notre méthodologie de conception en tant que connaissances métier du procédé afin d'offrir une marge de manœuvre supplémentaire pour l'étape d'orientation de la pièce en fonction de l'état de surface souhaité. En effet, on observe un Ra minimum d'environ 6 pour des surfaces inclinées d'environ 30° par rapport à la verticale. En complément de ce plan d'expérience, nous avons également mené une série d'essais de traction sur des éprouvettes standard ayant subi le même traitement que les pièces servant à mesurer le Ra. Une série de tests permettant de fournir une valeur étalon a également été réalisée sur des éprouvettes n'ayant pas subi le traitement à l'acétone. Les résultats montrent que le comportement des pièces en traction possède un caractère orthotrope, ce qui est cohérent avec le procédé de fabrication FDM. Ainsi, la résistance à la traction est plus élevée dans le sens des fibres que dans le sens de

fabrication. Ces résultats sont valables pour des pièces avec traitement et sans traitement. On observe également que le traitement à l'acétone tend à homogénéiser la résistance à la traction. Ainsi, pour des pièces ayant été fabriquées horizontalement, la résistance à la traction (dans le sens des fibres) passe de 31,32 MPa pour des pièces non soumises à l'acétone à 26,11 MPa pour des pièces soumises à l'acétone. Pour des pièces ayant été fabriquées verticalement, la résistance à la traction (perpendiculairement aux fibres) passe de 16,97 MPa pour des pièces non soumises à l'acétone à 22,68 MPa pour des pièces soumises à l'acétone.

Bien que l'attaque à l'acétone soit une technique de parachèvement devenue assez récemment populaire, peu de recherches ont été effectuées sur la caractérisation de ce procédé. Cependant, bien qu'originales, les études que nous avons effectuées présentent certaines limitations. En effet, l'acétone est un solvant volatile extrêmement inflammable, dont le point éclair se situe à -9,4°C s'il est utilisé dans une enceinte ouverte, qui s'auto-enflamme aux alentour de 500°C. Il est donc nécessaire de réaliser le parachèvement de pièces en ABS via ce procédé dans un endroit aéré, idéalement muni d'une hotte, et à l'abri de fortes sources de chaleur. Si la mise en place d'un équipement spécialisé peut être réalisée dans le milieu industriel, cette technique présente des risques pour une utilisation domestique. Il serait donc tout à fait pertinent de réaliser un second plan d'expérience permettant d'étendre la plage des niveaux des facteurs étudiés précédemment afin de proposer un procédé présentant moins de risques et utilisable dans un environnement non industriel. Ce second plan permettrait également de corroborer les résultats mesurés lors des essais de traction. En effet, de même que pour la mesure du Ra, nous souhaitions proposer un modèle prédictif de l'évolution de la résistance à la traction de pièces en ABS en fonction des paramètres du parachèvement à l'acétone. Bien que les valeurs mesurées semblent réalistes, celles-ci ne permettent pas de construire une surface de réponse fiable à plus de 48,6% pour des pièces fabriquées horizontalement et remettent également en cause la surface de réponse proposée pour des pièces réalisées verticalement. En effets, ces résultats ont été obtenus à l'aide de pièces fabriquées par la même machine de FA et testée sur la même machine de traction. Des travaux de recherche complémentaires sont donc nécessaires dans l'optique de valider nos mesures, dans le but de proposer un modèle d'évolution de la résistance à la traction en fonction des paramètres du traitement à l'acétone. Enfin, les expérimentations que nous avons menées ne prennent pas en compte la géométrie globale de la pièce. De même, des mesures complémentaires permettraient de confirmer la viabilité du procédé vis-à-vis du respect des tolérances dimensionnelles imposées à la pièce par le cahier des charges.

