



HAL
open science

Méthodologie de conception pour la fabrication additive, application à la projection de poudres

Rémi Ponche

► **To cite this version:**

Rémi Ponche. Méthodologie de conception pour la fabrication additive, application à la projection de poudres. Génie mécanique [physics.class-ph]. Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2013. Français. NNT: . tel-00916534

HAL Id: tel-00916534

<https://theses.hal.science/tel-00916534>

Submitted on 10 Dec 2013

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.

Ecole Centrale de Nantes

ÉCOLE DOCTORALE

SPIGA « Sciences Pour l'Ingénieur, Géosciences, Architecture »

Année 2013

N° B.U. :

Thèse de DOCTORAT

Spécialité : GENIE MECANIQUE

Présentée et soutenue publiquement par :

REMI PONCHE

le 23 octobre 2013
à Ecole centrale Nantes

TITRE

**METHODOLOGIE DE CONCEPTION POUR LA FABRICATION ADDITIVE,
APPLICATION A LA PROJECTION DE POUDRES**

JURY

Président :

Rapporteurs : Lionel ROUCOULES
Philippe BERTRAND

Professeur des universités, Arts et Métiers ParisTech, Aix en Provence
Maître de conférences HDR, Ecole nationale d'ingénieurs de Saint-Etienne

Examineurs : Emmanuel DUC
Eric BOILLAT
Mickael RIVETTE
Jean-Yves HASCOËT
Pascal MOGNOL
Olivier KERBRAT

Professeur des universités, Institut Français de Mécanique Avancée, Clermont-Ferrand
Professeur assistant, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
Maître de conférences, Arts et Métiers ParisTech, Angers
Professeur des universités, Ecole Centrale Nantes
Professeur des universités, ENS Cachan Antenne de Bretagne
Maître de conférences, ENS Cachan Antenne de Bretagne

Invité : Philippe BAUER

Ingénieur, responsable des opérations de convergence technologiques. Thales Air Systems

Directeur de thèse : Jean-Yves Hascoët / Pascal Mognol

Co-encadrant : Olivier Kerbrat

Laboratoire : Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes, UMR CNRS 6597

N° ED

Remerciements

A l'issue de la rédaction de ce manuscrit, je suis convaincu que la thèse est loin d'être un travail solitaire. En effet, je n'aurais jamais pu réaliser ce travail doctoral sans le soutien et les remarques d'un grand nombre de personnes dont la générosité, la bonne humeur et l'intérêt manifestés à l'égard de ma recherche m'ont permis de progresser dans cette phase délicate de la formation à la recherche par la recherche.

En premier lieu, je souhaite remercier mes directeurs de thèse Pascal Mognol et Jean-Yves Hascoët pour la confiance qu'ils m'ont témoigné tout au long de ces trois années. La liberté que vous m'avez donné m'a permis de m'épanouir et de réellement m'approprier mes travaux de recherche. Toujours très disponibles malgré vos responsabilités, vous m'avez également soutenu et encouragé dans les périodes de doutes. Mes remerciements vont conjointement à mon co-encadrant de thèse Olivier Kerbrat pour l'aide qu'il m'a apporté au cours de ce travail. Son intérêt, sa disponibilité, son suivi quotidien de mes travaux et ses précieux conseils m'ont été d'un grand profit. Je garderais un très bon souvenir de nos réunions à quatre au cours desquelles le débat était toujours constructif.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'évaluer ce travail de thèse. Je remercie tout particulièrement Lionel Roucoules et Philippe Bertrand pour avoir accepté de rapporter ce mémoire et pour leurs retours constructifs.

Ces travaux de thèse ont été réalisés dans le cadre de l'équipe MO2P de l'IRCCyN, j'aimerais donc remercier l'ensemble de ses membres pour les conseils qu'ils ont pu m'apporter et pour les agréables moments passés lors de mes venues à Nantes. Je voudrais tout particulièrement remercier Gilles Carabin et Thierry Broquin pour leur aide technique, mais pas que, concernant la machine CLAD ainsi que pour les discussions enrichissantes que nous avons pu avoir. Merci également à Coko et David pour les petites discussions autour d'un bon café.

La grande majorité de ce travail de thèse a été réalisée au sein de l'antenne de Bretagne de l'ENS Cachan, établissement que j'ai finalement côtoyé pendant sept ans. J'aimerais donc chaleureusement remercier son personnel et en particulier l'équipe pédagogique du département Mécatronique qui m'a tout d'abord subit en tant qu'élève et qui m'a par la suite accueilli en tant que moniteur. J'aimerais également remercier l'équipe des chasseurs : Régis, Philippe B., Philippe B., Seb, Cécile et Patrick pour leur bonne humeur et les bons moments passés ensemble. Ce travail de thèse aurait été beaucoup plus difficile

au quotidien sans mes co-bureaux je veux donc les remercier dans l'ordre d'apparition Marianne, Judicaël, Florent, Pierre H, Roman. Merci à vous pour tous ces petits moments perdus et non moins indispensables. Bon courage à Florent et Benoit pour leur dernière année. Pierre M., je te le confirme, nos nombreuses discussions ont été très importantes pour cette thèse tant pour les idées qu'elles m'ont donné que pour le réconfort qu'elles m'ont apporté. Je suis heureux d'être aujourd'hui encore ton collègue.

J'ai appris que le bon déroulement d'une thèse nécessite de savoir se couper de temps en temps de son sujet. Les moments passés en famille et entre amis sont alors indispensables. Je voudrais ici remercier toutes ces personnes qui m'ont soutenu en dehors du travail. Cette thèse est l'aboutissement de longues années d'études dont je dois la réussite entre autre à mes parents et à Cécile. Ils m'ont toujours soutenu et ont su créer un climat serein dans lequel j'ai pu m'épanouir. Je sais que je leurs dois également cette curiosité scientifique qui m'a donné l'envie de débiter ces travaux. Je pense également à mes grands parents qui ne sont évidemment pas non plus pour rien dans tout ça.

Merci également à mes amis, gais lurons et autres troubles fêtes sans qui ma vie serait plus monotone!! Je parle évidemment de vous les amis (ex ou pas) Rennais Pierre M. (donc), Claire, Dédé, Cyril, Yann,... et (ex ou pas) Parisiens Raph, Anne-Laure, Bert, Julie, Pépé, Julie Rose, Julien, tata...

Merci à Jean-Yves et Dominique grâce à qui je suis sûr de ne pas mourir de faim. Dominique ma thèse est finie, tu vas pouvoir me montrer tous les articles de presse sur les docteurs...

Pour finir, je souhaite de tout mon cœur remercier ma femme qui est venue me rejoindre à Rennes au début de cette aventure. Elle l'a vécue à mes cotés et m'a toujours soutenue dans mes choix. Merci Marion pour tout et encore plus. Promis la prochaine fois c'est moi qui te suis.

Table des matières

Table des figures.....	ix
Liste des tableaux.....	xii
CHAPITRE 1 - Contexte général de l'étude.....	1
1 Évolution de la fabrication	2
2 La fabrication additive	4
2.1 Applications et opportunités	4
2.1.1 Des domaines d'application divers	4
2.1.2 Des opportunités à exploiter	5
2.2 Une famille de procédés relativement récente	8
2.2.1 Historique	8
2.2.2 Conséquences : un manque de recul vis-à-vis de ces procédés	8
2.3 Les verrous à l'utilisation industrielle de la fabrication additive	10
2.4 Nécessité d'une méthode d'aide à la conception orientée fabrication additive	11
3 Synthèse	12
CHAPITRE 2 - État de l'art et problématique.....	15
1 L'intégration des connaissances métiers en conception	16
1.1 Définition de l'ingénierie intégrée	16
1.2 Conception pour l'X	17
1.3 Le concept du DFM	18
1.3.1 Définition et objectifs du concept DFM	18
1.3.2 Classification des méthodes DFM	19
1.3.3 La conception à partir de la fabrication	20
1.4 L'optimisation dans la démarche de conception de produits	22
1.4.1 Formulation d'un problème d'optimisation	22
1.4.2 Typologie des problèmes d'optimisation	23
2 Les caractéristiques des procédés additifs	26
2.1 Impacts de la stratégie de fabrication sur les caractéristiques des pièces produites	26
2.1.1 Impacts de l'orientation de fabrication sur les caractéris- tiques des pièces	28

2.1.2	Impacts des trajectoires de fabrication sur les caractéristiques des pièces	31
2.2	Quelle approche DFM pour la fabrication additive?	33
3	Les méthodes DFAM existantes	35
3.1	Les méthodologies de choix de procédés	35
3.2	Méthodes existantes d'aide à la conception pour la fabrication additive	36
3.2.1	Prise en compte des caractéristiques de type contrainte . . .	36
3.2.2	Prise en compte des caractéristiques de type opportunité . .	37
3.3	Synthèse	39
4	Problématique de nos travaux	41
CHAPITRE 3 - Méthodologie DFAM proposée		43
1	Vision générale	44
1.1	La structure de la méthodologie	44
1.2	Les données nécessaires	46
1.2.1	Point de vue du procédé de fabrication	46
1.2.2	Point de vue du cahier des charges	47
2	Détails de la méthodologie	48
2.1	Définition du domaine de conception	49
2.1.1	Le concept	49
2.1.2	Détermination du domaine procédé	51
2.2	Définition de la géométrie théorique	58
2.2.1	Le principe	58
2.2.2	Illustration	59
2.3	Détermination de la géométrie réaliste	60
2.3.1	Le principe	60
2.3.2	Illustration	62
2.4	Sélection et classement des solutions viables	62
3	Synthèse	64
CHAPITRE 4 - Application à la projection de poudres		67
1	Le procédé de fabrication par projection de poudres	68
2	Modélisation multi-physique du procédé	71
2.1	État de l'art	71
2.1.1	Modélisation empirique	71
2.1.2	Modélisation numérique	72
2.1.3	Synthèse de l'état de l'art	75
2.2	Proposition d'un modèle complet pour la machine CLAD.	76
2.2.1	Modélisation thermique	76
2.2.2	Modélisation mécanique	78
2.2.3	Modélisation géométrique	79
2.2.4	Analyse des déplacements (verrou 1)	82
2.2.5	Diminution du temps de calcul (verrou 2)	86
2.2.6	Simulation d'une géométrie complexe (verrou 3)	89
2.3	Synthèse sur le modèle finalement proposé	93