Même si elle possède encore certaines limitations, notre méthodologie est applicable aussi bien pour un besoin industriel que domestique. Ainsi, afin de fournir un outil clé en main, les principales améliorations à apporter consistent à automatiser au maximum les étapes de notre méthodologie qui modifient la maquette numérique de la pièce, telles que la génération des surfaces fonctionnelles, l'orientation de la pièce, l'optimisation topologique et la génération des supports. En effet, le but de notre méthodologie est d'apporter un outil d'aide à la conception. Ainsi, si la modification du modèle CAO relève du travail du concepteur, celui-ci doit pouvoir réaliser des choix de conception justes, guidés par des connaissances métiers valides et dans le respect du cahier des charges.

Pour conclure, le travail que nous avons effectué s'inscrit dans la lignée des méthodologies de conception en apportant une réponse aux manques identifiés par une approche originale dans l'intégration des données métier et du cahier des charges dans un outil simple d'utilisation et permettant un gain de temps important pour le concepteur. Cet outil sert aussi bien le monde de la recherche que l'industrie. En effet, il constitue une étape clé dans la réalisation d'une méthodologie intégrée de conception en s'appuyant sur les travaux de recherche existants, aussi bien dans les domaines de la conception, que dans ceux des mathématiques, de la mécanique, de la physique et de la chimie. Il offre également des perspectives économiques et industrielles en s'appuyant sur des outils connus et faciles à mettre en œuvre tels que les logiciels de CAO, l'optimisation topologique et les logiciels de tranchage. A court terme, afin de poursuivre opportunément ces travaux, nous souhaitons automatiser davantage et améliorer la

performance de la méthode ACSG de génération de support. En effet, il s'agit d'un réel manque dans le secteur industriel et dont le besoin est immédiat. Sur une vision à plus long terme, nous souhaitons améliorer la transition entre le cahier des charges et le graphe des fonctions, par exemple en nous basant sur une analyse sémantique des termes techniques. Cela permettrait d'encore augmenter les gains en temps de conception et en consommation de matière afin de réduire le coût de production

Annexe 1 - Mise en plan

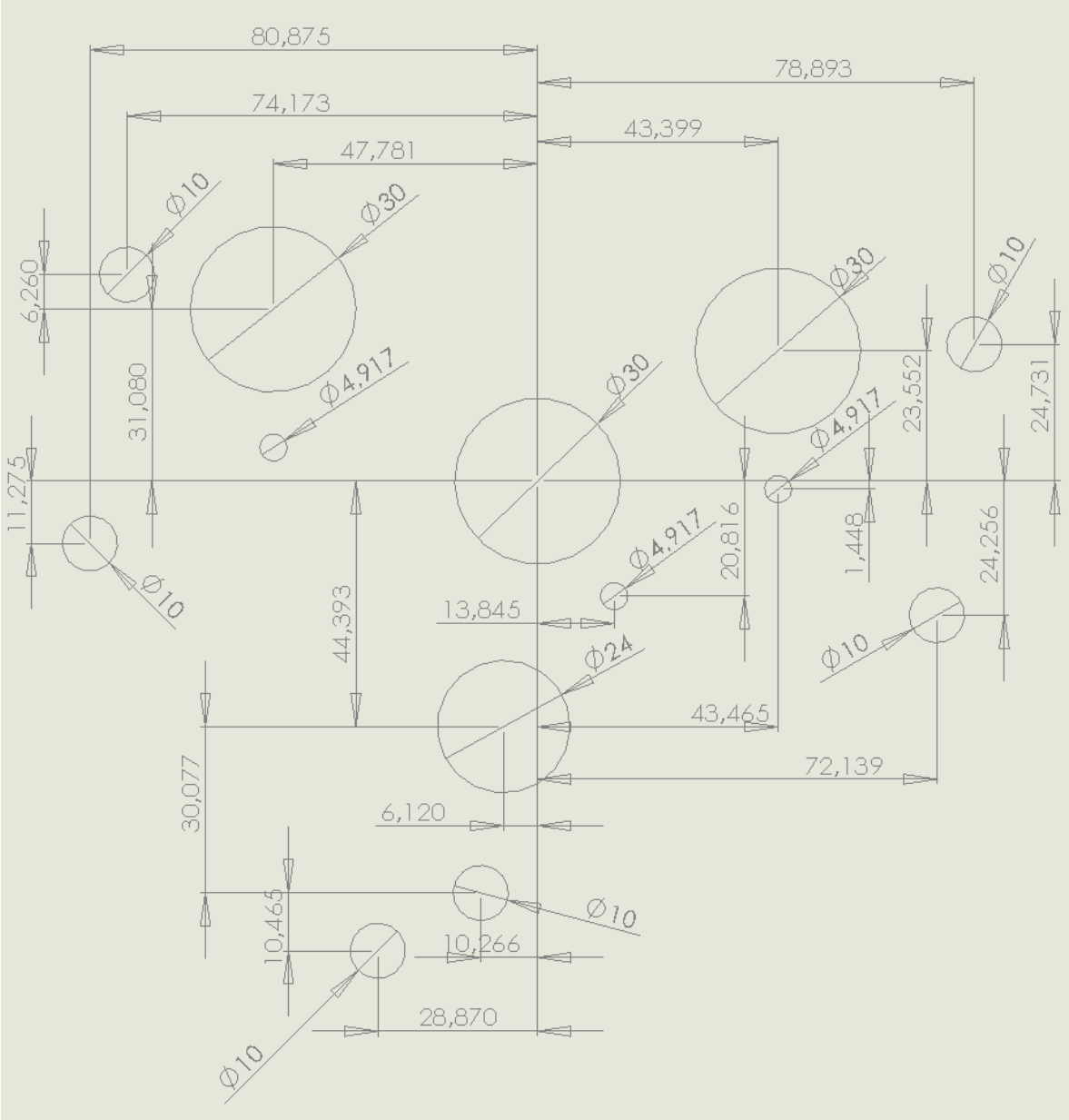
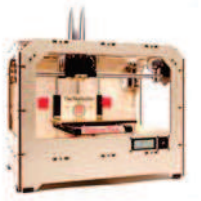
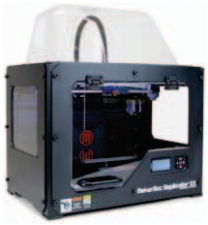
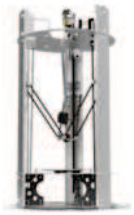


Figure 110 - Mise en plan de la pièce à concevoir

Annexe 2 – Documentation technique des machines de FA

Machine	MakerBot Replicator Dual Extruder	MakerBot Replicator 2X	SpiderBot Delta 3D	Zcorp Spectrum Z510
				
Matériau	ABS / PLA	ABS / PLA	ABS / PLA	ZP-150 (poudre minérale)
Multimatériaux	Oui	Oui	Non	Non
Couleur	Oui	Oui	Oui	Oui
Résolution	0,1 mm	0,1	0,15	0,089 mm
Volume de travail	225 x 145 x 150 mm	250 x 160 x x150 mm	180 mm de diamètre x 180 mm hauteur	254 x 356 x 203 mm
Précision	2,5 microns axe Z 11 microns axes X/Y	2,5 microns axe Z 11 microns axes X/Y	-	12 microns axe Z 4 microns axes X/Y
Vitesse de buse	40 mm/s	120 mm/s	333 mm/s	2 couches par minute

Bibliographie

Ahn, S.-H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., & Wright, P. K. (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal, 8*(4), 248-257.

Allaire, G. (2006). *Conception optimale de structures*: Springer.

Armillotta, A. (2008). Selection of layered manufacturing techniques by an adaptative AHP decision model. *Robotics and computer integrated manufacturing, 24*, 450-461.

Arni, R., & Gupta, S. (2001). Manufacturability Analysis of Flatness Tolerances in Solid Freeform Fabrication. *Journal of mechanical design, 123*(1), 148.