3	Méthode de choix des stratégies de trajectoire	95
3.1	État de l'art	96
3.1.1	La génération de trajectoire	96
3.1.2	Les règles métier	96
3.1.3	Synthèse de l'état de l'art	97
3.2	Propositions	98
3.2.1	Proposition de règles métier (verrou 1)	98
3.2.2	Proposition d'une nouvelle méthode de génération de tra- jectoire (verrou 2)	99
3.3	Détail de l'approche proposée	102
3.3.1	Tranchage	102
3.3.2	Détermination du type de structure	102
3.3.3	Définition topologique de la trajectoire	103
3.3.4	Définition géométrique de la portion de trajectoire associée à une tranche	105
3.3.5	La trajectoire complète	107
3.3.6	Évaluation de la trajectoire sélectionnée	110
3.4	Synthèse sur la méthode de choix des stratégies de trajectoire	113
4	Synthèse générale	115
4.1	Bilan	115
CHAPITRE 5 - Exemples applicatifs		117
1	Conception d'une turbine	118
1.1	Problème initiale	118
1.2	Définition du domaine de conception	119
1.3	Définition de la géométrie théorique	120
1.4	Définition de la géométrie réaliste	121
1.5	Résultat	122
1.6	Conclusion	123
2	Système de fixation de câblage de chez Airbus	124
2.1	Présentation du problème	124
2.2	Définition du domaine de conception	124
2.2.1	Les entités fonctionnelles	124
2.2.2	Définition des volumes obligatoires	125
2.2.3	Définition du volume admissible	126
2.3	Optimisation fonctionnelle	126
2.4	Génération de trajectoire	128
2.5	Résultats et conclusion	128
CHAPITRE 6 - Synthèse générale et perspectives		131
1	Synthèse des travaux effectués	132
2	Les apports de nos travaux	135
3	Perspectives	136
CHAPITRE A - Propriétés matériau		139

Bibliographie	143
---------------------	-----

Table des figures

1.1	Évolution du paradigme de la fabrication [Koren, 2010].	2
1.2	Évolution du nombre de machines industrielles de fabrication additive vendues [Wohlers, 2012].	4
1.3	Application des procédés de fabrication additive (en %) [Wohlers, 2012]. . .	5
1.4	Évolution de la proportion de la fabrication directe parmi les applications de la fabrication additive d'après [Wohlers, 2002] et [Wohlers, 2012].	6
1.5	Exemples de mises à profit de la liberté de conception offerte par la fabrication additive.	7
1.6	Les principaux atouts de la fabrication additive.	7
1.7	Comparaison de l'historique de l'usinage moderne et de la fabrication additive. . .	9
1.8	Position de la fabrication directe dans le cycle de <i>hype</i> proposé par Gartner [Fenn et al., 2009].	9
1.9	Illustration de la mauvaise maîtrise de la capabilité des procédés additifs . .	10
2.1	Illustration du phénomène "over the wall" qu'engendre une approche d'ingénierie séquentielle [Ranky, 1994].	16
2.2	Les coûts engagés au cours du cycle de vie d'un produit [Swift and Booker, 2003].	17
2.3	Représentation schématique du concept de DFX [Herrmann et al., 2004]. . .	18
2.4	Principe de l'optimisation paramétrique.	23
2.5	Principe de l'optimisation de forme.	24
2.6	Principe de l'optimisation topologique continue.	24
2.7	Principe de l'optimisation topologique par éléments discrets.	25
2.8	Exemples de pièces tests utilisées pour caractériser les procédés additifs [Moylan et al., 2012].	26
2.9	Comparaison économique des procédés de lit de poudre (SLS) et de moulage sous pression (HPDC) en fonction du nombre d'assemblages à produire [Atzeni and Salmi, 2012].	27
2.10	Illustration d'une portion de stratégie de fabrication.	28
2.11	Estimation du coût de fabrication d'un cylindre en ABS de diamètre 20 mm en fonction de l'orientation de fabrication choisie [Tagore et al., 2007].	29
2.12	Illustration de l'impact, concernant le besoin de support, d'une fabrication 5 axes positionnés (b) ou 5 axes continus (c), par rapport à une 3 axes (a).	29
2.13	Mesures expérimentales de l'impact de la position angulaire d'une surface plane par rapport à l'orientation de fabrication sur la rugosité pour trois hauteurs de couche différentes [Canellidis et al., 2009].	30

2.14	Illustration de l'impact de l'orientation de fabrication sur l'état de surface : cas d'une orientation unique (a), cas d'une orientation adaptée (b).	31
2.15	Géométrie réellement fabriquée avec une stratégie de type balayage (a) et avec une stratégie de type spirale (b) [Bo et al., 2012].	33
2.16	Illustration de l'exploration des opportunités de la fabrication additive grâce à l'utilisation de l'optimisation topologique (à partir de [Tomlin and Meyer, 2011]).	38
2.17	Structure en treillis proposée par <i>D.W. Rosen</i> [Rosen, 2007].	39
2.18	État de l'art de la chaîne numérique en fabrication additive.	40
2.19	Intégration de notre méthodologie dans la chaîne numérique en fabrication additive.	41
3.1	Structure de la méthodologie proposée.	45
3.2	Cahier des charges de la pièce exemple.	48
3.3	Principales caractéristiques de la machine Mojo, utilisant le procédé de dépôt de fil fondu.	49
3.4	Schématisme de l'étape de définition du domaine de conception et des données nécessaires.	49
3.5	Illustration de la définition du domaine fonctionnel.	50
3.6	Algorigramme de la méthodologie permettant la détermination du domaine procédé.	52
3.7	Algorigramme de l'étape de délimitation du problème de conception.	53
3.8	Illustration de l'étape de délimitation du problème de conception.(as) volume englobant les entités fonctionnelles étudiées, (b) L'espace de travail ne contraint pas le choix de l'orientation de fabrication, (c) L'espace de travail contraint le choix de l'orientation de fabrication.	53
3.9	Détermination du groupe d'entités fonctionnelles et des orientations de fabrication associées	55
3.10	Algorigramme détaillant la définition des volumes obligatoires.	55
3.11	Illustration de la définition des volumes obligatoires.	56
3.12	Définition de V_{a_1} dans le cas de notre exemple.	57
3.13	Détermination du domaine de conception pour la pièce test avec \vec{T}_1 l'orientation de fabrication choisie.	57
3.14	Obtention de la géométrie théorique de la pièce dans le cas de la pièce exemple.	60
3.15	Algorigramme de détermination de la géométrie réaliste.	61
3.16	Détermination d'une géométrie réaliste dans le cas de la pièce exemple.	63
4.1	Nombre de publications portant sur la fabrication par projection de poudres entre 1985 et 2006 [Dubourg and Archambeault, 2008].	68
4.2	Principe du procédé de fabrication par projection de poudres, dans le cas d'une projection coaxiale continue.	69
4.3	Exemple de pièces allégées à parois minces : (a) pièce aéronautique ¹ de structure en titane (b) rotor de turbine	69
4.4	Extrait de la méthodologie proposée.	71
4.5	Schématisme des phénomènes définissant la géométrie finale des pièces fabriquées par projection de poudres.	73

4.6	Schématisation des phénomènes définissant la géométrie finale des pièces fabriquées par projection de poudres.	77
4.7	Analyse du faisceau laser dans trois plans distincts.	78
4.8	Schématisation des phénomènes définissant la géométrie finale des pièces fabriquées par projection de poudres.	79
4.9	Schématisation des phénomènes définissant la géométrie finale des pièces fabriquées par projection de poudres.	80
4.10	Répartition schématique du flux de poudre de la sortie de la buse jusqu'au substrat.	80
4.11	Illustration du modèle du processus d'ajout de matière.	81
4.12	Caractéristiques de la pièce test et du maillage correspondant.	83
4.13	Comportement cinématique de la machine lors de la fabrication de la pièce test.	84
4.14	Comparaison des valeurs expérimentales et théoriques.	85
4.15	Zoom sur les géométries mesurées (a) et simulées (b) en début de cordon.	87
4.16	Comparaison des géométries simulées et fabriquées, dans le cas de la simulation complète.	88
4.17	Analyse de la géométrie du bain de fusion à l'instant $t = 4, 2s$	88
4.18	Comparaison des géométries simulées et fabriquées, dans le cas de la simulation simplifiée.	89
4.19	Description de la géométrie de la pièce test.	90
4.20	Comparaison entre les hauteurs mesurées et simulées pour 1 couche déposée.	91
4.21	Comparaison de la section du dépôt en trois endroits distincts du dépôt.	91
4.22	Comparaison des hauteurs mesurées et simulées pour 10 couches déposées.	92
4.23	Extrait de la méthodologie proposée.	95
4.24	Illustration de la relation directe entre la géométrie et la trajectoire dans le cas de pièces à parois minces.	97
4.25	Schématisation de l'impact de la variation de d_{bs} sur les conditions de fabrication.	99
4.26	Schématisation des problèmes que peut engendrer une variation brusque du paramètre d_{bs}	100
4.27	Algorithme décrivant la définition des trajectoires de fabrication à partir de la géométrie théorique des pièces.	101
4.28	Pièce exemple.	102
4.29	Description de la géométrie d'une tranche.	103
4.30	Détermination du squelette topologique d'une tranche de la pale étudiée.	104
4.31	Détermination et adaptation du modèle graphe de la trajectoire pour répondre aux règles métier 1 et 2.	106
4.32	Ensemble exhaustif des possibilités de graphes compatibles avec le domaine de conception et répondant aux règles procédé (Eulerien ou semi-Eulerien).	107
4.33	Génération de la portion de trajectoire correspondant au choix de topologie effectué pour la première tranche étudiée.	108
4.34	Géométrie de la portion de trajectoire correspondant à la seconde tranche étudiée permettant une continuité avec la première.	109
4.35	Ensemble de la trajectoire continue correspondant aux choix de topologie et de sens de parcours effectués.	110