Bandera, C., Cristofolini, I., Filippi, S., & Toneatto, G. (2004). *The definition of the geometrical characteristics of product in a knowledge based system for industrial design (DGL-Design GuideLines)-exploring the possibility of introducing ISO GPS (Geometrical Specification of Products) concepts.* Paper presented at the Convegno Nazionale XIV ADM XXXIII AIAS.

Barlier, C., Gasser, D., & Cunin, D. (1995). Un procédé original de prototypage rapide : la stratoconception. *Revue internationale de CFAO et d'informatique graphique, 10*(6), 623-634.

Bendsoe, M. P., & Sigmund, O. (2003). *Topology optimization : theory, methods and applications*: Springer Verlag.

Bodein, Y., Rose, B., & Caillaud, E. (2014). Explicit reference modeling methodology in parametric CAD system. *Computers in Industry, 65*(1), 136-147.

Boothroyd, G. (1994). Product design for manufacture and assembly. *Computer-Aided Design, 26*(7), 505-520.

Boothroyd, G., & Dewurst, P. (1983). *Design for Assembly : a designer's handbook*: University of Massachussets.

Boothroyd, G., Dewurst, P., & Knight, W. A. (2010). *Product Design for manufacture and assembly* (Vol. 74): CRC Press.

Boyard, N., Rivette, M., Christmann, O., & Richir, S. (2012). *Méthodologie de prise en compte de la Fabrication Aditive lors de la phase de conception.* Paper presented at the AIP PRIMECA, Mont Dore.

Brissaud, D., & Tichkiewitch, S. (200). Innovation and manufacturability analysis in an integrated design context. *Computers in Industry, 43*(2), 111-121.

Byun, H. S., & Lee, K. H. (2004). A decision support system for the selection of a rapid prototyping process using the modified TOPSIS method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 26*(11-12), 69-80.

Byun, H. S., & Lee, K. H. (2006). Determination of the optimal build direction for different rapid prototyping processes using multi-criterion decision making. *Robotics and computer integrated manufacturing, 22*(1), 69-80.

Canellidis, V., Giannatsis, J., & Dedoussis, V. (2009). Genetic-algorithm-based multi-objective optimization of the build orientation in stereolithography. *the international Journal of Advanced Manufacturing Technology, 45*(7-8), 714-730.

Case, K. (2000). Feature modelling : a validation methodology and its evaluation. *Journal of Materials Processing Technology, 107*(1-3), 477-488.

Chang, K. (2001). Integration of design and manufacturing for structural shape optimization. *Advances in Engineering Software, 32*(7), 555-567.

Company set up for stereolithography. (1987). *Computer-Aided Design, 19*(4), 223.

Dolenc, A., & Makela, I. (1994). Slicing procedures for layer manufacturing techniques. *Computer-Aided Design, 26*(2), 119-126.

Dowlatshahi, S. (1999). A modeling approach to logistics in concurrent ingineering. *European Journal of Operational Research, 115*(1), 59-76.

El-Katatny, I., Masood, S. H., & Morsi, Y. S. (2010). Error analysis of FDM fabricated medical replicas. *Rapid Prototyping Journal, 16*(1), 36-43.

Ettlie, J. E. (1997). Integrated design and new product success. *Journal of Operations management, 15*(1), 33-55.

Eversheim, W., & Baumann, M. (1991). Assembly-oriented design process. *Computers in Industry, 17*(2), 287-300.

Feng, C., Kusiak, A., & Huang, C. (1996). Cost evaluation in design with form features. *Computer Aided Design, 28*(11), 879-885.

Foley, J. D., Dam, A. V., Feiner, S. K., Hughes, J. F., & Phillips, R. L. (1994). *Introduction to computer graphics* (Vol. 55): Addison-Wesley.

Fonda, C. (2013). *A practical guide to your first 3D print* (e-book).

Franck, D., & Fadel, G. (1994). *Preferred direction of build for rapide prototyping processes.* Paper presented at the 5th International Conference on Rapid Prototyping Dayton, Ohio.

Gaynor, A. T., Meisel, N. A., C. B. Williams, & Guest, J. K. (2014). Multiple-Material Topology Optimization of Compliant Mechanisms Created Via PolyJet Three-Dimensional Printing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, 136*(6), 980-997.

Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2010). *Additive Manufacturing Technologies. Rapid Prototyping to Direct Digital manufacturing*. New York, London: Springer.

Gupta, S., Regli, W. C., Das, D., & Nau, D. (1997). Automated manufacturability analysis : a survey. *Research in Engineering Design, 9*(3), 168-190.

Hales, C. (1993). *Managing Engineering Design*: Longman Scientific & Technical.

Hascoët, J.-Y., Ponche, R., Kerbrat, O., & Mognol, P. (2011). *From functional specifications to optimized CAD model: proposition of a new DFAM methodology.* Paper presented at the International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Portugal.

Howard, T. J., Culley, S. J., & Dekoninck, E. (2008). Describing the creative design process by the integration of engineering design and cognitive psychology literature. *Design Studies, 29*(2), 160-180.

Jamieson, R., & Hacker, H. (1995). Direct slicing of CAD models for rapid prototyping. *Rapid Prototyping Journal, 1*(2), 4-12.

Kao, J., & Prinz, F. B. (1998). Optical motion planning for deposition in layered manufacturing. *Proceedings of Design Engineering Technical Conference*, 13-16.

Kerbrat, O. (2009). *Méthodologie de conception d'outillages modulaires hybrides basée sur l'évaluation quantitative de la complexité de fabrication.* PhD, Génie Mécanique, ENS Cachan - Antenne de Bretagne.

Kerbrat, O., Mognol, P., & Hascoët, J.-Y. (2011). A new DFM approach to combine machining and additive manufacturing. *Computers in Industry, 62*(7), 684-692.

Kerninon, J. (2010). *Intégration des spécificités de la fabrication additive dans une méthode de conception de pièces.* PhD, Ecole Centrale de Nantes.

Kim, H., Querin, O. M., & Steven, G. P. (2002). On the development of structural optimisation and its relevance in engineering design. *Design Studies, 23*, 85-102.

Kulkarni, P., Marsan, A., & Duta, D. (2000). A review of process planning techniques in layered manufacturing. *Rapid Prototyping Journal, 6*(1), 18-35.

Kuo, T. (2001). Design for manufacture and design for 'X' : concepts, applications and perspectives. *Computer and Industrial Engineering, 41*(3), 241-260.

Leigh, S. J., Bradley, R. J., Purssell, C. P., Billson, D. R., & Hutchins, D. A. (2012). A Simple, Low-Cost Conductive Composite Material for 3D Printing of Electronic Sensors. *PLoS One*.

Liou, F. F., Slattery, K., Kinsella, M., Newkirk, J., Chou, H.-N., & Landers, R. (2007). Applications of a hybrid manufacturing process for fabrication of metallic structures. *Rapid Prototyping Journal, 13*(4), 236-244.

Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Harley, I. (2006). *Close Range Photogrammetry: Principles, Methods and Applications*. UK: Whittles.

Ma, W. (2004). NURBS-based adaptive slicing for efficient rapid prototyping. *Computer-Aided Design, 36*(13), 1309-1325.

Mavroidis, C., DeLaurentis, K. J., Won, J., & Alam, M. (2001). Fabrication of Non-Assembly Mechanisms and Robotic Systems Using Rapid Prototyping. *Journal of mechanical design, 123*(4), 516-524.

Melchels, F. P. W., Domingos, M. A. N., Klein, T. J., J. Malda, Bartolo, P. J., & Hutmacher, D. W. (2012). Additive Manufacturing of tissues and organs. *Progress in Polymer Science, 37*(8), 1079-1104.