4.36	Estimation de la géométrie réelle de la pale dans le cas où trajectoire présentée figure 4.35 est utilisée pour la fabriquer.	110
4.37	Modèle CAO de la pale correspondant à trajectoire définie après surfacage.	111
4.38	Comparaison, en termes de fabricabilité, des différentes trajectoires possibles et identification de la meilleure.	112
4.39	Modèle CAO correspondant à la trajectoire optimale d'un point de vue fabricabilité.	113
5.1	Spécification locales issues du cahier des charges fonctionnel de la turbine étudiée.	118
5.2	Analyse des orientations de fabrications possibles.	119
5.3	Volume de conception associé au problème étudié.	120
5.4	Données et résultats correspondant à la définition de la géométrie théorique des pâles.	121
5.5	Détermination d'une série possible de trajectoires de fabrication pour réaliser la turbine.	121
5.6	Simulation de la géométrie d'une pale correspondant à un dépôt de dix couches de matière.	122
5.7	Géométrie optimale de la turbine vis-à-vis des objectifs fixés.	123
5.8	Les données initiales du problème.	124
5.9	Surfaces fonctionnelles du problème.	125
5.10	Définition des volumes obligatoires.	125
5.11	Définition du volume admissible.	126
5.12	Géométrie théorique de la pièce résultant de l'optimisation topologique.	127
5.13	Trajectoire sélectionnée pour la fabrication de la pièce étudiée : en blanc la partie correspondant à la pièce et en jaune la partie correspondant au support.	128
5.14	Pièce fabriquée à l'échelle 1/5 avec la machine MOJO de chez Stratasys.	129

Liste des tableaux

2.1	Comparaison de la fabrication lit de poudre et du forgeage en termes de caractéristiques mécaniques pour l'acier inoxydable de type 316L [Tolosa et al., 2010].	27
4.1	Paramètres cinématiques limites correspondant à la machine CLAD.	83
4.2	Paramètres de fabrication utilisés pour le dépôt d'un cordon linéaire.	83
4.3	Paramètres de fabrication utilisés pour la fabrication de la pièce test.	86
4.4	Valeur des hauteurs et largeurs simulées et mesurées aux trois points particuliers étudiés.	92

5.1	Propriétés mécaniques du l'ULTEM 9085.	126
A.1	Propriétés de l'acier S235 [Construiracier, 2013].	140
A.2	Propriétés de l'acier inoxydable 316L [Valiorgue, 2008, Depradeux, 2004]. . .	141

Glossaire

Cahier des charges fonctionnel : document formulant le besoin, au moyen de fonctions détaillant les services rendus par le produit et les contraintes auxquelles il est soumis.

CAO : Conception Assistée par Ordinateur. Un modèle CAO est un modèle numérique en trois dimensions représentant un objet dans un logiciel de CAO.

DFAM : Design For Additive Manufacturing. Cela correspond aux approches DFM appliquées à la fabrication additive.

DFM : Design For Manufacturing. Les méthodologies DFM ont pour but, pour la conception d'un produit, de considérer simultanément les contraintes et objectifs provenant du cahier des charges fonctionnel et du processus de fabrication envisagé. Il s'agit d'identifier et d'éviter les problèmes de fabrication au cours de la phase de conception du produit.

Domaine de conception : pour un problème de conception donné, c'est l'ensemble des volumes où la matière est à la fois autorisée par le cahier des charges fonctionnel et accessible pour le procédé de fabrication utilisé. Ce domaine est composé de volumes obligatoires, qui doivent contenir de la matière et de volumes admissibles, qui, en fonction des besoins, peuvent en contenir.

Fabricabilité : il s'agit de l'aptitude d'un produit à être réalisé facilement, de manière répétable et avec une qualité attendue.

FAO : Fabrication Assistée par Ordinateur. Il s'agit d'une aide numérique pour la préparation de la fabrication d'une pièce.

Lit de poudre : technologie de fabrication additive permettant la fabrication de pièces métalliques, plastiques et céramiques. Les pièces sont fabriquées en déposant successivement des couches de poudre de quelques dizaines de micromètres localement agglomérées par le passage d'un faisceau laser haute puissance.

Modèle géométrique réaliste : modèle géométrique dont les propriétés sont proches de celles de la géométrie réellement fabriquée.

Modèle géométrique théorique : modèle géométrique optimisé vis-à-vis d'objectifs et contraintes globales dont la fabricabilité n'est pas garantie.

Opération de tranchage : correspond à la découpe du modèle CAO des pièces en tranches par des plans dont la normale est définie par l'orientation de tranchage. Pour une pièce donnée, cette opération permet de définir les trajectoires de fabrication.

Orientation de fabrication : correspond, en chaque point de la trajectoire, à l'orientation suivant laquelle la matière est apportée.

Projection de poudre : technologie de fabrication additive permettant la fabrication de pièces métalliques, céramiques et multi-matériaux. Les pièces sont fabriquées avec le déplacement d'une tête de projection qui projette de la poudre dans un bain de fusion localement créé à l'aide d'un faisceau laser haute puissance.

Topologie : caractéristique s'apparentant à la forme générale de l'entité concernée.

Trajectoire de fabrication : correspond, dans le cas de la fabrication directe, au chemin parcouru par la source d'énergie au cours de la fabrication de la pièce.

Chapitre 1

Contexte général de l'étude

Ce premier chapitre présente **le cadre général de nos travaux**. Il s'agit de fournir au lecteur une vision du contexte scientifique dans lequel s'inscrivent nos travaux de thèse.

Le contexte actuel de la production manufacturière sera tout d'abord présenté. Cette analyse permettra d'expliquer **l'émergence de la fabrication additive** dans une production toujours plus contrainte en terme de temps et de coût de production.

La deuxième partie présentera **la nécessité de développement d'outils d'aide à la conception orientés pour la fabrication additive**. Ce constat, à l'origine de nos travaux de thèse, se fera à travers, d'une part, **l'analyse des opportunités** offertes par cette nouvelle famille de procédés et, d'autre part, par **l'étude des verrous** à son exploitation généralisée.

Outre la synthèse du contexte général de nos travaux, la troisième partie présentera **le plan retenu pour le présent manuscrit**.

1 Évolution de la fabrication des produits manufacturés

Au cours des deux derniers siècles, les besoins et les attentes du marché en pièces manufacturées ont évolué faisant radicalement changer le paradigme de leur fabrication (Fig. 1.1).

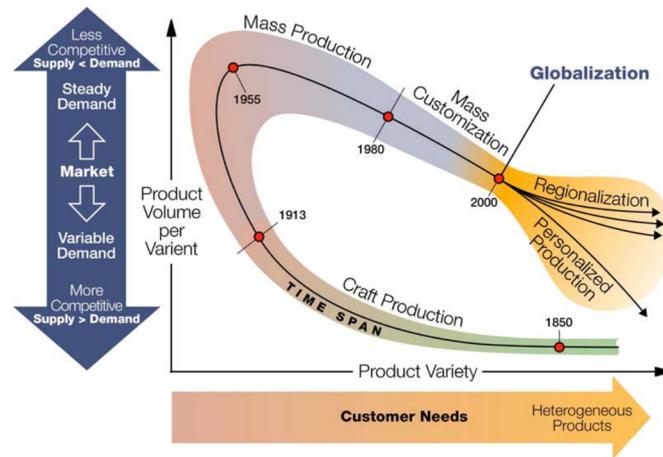


FIGURE 1.1 – Évolution du paradigme de la fabrication [Koren, 2010].

Les révolutions industrielles, puis les guerres mondiales sont les éléments déclencheurs du passage progressif d'une production artisanale (*craft production*) à une production de masse (*mass production*). La première est basée sur une main-d'œuvre qualifiée, utilisant des machines d'usage général pour faire de manière unitaire exactement le produit demandé par le client. À l'opposé, la production de masse répond à une demande supérieure à l'offre. Elle est basée sur la réalisation d'une gamme limitée de produits, fabriqués à volume élevé, par des moyens de production dédiés. Henry Ford et Louis Renault sont, respectivement aux États-Unis et en France, les premiers à appliquer ce type de production à l'industrie automobile [Marty and Linares, 1999].

La période de crise économique qui succède aux Trente Glorieuses voit, par la suite, l'émergence progressive de la personnalisation de masse (*mass customization*) qui répond au contexte d'une offre cette fois-ci supérieure à la demande [Pine and Davis, 1999]. Pour attirer de nouveaux clients et stimuler le marché, les entreprises doivent proposer une plus large variété de produits susceptibles de correspondre à différentes attentes des clients. Cette multiplication des modèles va se faire en passant par le développement de produits «à options» permettant au client de sélectionner la combinaison qu'il lui convient le mieux. Une telle approche permet aux entreprises de conserver une production de type massive, non plus à l'échelle des produits, mais à celle de leurs composants. Elle nécessite, cependant, de revoir la façon d'aborder le cycle d'industrialisation des produits.

Depuis le début des années 2000, ce type de production évolue avec le développement des outils informatiques et des moyens de communication et en particulier d'Internet. Ces derniers permettent entre autres de réduire, voire de supprimer, les intermédiaires entre le client et le fabricant. Dans le contexte actuel de saturation du marché associée à la raréfaction des matières premières, ces avancées poussent le concept de personnalisation

de masse à son paroxysme. C'est-à-dire à une production parfaitement personnalisée (*personalized production*) [Hu et al., 2011]. Elle répond au désir du client d'avoir, pour un coût raisonnable, exactement (ni plus ni moins) le produit dont il a besoin, et ce dans un délai limité. Ce concept a été récemment appliqué par de nombreuses entreprises. Nike¹ propose par exemple à ses clients, en plus de personnaliser leurs chaussures par le choix d'options, de concevoir eux-mêmes les images ou logos y figurant.

En ce qui concerne la production des produits mécaniques, depuis quelques années apparaît un nouveau marché porté par des entreprises comme Sculpteo², en France, ou 3T RPD³ en Angleterre. Elles proposent, à travers une interface web, de fabriquer les pièces ou produits unitaires imaginés et conçus par tout à chacun. Pour ce faire, elles utilisent des procédés de fabrication additive qui leurs permettent de fabriquer en petite série ou de manière unitaire, LA pièce que leur client a lui-même imaginée et définie pour répondre à son besoin, qu'il soit fonctionnel ou esthétique.