Mercelis, P., & Kruth, J.-P. (2006). Rapid prototyping : energy and environment in the spotlight. *Rapid Prototyping Journal, 12*(1), 26-34.

Mognol, P., Muller, P., & Hascoet, J. Y. (2011). *A novel approach to produce functionally graded materials for additive manufacturing.* Paper presented at the International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Portugal.

Mueller, B., & Kochan, D. (1999). Laminated object manufacturing for rapid tooling and patternmaking in foundry industry. *Computers in Industry, 39*(1), 47-53.

Muller, P., Mognol, P., & Hascoët, J.-Y. (2010). Modeling and control of a direct laser powder deposition process for Functionally Graded Materials (FGM) parts manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology, 30(4), 389-398.*

Nowotny, S., Scharek, S., Beyer, E., & Richter, K.-H. (2007). Laser beam build-up welding: Precision in repair, surface cladding, and direct 3D metal deposition. *Journal Of Thermal Spray Technology, 16*(3), 344-348.

O'Driscoll, M. (2002). Desig for Manufacture. *Journal of Materials Processing Technology, 122*(3), 318-321.

Ohashi, T., Iwata, M., Arimoto, S., & Mayakawa, S. (2002). Extended assemblability evaluation method. *JSME International Journal, 45*(2), 567-574.

Pahl, G., & Beitz, W. (1984). *Engineering design - Asystematic approach*: Springer.

Peng, H., Mankoff, J., Hudson, S. E., & McCann, J. (2015). *A Layered Fabric 3D Printer for Soft Interactive Objects*. Paper presented at the CHI.

Perrin, J. (2011). *Concevoir l'innovation industrielle: Méthodologie de conception de l'innovation*: CNRS.

Persson, H. (2004). *Modelling and experimental studies of PC/ABS at large deformations.* Master Thesis, Lund University.

Pham, D. T., & Gault, R. S. (1998). A comparison of rapid prototyping technologies. *International Journal of Machine Tools & Manufacture, 38*(10), 1257-1287.

Ponche, R. (2013). *Méthodologie de conception pour la fabrication additive, application à la projection de poudre.* PhD, Genie Mecanique, SPIGA, Ecole Centrale de Nantes.

Redford, A. H., & Chal, J. (1994). *Design for assembly: principles and practice: McGraw-Hill.*

Rejagopalan, S., & Cutkosky, M. R. (1998). *Tolerance Representation for Mechanism Assemblies in Layered Manufacturing*. Paper presented at the 1998 ASME DETC/DFM Conference, Atlanta.

Requicha, A. A., & Voelcker, H. B. (1977). *Constructive solid geometry*: Production Automation Project , University of Rochester.

Rivette, M. (2007). *Méthodologie d'obtention d'outillage rapide par l'assemblage de composants élémentaires hybrides.* PhD, Nantes.

Rodrigue, H. (2010). *Méthodologie de conception et d'optimisation de mécanismes fabriqués par fabrication rapide.* Master Thesis, Ecole Polytechnique de Montréal.

Rodrigue, H., Rivette, M., Calatoru, V., & Richir, S. (2011). *Une méthodologie de conception pour la fabrication additive.* 9e Congres International de Genie Industriel

Roy, R., Hinduja, S., & Teti, R. (2008). Recent adavances in engineering design optimisation : Challenges and future trends. *CIRP Annals - Manufacturing Technology, 57*(2), 697-715.

Sachs, E., Cima, M., & Cornie, J. (1990). Three-Dimensional Printing: Rapid Tooling and Prototypes Directly from a CAD Model. *CIRP Annals - Manufacturing Technology, 39*(1), 201-204.

Sagawa, R., Sakashita, K., Kasuya, N., & Kawasaki, H. (2012). *Grid-Based Active Stereo with Single-Colored Wave Pattern for Dense One-shot 3D Scan* Paper presented at the 3DIMPVT, Zurich.

Segonds, F. (2011). *Contribution à l'intégration d'un environnement collabortatif en conception amont de produit.* PhD, ENSAM.

Shukor, S. A., & Axinte, D. A. (2009). Manufacturability analysis sytem : issues and future trends. *International Journal of Production research, 47*(5), 1369-1390.

Strano, G., Hao, L., Everson, R. M., & Evans, K. E. (2012). A new approach to the design and optimisation of support structures in additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 66*(9-12), 1247-1254.

Sun, K., Wei, T., Ahn, B. Y., Seo, J. Y., Dillon, S. J., & Lewis, J. A. (2013). 3D Printing of Interdigitated Li-Ion Microbattery Architectures. *Advanced Materials, 25*(33), 4539-4543.

Takezawa, A., Nishiwaki, S., Izui, K., & Yoshimura, M. (2006). Structural Optimization Using Function-Oriented Elements to Support Conceptual Designs. *Journal of Mechanical Design, 128*(4), 689-700.

Teitelbaum, G. (2009). *Proposed build guidelines for use in fused-deposition modeling to reduce build time and material volume.* Master of science in mechanical engineering, University of Maryland.

Tolosa, I., Garcianda, F., Zubiri, F., Zapirain, F., & Esnaola, A. (2010). Study of mechanical properties af AISI 316 stainless steel processed by "selective laser melting", following different manufacturing strategies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 51*(5-8), 639-647.

Tomiyama, T., Gu, P., Jin, Y., Lutters, D., Kind, C., & Kimura, F. (2009). Design Methodologies : Industrial and educational applications. *CIRP Annals - Manufacturing Technology.*

Vaezi, M., Chianrabutra, S., Mellor, B., & Yang, S. (2013). Multiple material additive manufacturing – Part 1: a review. *Virtual and Physical Prototyping, 8*(1), 19-50.

Vasile, M. J., Friedrich, C. R., Kikkeri, B., & McElhannon, R. (1996). Micrometer-scale machining: tool fabrication and initial results. *Precision Engineering, 19*(2-3), 180-186.

Vayre, B., Vignat, F., & Villeneuve, F. (2012a). Designing for Additive Manufacturing. *Procedia CIRP, 3, 632-637.*

Vayre, B., Vignat, F., & Villeneuve, F. (2012b). États des lieux des technologies de fabrication additive métallique. *Mechanics and Industry, 13*, 89-89.

Wang, J., Evans, A. G., Dharmasena, K., & Wadley, H. N. G. (2003). On the performance of truss panels with Kagomé cores. *International Journal of Solids and Structures, 40*(25), 6981-6988.

Weller, C., Kleer, R., & Piller, F. T. (2015). Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited. *International Journal of Production Economics, 164*, 43-56.

Xia, Q., & Wang, M. (2008). Simultaneous optimization of the material properties and the topology of functionally graded structures. *Computer aided Design, 40*(6), 660-675.

Yagnik, D. (2014). *Fused Deposition Modeling – A Rapid Prototyping technique for Product Cycle Time Reduction cost effectively in Aerospace Applications.* Paper presented at the International Conference on Advances in Engineering & Technology.

Yan, X., & Gu, P. (1996). A review of rapid prototyping technologies and systems. *Computer-Aided Design, 28*(4), 307-318.