Ayant connu un développement important depuis 20 ans les procédés de fabrication additive sont aujourd'hui arrivés à une certaine maturité. Ils permettent de fabriquer, en petite série, des pièces à géométrie complexe, dans un délai et pour un coût raisonnables. D'autre part, les pièces produites peuvent répondre aux caractéristiques fonctionnelles attendues d'un produit final [Bourell et al., 2009]. La fabrication additive semble apparaître, dès lors, comme la réponse à la personnalisation de masse et plus encore à la production personnalisée. Avec l'apparition récente et très médiatisée de machines low-cost, certains parlent même d'une troisième révolution industrielle⁴ pouvant bouleverser l'industrie manufacturière telle que nous la connaissons actuellement.

Réalité ou fiction ? Le paragraphe suivant va permettre de faire la part des choses en analysant les réalités scientifiques et industrielles de la fabrication additive. Les opportunités puis les verrous à l'utilisation généralisée de cette famille de procédés seront présentés pour en dégager la problématique de nos travaux de thèse.

1. http://www.nike.com/fr/fr_lp/nikeid (25/06/2013)

2. <http://www.sculpteo.com> (25/06/2013)

3. <http://www.3trpd.co.uk/> (25/06/2013)

4. <http://www.economist.com/node/21552901> (25/06/2013)

2 La fabrication additive

La fabrication additive ou fabrication par ajout de matière regroupe l'ensemble des procédés permettant de fabriquer couche par couche, cordon par cordon ou point par point et par ajout de matière un objet physique à partir d'un modèle numérique. L'approche utilisée pour produire des pièces, avec cette famille de procédés, est radicalement différente de celle utilisée avec les méthodes de fabrication classiques telles que l'usinage, le moulage ou la mise en forme par déformation plastique. Ne nécessitant pas d'outillages dédiés ni de bruts de matière, les procédés additifs apportent de nouvelles perspectives quant au triptyque Produit-Process-Matériau. Leur emploi est aujourd'hui en pleine croissance comme le montre l'augmentation exponentielle depuis une vingtaine d'années du nombre de machines de production implantées dans l'industrie (Fig. 1.2).

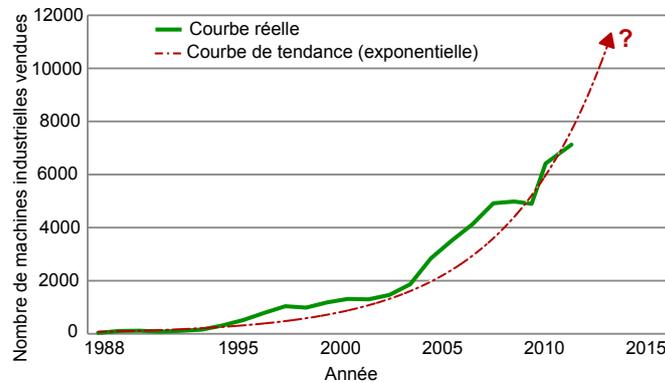


FIGURE 1.2 – Évolution du nombre de machines industrielles de fabrication additive vendues [Wohlers, 2012].

D'un autre côté, ce récent développement ne doit pas faire oublier qu'en comparaison avec des procédés de fabrication classiques, l'utilisation de la fabrication additive reste encore marginale. De plus, l'analyse de ses potentielles applications suggère que seulement 4 à 8% d'entre elles sont aujourd'hui exploitées [Wohlers, 2012]. Étant une famille de procédés relativement jeune, il est certain que le manque de visibilité de la fabrication additive parmi l'ensemble des procédés de fabrication explique, en partie, sa faible utilisation. L'existence d'un certain nombre de verrous scientifiques et techniques, associés à ces procédés, en est, cependant, la principale explication. Seule la levée de ces verrous permettra, réellement, une exploitation généralisée de la fabrication additive.

2.1 Applications et opportunités

2.1.1 Des domaines d'application divers

Initialement limitée à l'obtention de simples prototypes visuels, la fabrication additive est aujourd'hui employée industriellement pour trois principaux types d'application :

- Le prototypage au sens large.
- La fabrication d'outillages.
- La fabrication de pièces mécaniques fonctionnelles.

À chacune de ces applications, une terminologie particulière est utilisée : on parle de *prototypage rapide* ou d'*impression 3D* pour désigner l'obtention de prototype par ajout de matière, d'*outillage rapide* pour désigner celle d'outillages et de *fabrication rapide* ou de *fabrication directe* pour désigner celle de pièces fonctionnelles. La figure 1.3 montre la proportion en 2012 de ces applications dans l'industrie.

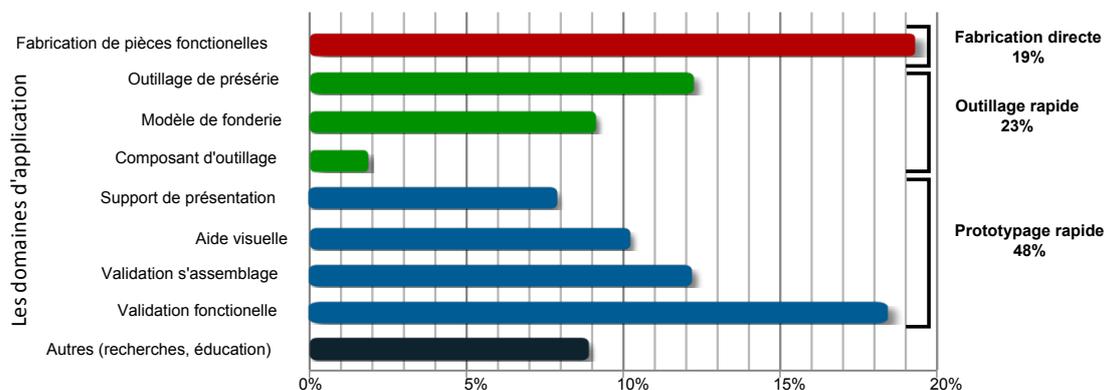


FIGURE 1.3 – Application des procédés de fabrication additive (en %) [Wohlers, 2012].

Nous constatons que le prototypage rapide est encore la principale application de la fabrication additive. Ne nécessitant pas d'outillages dédiés, l'obtention de prototypes, en très petites séries, par ajout de matière, permet une fabrication rapide pour un coût relativement faible. De plus, le prototype pouvant être obtenu dans différents matériaux, il peut servir aussi bien pour la validation visuelle que fonctionnelle du produit final réduisant ainsi doublement le temps de développement de ce dernier.

Concernant la réalisation d'outillage, les procédés additifs permettent suivant les cas de fabriquer plus rapidement ou d'augmenter la complexité des outillages, à coût équivalent, pour augmenter leur productivité [Nickels, 2009].

La fabrication directe est la plus récente catégorie d'application, elle est rendue possible grâce aux nombreux progrès qu'ont connus les procédés de fabrication additive ces dernières années. La fabrication directe ne représentait en effet qu'une très faible partie du marché il y a une dizaine d'années, elle en représente aujourd'hui déjà près de 20% (Fig. 1.4) [Wohlers, 2002, Wohlers, 2012]. Or les industriels et chercheurs concernés s'accordent à dire qu'elle n'est qu'au début de son développement. Principalement développée dans les secteurs de l'aéronautique, de l'automobile de luxe et du médical, elle correspond, actuellement, à l'obtention de pièces en petite série ayant des formes particulièrement complexes ou à l'obtention de pièces personnalisées [Wohlers, 2012].

2.1.2 Des opportunités à exploiter

Bien qu'encore limitées en quantité, les applications industrielles de la fabrication additive sont très diversifiées. Cette évolution s'explique par les différentes opportunités qu'offre une fabrication par ajout de matière par rapport aux autres principes de fabrication. Certains des potentiels intérêts d'une telle fabrication ont été cités dans le paragraphe précédent. Ils dépendent évidemment du contexte associé au produit à fabriquer et peuvent être, globalement, résumés en quatre principales opportunités.

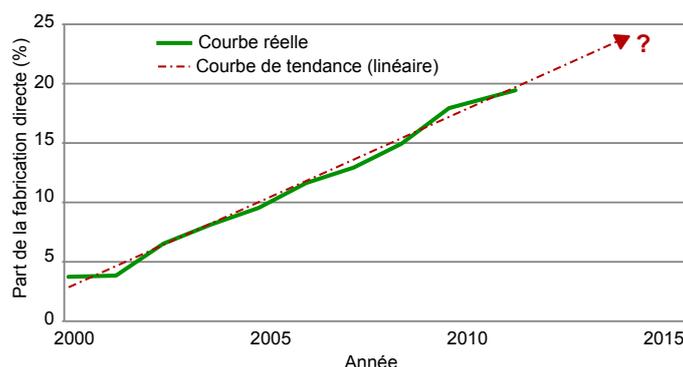


FIGURE 1.4 – Évolution de la proportion de la fabrication directe parmi les applications de la fabrication additive d'après [Wohlers, 2002] et [Wohlers, 2012].

1. **La liberté de conception.** Non limitées par l'utilisation d'un outillage ou par un brut initial, les pièces produites en fabrication additive peuvent comporter des caractéristiques difficiles, voire impossibles à réaliser avec un procédé de fabrication classique. Ces caractéristiques peuvent aussi bien concerner la géométrie de la pièce que le matériau la constituant, autorisant, entre autres, le développement des pièces multimatériaux [Muller et al., 2013b]. Ces nouvelles possibilités permettent de revoir la conception des produits mécaniques d'un point de vue fonctionnel, économique et environnemental [Huang et al., 2013]. La fonctionnalité d'un produit peut ainsi, par exemple, être optimisée grâce à une structure complexe spécifiquement conçue pour répondre au mieux à un cahier des charges donné (Fig. 2.8(a)). Son coût peut être réduit à travers la suppression d'assemblages de pièces (Fig. 2.8(b)). Enfin, dans le cas d'une pièce embarquée dans un véhicule, la réduction de sa masse, à performance fonctionnelle équivalente, permet une diminution de la consommation du véhicule et donc une diminution de son impact environnemental (Fig. 1.5(c)).
2. **L'efficacité environnementale.** Ne partant pas d'un brut initial, le processus de fabrication par ajout de matière permet, dans le principe, de n'utiliser que la matière constituant le produit final. La masse de matériau utilisé ainsi que, dans certains cas, l'énergie nécessaire à sa mise en forme sont ainsi minimisées [Mognol et al., 2006, Serres et al., 2011].
3. **La flexibilité.** Ne nécessitant pas d'outillages dédiés onéreux, la fabrication additive est parfaitement adaptée à la production petite série. Cette flexibilité permet d'avoir une production de type juste à temps qui supprime, par exemple, la nécessité de stock [Tuck et al., 2007].
4. **La personnalisation.** La liberté de conception associée à la production flexible, qu'offre la fabrication additive, permet d'obtenir des produits parfaitement adaptés aux besoins du client sans surcoûts par rapport à une production en série [Vasquez, 2009].

5. <http://compolight.dti.dk/> (25/06/2013)

6. <http://atkins-project.com/> (25/06/2013)

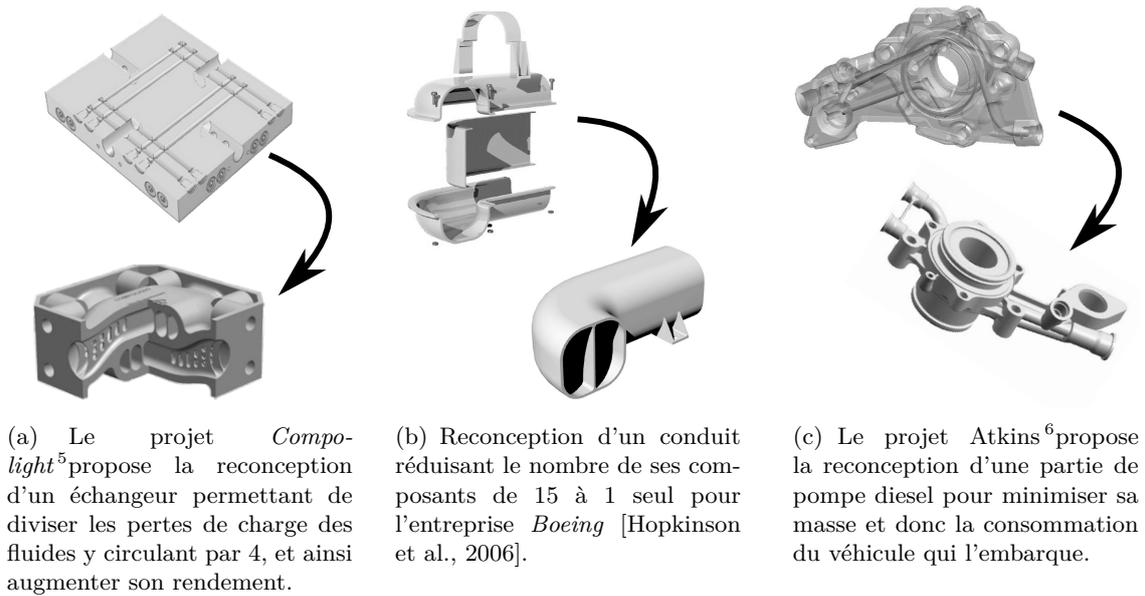


FIGURE 1.5 – Exemples de mises à profit de la liberté de conception offerte par la fabrication additive.

Ces quatre principaux atouts justifient le développement de la fabrication additive dans le cas des trois domaines d'application présentés précédemment. La figure 1.6 résume notre analyse de l'état de l'art des pièces produites jusqu'à aujourd'hui avec cette famille de procédés. Elle présente, pour chacun des trois principaux domaines d'application, le degré d'exploitation (*faible, moyen, élevé*) des quatre opportunités présentées précédemment (Fig. 1.6(a)). Cette figure permet de visualiser quels sont, pour chaque domaine d'application, les atouts de la fabrication additive identifiés comme déterminant quant à son utilisation. La figure 1.6(b) détaille ce même degré d'exploitation dans le cas particulier de la fabrication directe. Elle permet de visualiser, pour les trois principaux champs industriels d'utilisation de la fabrication directe (les industries aéronautiques, médicales et automobiles), les atouts de la fabrication additive expliquant son utilisation.

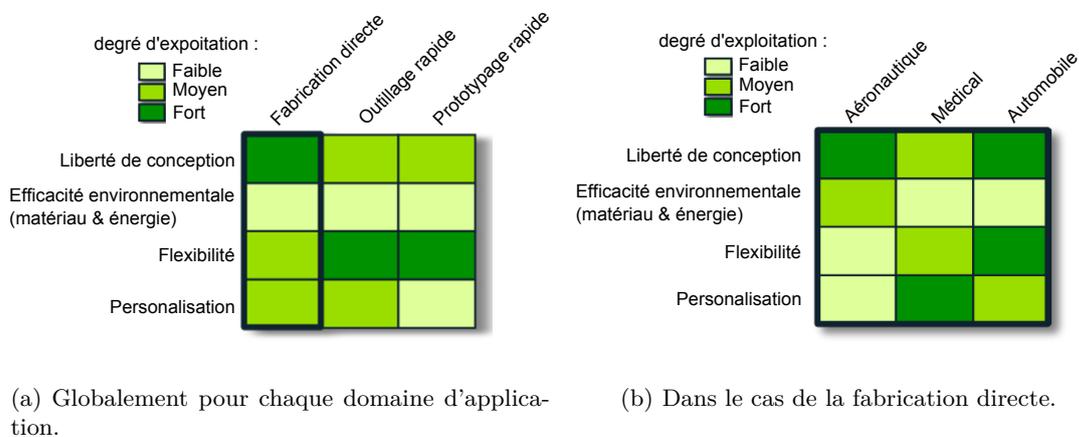


FIGURE 1.6 – Les principaux atouts de la fabrication additive.

L'enthousiasme que suscite la fabrication additive semble donc justifié par les opportunités qu'elle apporte. Comment expliquer alors sa faible pénétration du marché?

2.2 Une famille de procédés relativement récente

2.2.1 Historique

Le premier brevet associé à la fabrication additive date de 1892, Blather y propose une méthode pour l'obtention d'outillage pour la fabrication de cartes topographiques en relief [Blather, 1892]. À l'origine des techniques modernes de stratification, cette méthode consiste à fabriquer les deux parties d'un moule permettant l'obtention de cartes topographiques par empilage de plaques de cires initialement découpées suivant les lignes de niveau de la carte souhaitée. Il faut cependant attendre 1986 pour voir apparaître la première machine industrielle basée sur la technique de photo-polymérisation [Hull, 1986]. Elle permet l'obtention de pièces prototypes grâce à la solidification d'une résine liquide photosensible suite à son exposition couche après couche aux rayons ultraviolets [Bartolo, 2011]. Depuis, de nombreuses technologies ont été développées permettant la fabrication de pièces plastiques, métalliques et céramiques [Gibson et al., 2009, Wohlers, 2012, Yan et al., 2009]. En ce qui concerne les pièces métalliques, leur obtention par ajout de matière est progressivement rendue possible grâce aux améliorations de la technologie des lasers. Elle ne débute qu'à la fin des années 80 avec la technologie de frittage laser [Deckard, 1989], cette dernière ne permet cependant pas l'obtention de pièces denses. Elle est basée sur l'utilisation de deux matériaux sous forme de poudres, l'un ayant une température de fusion basse et l'autre des propriétés mécaniques élevées. Au cours du processus de fabrication, seul le premier est fondu pour servir de liant au second. Les pièces obtenues sont alors poreuses et ont de faibles caractéristiques mécaniques [Nachum and Fleck, 2011]. Ce n'est qu'une dizaine d'années plus tard que les premières pièces métalliques denses sont produites avec le procédé de fusion par faisceau d'électrons [Larson, 1998].

Aujourd'hui, trois technologies permettent l'obtention de pièces métalliques denses : la technologie par lit de poudre, la technologie par projection de poudre et la technologie par dépôt de fil [Ruan et al., 2006]. La première est basée sur une fabrication couche par couche, une fine couche de poudre est déposée sur un substrat, la poudre lui est alors localement agglomérée à l'aide d'une source d'énergie. Une fois la première couche terminée, le substrat est descendu permettant le dépôt d'une seconde couche de poudre et ainsi de suite jusqu'à la fabrication complète de la pièce souhaitée. Les deux autres technologies sont basées sur une fabrication cordon par cordon. Celui-ci est obtenu soit en projetant de la poudre dans un bain de fusion localisé [Xing et al., 2006], soit par la fusion d'un fil métallique [Horii et al., 2009].

Ces deux dernières technologies, plus récemment développées, apportent encore de nouvelles possibilités quant à la fabrication de pièces fonctionnelles, notamment car la buse de projection de poudre ou de dépôt de fil peut être associée à une structure porteuse multi-axes.

2.2.2 Conséquences : un manque de recul vis-à-vis de ces procédés

Bien que vieille de plus d'un siècle, l'approche « moderne » de la fabrication additive n'est donc développée que depuis 30 ans. La fabrication de pièces métalliques, quant à elle,

n'a été rendue possible que depuis une quinzaine d'années. La comparaison avec la famille de procédés classiquement utilisée qu'est l'usinage (Fig. 1.7) montre que le recul que peut avoir l'industrie vis-à-vis de la fabrication additive est très relatif. Par ailleurs, même si cela dépend encore des technologies, la fabrication directe est aujourd'hui techniquement possible, il existe d'ailleurs plusieurs cas d'applications réussis. L'analyse de l'historique du développement de la fabrication additive nous permet donc de positionner la fabrication directe au début de la phase de croissance du cycle de Gartner (Fig. 1.8) [Levy et al., 2003]. Cette phase caractérise, classiquement, les technologies dont la viabilité a été démontrée, mais dont l'utilisation est limitée par un manque de méthodologies et de normes associées.

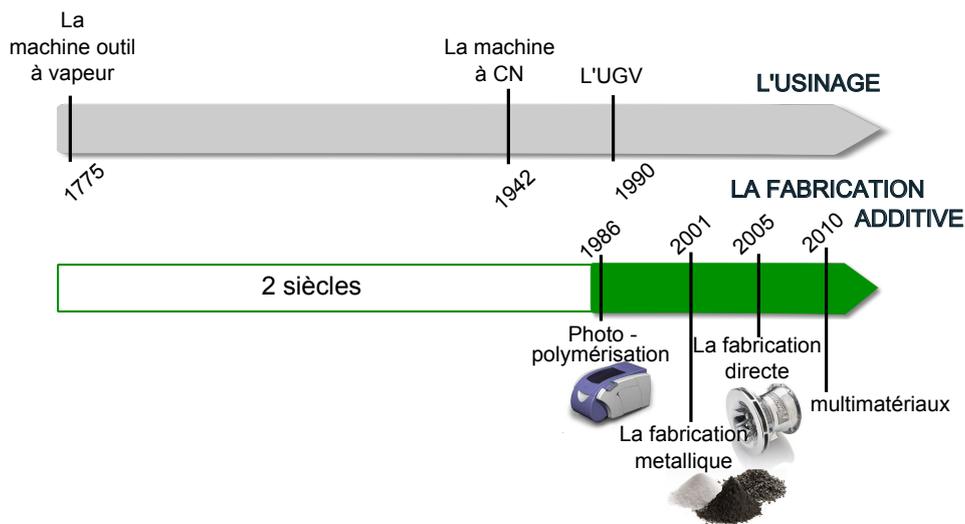


FIGURE 1.7 – Comparaison de l'historique de l'usinage moderne et de la fabrication additive.

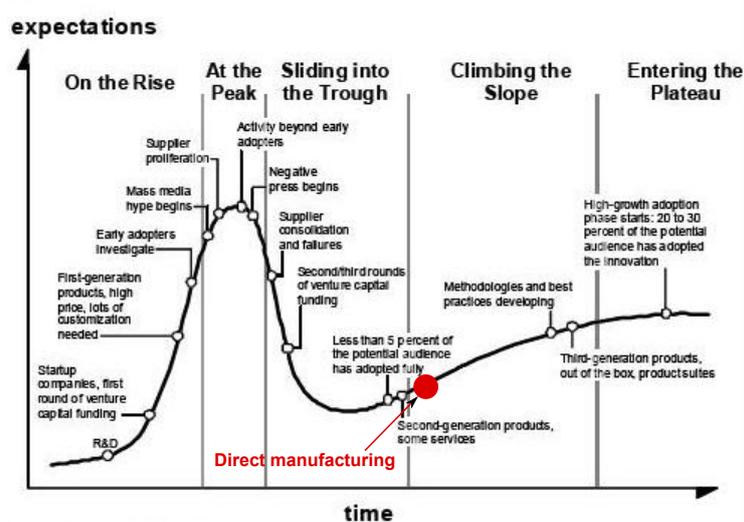


FIGURE 1.8 – Position de la fabrication directe dans le cycle de *hype* proposé par Gartner [Fenn et al., 2009].

2.3 Les verrous à l'utilisation industrielle de la fabrication additive

Nous avons vu que la fabrication additive est en plein développement. La mise en place de normalisations comme l'intégration des procédés additifs dans la norme STEP-NC, pilotée par l'ISO et développée par l'IRCCyN en est une bonne illustration [Bonnard et al., 2010]. Cependant, la relative jeunesse de cette famille de procédés implique, encore, des freins à son essor industriel, c'est-à-dire :

1. **Un coût** de fabrication encore relativement élevé par rapport à des procédés classiques. Cela est principalement imputable à un coût de machine et de matière première élevé couplé dans certains cas à un temps de fabrication important [Atzeni and Salmi, 2012].
2. **Une capacité non maîtrisée** des procédés additifs, qui se traduit par des écarts entre la géométrie théorique attendue par le cahier des charges des pièces et la géométrie réellement fabriquée (Fig.1.9). Ces écarts peuvent impliquer un surcoût de production dû à des opérations supplémentaires de parachèvement ou à des modifications successives du modèle théorique des pièces. Ils sont dus à [Bourell et al., 2009] :
 - un manque de connaissance des phénomènes physiques mis en jeu au cours du processus de fabrication. Ce qui implique un manque de maîtrise de ces phénomènes au cours de la fabrication des pièces et une difficulté à prévoir en amont la qualité finale de celles-ci.
 - la non prise en compte de ces phénomènes physiques et de leurs impacts sur la qualité des pièces fabriquées, dans les processus de conception et de choix de gamme de fabrication, située en amont du processus de fabrication.

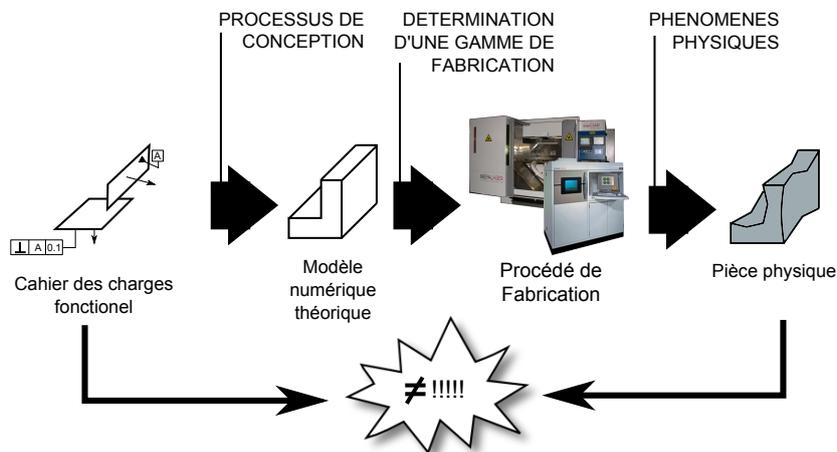


FIGURE 1.9 – Illustration de la mauvaise maîtrise de la capacité des procédés additifs

3. **Une méconnaissance des opportunités offertes** par rapport aux procédés traditionnels par les concepteurs. Cette dernière empêche le développement de solutions innovantes qui valoriseraient la fabrication additive [Hague, 2006]. Ainsi, quelques exemples ont bien été traités de manières isolées (Fig. 1.6), mais il n'existe pas de méthodologies ni d'outils généraux permettant d'aider les concepteurs à exploiter ces opportunités [Mellor et al., 2012].

2.4 Nécessité d'une méthode d'aide à la conception orientée fabrication additive

Les coûts d'équipement et de matière première devraient connaître naturellement une baisse conséquente avec le développement de la fabrication additive. À l'inverse, concernant les deux autres verrous identifiés, leur résolution est un enjeu majeur pour atteindre ce développement [Hopkinson et al., 2006, Hague, 2006, Bourell et al., 2009]. La connaissance et la maîtrise des phénomènes physiques mis en jeu au cours du processus de fabrication semblent, comme pour l'ensemble des procédés, un passage obligé pour l'industrialisation de la fabrication additive. Elle passe par le développement de modèles mathématiques permettant de modéliser et optimiser le processus de fabrication, mais aussi de prédire la qualité des pièces produites. Ces modèles doivent permettre d'intégrer, au plus tôt, grâce à une méthodologie de type conception pour la fabrication (*Design For Manufacturing : DFM*), les connaissances du procédé dans le processus de conception des produits. Les écarts entre le modèle théorique des pièces et la géométrie réellement fabriquée pourront ainsi être minimisés.

Outre la prise en compte de ses contraintes, nous avons vu que le développement de la fabrication additive nécessite la prise en compte de ses opportunités. De nombreux acteurs de la fabrication additive s'accordent en effet à dire que «*la fabrication additive débridera la conception dans les bureaux d'études ... à condition que les concepteurs revoient leurs méthodes*» [Grzesiak, 2012]. Les outils d'aide à la conception proposés devront donc intégrer ces opportunités pour permettre au concepteur de déterminer les géométries répondant au mieux aux besoins identifiés même si celles-ci étaient réputées, jusqu'à présent, non réalisables.

Ainsi, si la fabrication additive est, par les opportunités qu'elle apporte, une famille de procédés appelée à se démocratiser, sa pérennisation nécessite le développement d'outils d'aide à la conception de type DFM. Ces outils devront permettre une prise en compte simple par le concepteur des contraintes, mais aussi des opportunités associées aux phénomènes physiques mis en jeu par ces procédés.

3 Synthèse et organisation du manuscrit

Dans ce chapitre, nous avons placé nos travaux dans un contexte global lié à l'évolution des industries de produits manufacturés. Il en résulte que l'utilisation de la fabrication additive est l'un des leviers possibles pour parvenir à une production toujours plus personnalisée et optimisée.

Ne nécessitant pas d'outillage dédié ni de bruts de matière, les procédés de fabrication additifs apportent de nouvelles perspectives quant au triptyque Produit-Process-Matériau. Ainsi la fonctionnalité des produits peut, potentiellement, être augmentée sans surcoût de production. D'un autre côté, il a aussi été montré que, contrairement au message qui peut être véhiculé par certains médias⁷, la fabrication additive n'apporte pas une liberté de conception totale. Comme tous les autres, les procédés additifs ont leurs propres spécificités liées au processus même de fabrication. Nous avons vu qu'aujourd'hui, la méconnaissance de ces spécificités et des opportunités qu'offre la fabrication additive sont les principaux verrous à l'utilisation généralisée de ces procédés. Ce constat révèle **la nécessité de la mise en place d'outils d'aide à la conception orientés fabrication additive** pour :

1. Aider le concepteur à **tirer profit des opportunités offertes par la fabrication additive**. Cela nécessite de l'aider à définir précisément les caractéristiques géométriques et structurelles d'une pièce pour répondre au mieux aux besoins identifiés.
2. Permettre au concepteur d'**intégrer au plus tôt**, dans sa démarche de conception, **les spécificités de fabrication**, directement liées aux phénomènes physiques mis en jeu. Ceci dans le but de minimiser les écarts entre le modèle théorique de la pièce étudiée et sa géométrie réelle après fabrication et de maximiser sa fabricabilité.

Ainsi, nos travaux de thèse, présentés dans ce manuscrit, portent sur la proposition d'**une nouvelle méthodologie de conception orientée pour la fabrication additive**. Dans les chapitres suivants, les différents points de la méthodologie seront développés et justifiés.

Après une analyse de l'état de l'art concernant les méthodes générales de conception, les caractéristiques particulières des procédés additifs seront détaillées dans le **deuxième chapitre**. Les outils existants développés spécifiquement pour intégrer ces spécifications ainsi que leurs limites seront explicités. Ce chapitre nous permettra de mettre en avant la nécessité de développer une nouvelle méthodologie d'aide à la conception pour la fabrication additive.

Le **troisième chapitre** présentera la structure de la méthodologie mise en place. Nous définirons précisément ses données d'entrée et détaillerons les quatre principales étapes la constituant.

Le **quatrième chapitre** se concentrera sur la troisième étape de notre méthodologie appliquée dans le cas de l'utilisation de la fabrication par projection de poudre pour l'obtention de pièces à structures allégées. Basée sur l'optimisation des trajectoires de fabrication au regard des phénomènes physiques mis en jeu au cours du processus de fabrication, elle nécessite entre autres le développement de modèles multi-physiques et d'indices de fabricabilité.

Le **cinquième chapitre** comportera deux exemples industriels permettant d'illustrer la méthodologie dans son ensemble ainsi que les travaux réalisés portant spécifiquement

7. <http://www.economist.com/node/18114327> (25/06/2013)

sur le procédé de projection de poudres.

Pour finir, le **sixième chapitre** présentera les conclusions de l'ensemble de ces travaux ainsi que les perspectives qui en découlent.

Chapitre 2

État de l'art et problématique

Ce deuxième chapitre a pour objectif d'exposer l'**état de l'art et la problématique de nos travaux de thèse**. Au cours du chapitre précédent, la nécessité d'outils d'aide à la conception pour la fabrication additive a été mise en évidence. Nous allons maintenant analyser les méthodes existantes et positionner nos travaux.

La première partie portera sur l'analyse générale des outils et méthodes développés pour l'ensemble des procédés. Les concepts d'**ingénierie intégrée** et de conception pour l'X (DFX) y seront rapidement présentés pour ensuite détailler plus finement le concept de **conception pour la fabrication** (DFM). Nous pourrons ainsi définir le cadre scientifique nécessaire au positionnement de nos travaux.

Nous présenterons dans la deuxième partie **les spécificités des procédés additifs** à prendre en compte dès la phase de conception des produits. Nous pourrons alors, à partir de l'analyse faite précédemment, définir le type d'approche qu'il est nécessaire de mettre en place.

La troisième partie de ce chapitre se rapportera aux travaux de recherche dans le domaine spécifique de **la conception pour la fabrication additive**. Cet état de l'art permettra d'avoir une vision globale sur les outils et concepts, déjà existants, de conception pour la fabrication additive. De cette étude, nous dégagerons les intérêts et les limites de ces travaux.

Finalement, nous ferons la **synthèse** de cet état de l'art. Nous dégagerons ainsi les verrous des études existantes pour définir clairement le **positionnement** de nos travaux de thèse.

1 L'intégration des connaissances métiers en conception

Comme il a été vu au chapitre 1, les industriels doivent aujourd'hui faire face à un marché en mouvement. Les produits développés doivent être toujours plus performants et compétitifs dans des délais toujours plus courts. Ces contraintes fortes ont provoqué des répercussions importantes sur les méthodes d'ingénierie et ont introduit des notions de concourance et de collaboration [Lu et al., 2007]. L'ingénierie est ainsi passée de traditionnellement séquentielle à intégrée. C'est à partir de la fin des années 80 que cette vision nouvelle du processus de conception apparaît sous différentes appellations telles que l'ingénierie collaborative [Kvan, 2000], intégrée [Ettlie, 1997], concourante [Prasad, 1996], ou bien encore simultanée [Perrin, 1999].

1.1 Définition de l'ingénierie intégrée

Issu d'une vision Tayloriste de l'entreprise, le déroulement traditionnel des processus d'industrialisation est basé sur une approche séquentielle. Ce type d'approche est la plus simple, mais engendre généralement un manque important de communication entre les acteurs de l'entreprise. Ces derniers sont en quelque sorte cloisonnés, ainsi les tâches passent d'un service à l'autre selon le principe « over the wall » (Fig. 2.1). Un service effectue une action complètement puis la passe au service suivant sans interaction supplémentaire. Le temps total du projet est la somme du temps de chaque tâche à laquelle il faut ajouter les nombreux retours, après coup, entre les services pour s'assurer de la prise en compte des contraintes qu'il leurs sont associées [Howard and Lewis, 2003]. Le délai de développement d'un produit peut alors exploser.

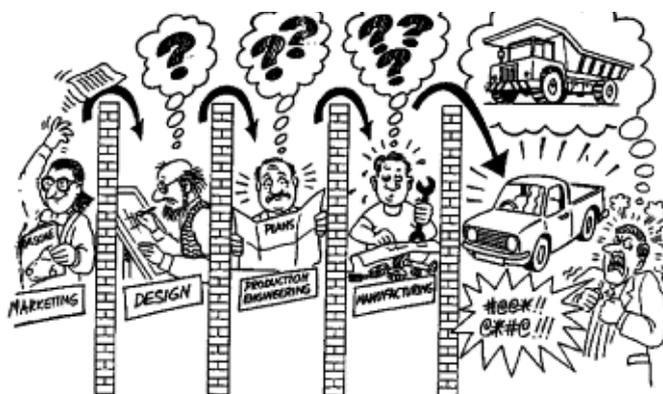


FIGURE 2.1 – Illustration du phénomène "over the wall" qu'engendre une approche d'ingénierie séquentielle [Ranky, 1994].

L'ingénierie intégrée donne des éléments de réponse à ces problèmes en proposant une nouvelle organisation du processus de développement. La définition de *Winner et al* de l'ingénierie intégrée souligne bien son concept général qui est la prise en compte, pour la conception d'un produit, de l'ensemble de son cycle de vie [Winner et al., 1988] :

"Concurrent engineering is a systematic approach to the integrated, concurrent design of products and their related processes, including manufacture and support. This approach is intended to cause the developers, from the outset, to consider all elements of the pro-

duct life cycle from conception through disposal, including quality, cost, schedule, and user requirements."

Ce concept d'intégration, au plus tôt, de l'ensemble des contraintes liées au cycle de vie d'un produit dans sa phase de conception a fait l'objet de travaux intensifs au cours des 25 dernières années et est, aujourd'hui, toujours d'actualité [Boothroyd et al., 2010]. Il est basé sur le constat que, lors d'un projet d'industrialisation, 60 à 85% des coûts d'un produit sont fixés dès l'étape de conception alors que les coûts réellement engagés à ce stade n'en représentent que 5 à 7% [Perrin, 2001]. Par conséquent, plus les problèmes sont pris en compte tôt dans la phase de vie d'un produit plus il est facile et bon marché de les éviter (Fig. 2.2).

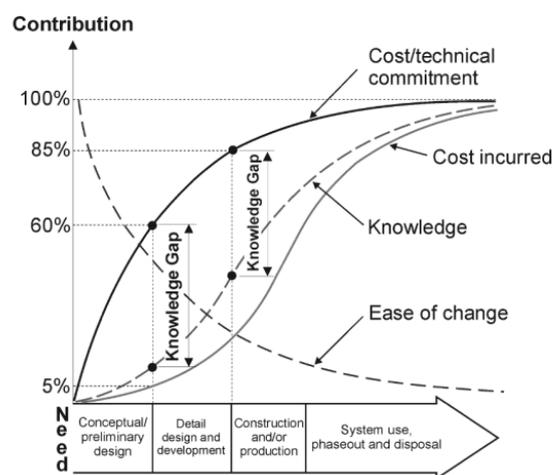


FIGURE 2.2 – Les coûts engagés au cours du cycle de vie d'un produit [Swift and Booker, 2003].

L'ingénierie intégrée est basée sur un travail entre équipes pluridisciplinaires et multifonctionnelles [Abdalla, 1999] et la mise en œuvre de méthodologies de conception pour l'X qui permettent de mieux considérer en amont du processus de conception les métiers situés en aval [Dowlatshahi, 1999].

1.2 Conception pour l'X

La conception pour l'X, notée DFX pour Design For X, est la mise en œuvre pratique du concept d'ingénierie intégrée. C'est un ensemble de méthodologies visant à augmenter l'efficacité du processus de conception de produit [Kuo, 2001], où le "X" représente l'une des phases du cycle de vie du produit. Le concept de DFX apparaît autour des années 1950, il se concentre initialement sur les phases de fabrication (DFM) [O'Driscoll, 2002] et d'assemblage (DFA) [Boothroyd and Dewhurst, 1983]. Le développement de ces méthodes a par la suite permis d'étendre le concept à un plus large champ de métiers intervenants dans le processus de conception et de développement des produits : Design For Environment (DFE), Design For Quality (DFQ), Design For Cost (DFC), etc [Huang, 1996, Herrmann et al., 2004].

L'idée de prise en compte des contraintes liées aux différentes phases du cycle de

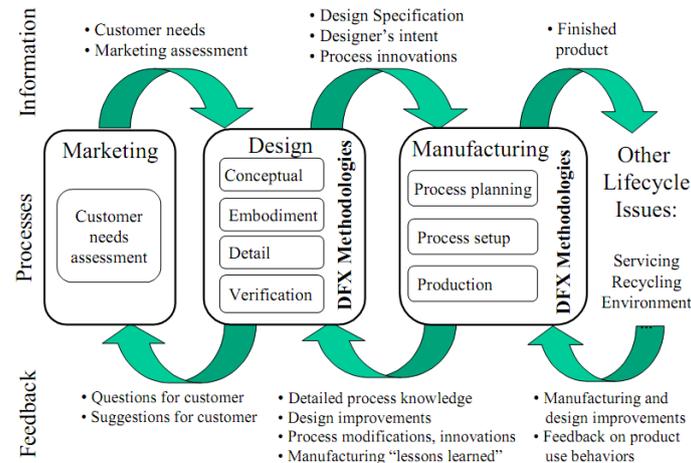


FIGURE 2.3 – Représentation schématique du concept de DFX [Herrmann et al., 2004].

vie d'un produit lors de sa conception n'est donc pas nouvelle. Dans la section suivante, nous allons détailler les travaux de recherche existants portant sur la conception pour la fabrication, quel que soit le procédé étudié. Nous nous appuyerons sur cette analyse pour, par la suite, définir les approches et outils à mettre en place dans le cas spécifique des procédés additifs.

1.3 Le concept du DFM

1.3.1 Définition et objectifs du concept DFM

Parmi les approches de DFX, l'approche de conception pour la fabrication (DFM) est l'une des composantes qui suscite le plus d'intérêt au sein la communauté scientifique depuis les années 1970. Le concept de DFM a été développé au cours de la Seconde Guerre mondiale où les temps de développement des produits devaient être minimisés [Ziemke and Spann, 1993]. Par la suite, ce n'est qu'avec la transition entre la production de masse et la personnalisation de masse que cette contrainte est réapparue, nécessitant la prise en compte des connaissances du processus de fabrication au plus tôt. Traditionnellement, l'approche DFM va de la mise en place d'équipes pluridisciplinaires au développement de guides et règles de conception pour améliorer la fabricabilité des produits. L'avènement des outils numériques que sont la CAO et la FAO depuis les années 1990 a permis une application plus efficace du concept [Teti and Kumara, 1997]. Les méthodologies actuelles de DFM consistent à intégrer des indicateurs de fabrication directement dans les systèmes CAO, afin d'estimer la fabricabilité du produit lors de sa définition géométrique [Eversheim and Baumann, 1991]. L'objectif principal est de considérer simultanément les exigences fonctionnelles du produit et les contraintes de fabrication pour identifier et éviter les problèmes de fabrication au plus tôt et ainsi optimiser le triptyque coût-qualité-délais [Gupta, 1994].

1.3.2 Classification des méthodes DFM

En nous appuyant sur divers travaux de recherche [Gupta et al., 1997, Shukor and Axinte, 2009], nous allons classer les différentes méthodes DFM selon trois aspects : le type d'approche, la mesure de la fabricabilité et l'interaction entre le concepteur et le système. Cette classification nous permettra, après l'analyse des spécificités de la fabrication additive, de définir précisément quel type de méthodologie doit être mis en place dans le cas de cette famille de procédés.

Deux types d'approche DFM

L'approche directe consiste à appliquer directement des règles et des algorithmes au modèle géométrique de la pièce pour identifier les paramètres de conception qui pourraient générer des zones plus ou moins difficiles à fabriquer. Cette approche est la plus couramment utilisée. *P. Risacher* propose par exemple une méthode d'analyse de la géométrie des pièces permettant de détecter les zones non accessibles pour un outil donné en fraisage [Risacher, 1997]. L'approche directe nécessite de pouvoir traduire des contraintes procédés en critères géométriques. De plus une définition précise de la géométrie de la pièce est requise. Elle est donc particulièrement adaptée en cas de reconception.

L'approche indirecte repose sur la modification successive d'une gamme de fabrication pour réduire généralement le coût et/ou le temps de fabrication de la pièce correspondante [Dana and Gupta, 1994]. *J. Ciurana et al* proposent ainsi, à partir, encore une fois, d'une définition précise de la pièce étudiée, de définir la gamme de fabrication optimale pour minimiser les coûts de fabrication [Ciurana et al., 2008]. Ce type d'approche permet l'intégration plus poussée des spécificités des procédés de fabrication, mais elle impose la définition d'une gamme de fabrication, nécessitant des compétences que le concepteur n'a pas forcément. Là encore, la majorité des travaux nécessitent une géométrie initialement définie.

La mesure de la fabricabilité

La fabricabilité d'une pièce peut être mesurée avec différentes échelles correspondant à différents niveaux d'abstraction. Celles-ci peuvent parfois être avantageusement combinées.

La mesure binaire est l'échelle la plus basique. Il s'agit de définir si oui ou non la solution proposée répond aux critères technico-économiques demandés qui sont généralement des limites géométriques, dimensionnelles ou de qualité. Ce type de mesure permet de sélectionner les solutions valables, mais pas de les classer les unes par rapport aux autres [Dana and Gupta, 1994].

La mesure qualitative consiste à associer des adjectifs de type "facile", "moyennement facile", "difficile" à une conception, pour caractériser sa fabricabilité. Étant relativement subjective, cette mesure est souvent complexe à interpréter, elle n'est pas non plus adaptée pour la comparaison de procédés.

La mesure quantitative permet d'évaluer une solution en calculant une valeur numérique de fabricabilité. Avec l'utilisation d'une échelle numérique commune, les produits et/ou procédés peuvent ainsi être comparés [Chaves-Jacob et al., 2011, Kerbrat et al., 2010]. La difficulté provient, ici, de la comparaison des indices entre eux [Korosec, 2005].

La mesure directe associe à une conception une évaluation du temps ou du coût de fabrication. Cette approche est la plus utilisée, elle fournit une valeur de fabricabilité facilement compréhensible par le concepteur. Elle permet ainsi de modifier la conception pour répondre à une demande directement liée à ces grandeurs (par exemple un coût de fabrication maximal à ne pas dépasser) [Bouaziz, 2004]. La difficulté est alors d'estimer correctement les valeurs souhaitées [Hmida et al., 2006].

L'interaction utilisateur/système

Elle caractérise la manière dont le concepteur interagit avec le système de conception. Cela concerne aussi bien les données d'entrée du système, fournies par le concepteur, que les données de sortie qui lui sont renvoyées.

Les données d'entrée correspondent, dans la grande majorité des travaux, à une description initiale de la pièce étudiée. Celle-ci est soit décrite à partir d'un catalogue fini d'entités [Feng et al., 1996, Case, 2000], soit directement fournie sous forme d'un modèle numérique. Il existe également des études dans lesquelles, les données d'entrée sont des nuages de points, issus de mesures tridimensionnelles. Enfin, la description peut aussi être faite sous forme de graphe [Brissaud and Tichkiewitch, 2000]. Une géométrie initiale comme entrée permet une analyse fine de sa fabricabilité. En contrepartie, elle restreint les possibilités de reconception. Malgré ce constat, il existe très peu de travaux partant de la définition non pas de la géométrie de la pièce, mais de son cahier des charges fonctionnel. La conception de la pièce peut alors se faire réellement à partir des choix de fabrication [Toussaint et al., 2010].

Les données de sortie donnent, pour la plupart des études, en fonction du type de mesure effectuée, une évaluation globale de la fabricabilité de la pièce. Pour aller plus loin, certains travaux proposent de décomposer la pièce en entités pour effectuer une analyse découplée de plusieurs zones de la pièce. On parle alors d'analyses locales, une représentation par cartographie est alors bien adaptée [Tapie and Mawussi, 2008]. Quelques systèmes vont jusqu'à fournir des suggestions de modification pour les produits, en proposant de nouvelles valeurs de paramètres de conception afin d'améliorer la fabricabilité [Kerbrat et al., 2009].

1.3.3 La conception à partir de la fabrication

Nous constatons que la grande majorité des travaux portant sur le DFM propose, à partir d'une géométrie initiale, de définir des indices de fabricabilité dans le but de faire un choix de procédé de fabrication ou de proposer des modifications géométriques locales. Le choix du moyen de production est, alors, souvent intégré comme une série de contraintes à prendre en compte après que la topologie, plus ou moins précise, de la pièce soit définie [Shukor and Axinte, 2009]. **On parle alors d'intégration métier réactive.** Les limites de ces approches proviennent de la nature restreinte des modifications apportées à la géométrie initiale. Cela suppose d'avoir initialement une bonne idée de la topologie de la pièce à obtenir. Nous pouvons déjà ici remarquer qu'**une approche réactive n'est particulièrement pas adaptée à la conception pour la fabrication additive.** En effet, de par sa relative jeunesse, cette famille de procédés et ses spécificités sont très peu connues des concepteurs. Ainsi la proposition d'une géométrie initiale proche d'une

solution optimale semble très difficile.

L'approche DFM, dans son concept, intègre aussi l'idée de définir des règles ou contraintes, issues des processus de fabrication, permettant de guider le processus de conception dès la phase conceptuelle du projet [Toussaint et al., 2010]. Cela doit permettre de s'affranchir d'idées préconçues concernant la géométrie finale du produit. **On parle alors d'intégration métier proactive.** Or, en réalité, peu de travaux ont été menés dans cette direction. Ils peuvent être classifiés en deux catégories :

1. **Une conception issue de la simulation du processus de fabrication :** la notion de conception "au juste besoin", proposée par *Roucoules* correspond bien à cette idée [Roucoules, 2007]. Le point d'entrée fonctionnel de la méthodologie n'est plus une géométrie initiale, mais le "juste besoin", modélisé par les flux énergétiques circulant dans le système pour respecter les fonctions principales du produit. À partir de cette description initiale "minimale", une série de gammes de fabrication est alors proposée, faisant émerger les différentes géométries alternatives du produit. Pour chaque solution, le processus de fabrication associé est simulé pour, ensuite, sélectionner les propositions raisonnablement fabricables [Martin and Roucoules, 2009]. Cette approche du DFM a aussi été développée par *E. Duc et al* au travers du concept de *surface d'usinage* [Duc et al., 1999]. La géométrie proposée est alors directement issue de la simulation du processus de fabrication, les écarts entre le modèle théorique de la pièce et la géométrie réellement fabriquée sont donc minimisés. Dans le même sens, au sein de l'équipe MO2P, les travaux de *T. Seo* portant sur la modélisation et la quantification tridimensionnelles des écarts de fabrication en usinage permettent d'estimer la géométrie des pièces après usinage [Seo, 1998]. Adaptée dans les cas où le cahier des charges fonctionnel est composé de contraintes (par exemple une déformation maximale admissible), cette approche est plus difficile à mettre en place dans le cas d'objectifs fonctionnels (par exemple, minimiser la masse du produit). En effet, il est complexe de s'assurer d'obtenir LA solution optimale.

Cette démarche permet, finalement, de proposer **une géométrie de pièce au plus proche de la géométrie réellement fabriquée** (le degré de réalisme dépendra de la qualité de la simulation). En contrepartie, **elle ne permet pas de s'assurer de répondre au mieux à d'éventuels objectifs fonctionnels.**