Ziemian, C., Sharma, M., & Ziemian, S. (2012). *Anisotropic Mechanical Properties of ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modelling.*

METHODOLOGIE DE CONCEPTION POUR LA REALISATION DE PIECES EN FABRICATION ADDITIVE

RESUME : Le but de cette thèse est de proposer une méthodologie de conception pour la réalisation de pièces en fabrication additive (FA). Par rapport aux familles de procédés de fabrication standard que sont l'enlèvement de matière, la déformation plastique et la fusion, les procédés de FA présentent des caractéristiques nouvelles permettant la fabrication de pièces en multimatériaux, d'assemblages indémontables ou encore de formes complexes. L'arrivée de cette nouvelle technologie implique un changement de paradigme nécessitant l'accompagnement des concepteurs dans leurs missions de développement de produits de qualité. De plus les caractéristiques mécaniques et l'état de surfaces des pièces obtenues en FA dépendent de leur orientation au moment de la réalisation. Par ailleurs, en fonction du procédé, de la géométrie souhaitée et de cette orientation, il peut être nécessaire d'intégrer du support afin d'assurer la fabricabilité de la pièce. Nous avons donc défini une méthodologie de conception, qui respecte l'intégrité de la chaine numérique et dont la finalité est la production d'un modèle numérique tranché prêt à être fabriqué sur une machine de FA. Pour ceci, notre méthodologie se base sur les données du cahier des charges fonctionnel (CDCF) et les connaissances métier du procédé renseignées par le concepteur afin de lui proposer automatiquement un premier solide dont la géométrie satisfait toutes ces contraintes. Une étape d'optimisation topologique vient ensuite restreindre le volume de matière utile de la pièce afin de limiter son poids, son coût et le temps de fabrication. Enfin, si nécessaire, un support optimisé assurant la fabricabilité de la pièce est généré selon ces mêmes critères. Cette méthodologie s'accompagne d'un cas d'étude industriel ainsi que de deux expérimentations visant à observer la possibilité d'un parachèvement à l'acétone sur des pièces réalisée en ABS. La première expérimentation est un plan d'expérience mesurant l'état de surface obtenu en s'appuyant sur la température de l'acétone, le temps d'opération, l'inclinaison des surfaces de la pièce et son épaisseur. La seconde expérimentation est un test de traction visant à observer une modification de la tenue mécanique de pièces soumises à ce traitement. Indépendamment du type de machine et du procédé de FA, la méthodologie que nous proposons est un premier pas concret vers l'obtention de pièces directement conformes, que ce soit pour des besoins industriels ou domestiques.

Mots clés : méthodologie de conception, fabrication additive, fabrication rapide, support, CAO

NUMERICAL SIMULATION OF BUFFET FOR AIRFOILS IN TRANSONIC REGIME

ABSTRACT : The aim of this thesis is to propose a design methodology to produce parts using additive manufacturing (AM). Compared to standard manufacturing processes, as machining, forming, casting or molding, AM processes have new features for manufacturing multi-material parts, nondetachable assemblies or complex shapes. The arrival of this new technology involves a paradigm shift that requires support to designers to develop quality products. Also the mechanical and finishing specifications of the parts obtained by AM depend on their orientation during the manufacturing. Furthermore, depending on the process, the desired geometry and the orientation, it could be necessary to integrate a support in order to ensure manufacturability of the part. We define a design methodology that respects the integrity of the digital channel and whose purpose is to produce a sliced numerical model ready to be manufactured on an AM machine. For this, our methodology is based on data from functional specification and business knowledge of the process indicated by the designer, to automatically propose a first solid geometry which satisfies all these requirements. After this first step, a step of topological optimization restricts the volume of the part in order to reduce its weight, cost and manufacturing time. Finally, if necessary, optimized support ensuring the manufacturability of the part is generated according to the same criteria. This methodology is accompanied by an industrial case study as well as of two experiments to observe the possibility to finish parts made of ABS with acetone. The first experiment is an experimental design which measures the obtained surface finish based on the temperature of the acetone, the operating time, the inclination of the surfaces of the piece and its thickness. The second experiment is a tensile stress test designed to observe a change in the mechanical resistance of the part. Regardless of the type of machine and the AM process, the methodology we propose is a first concrete step towards obtaining directly compliant parts, whether for industrial or domestic use.

Keywords : design methodology, additive manufacturing, rapid manufacturing, support, CAD

ARTS ET MÉTIERS ParisTech

ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY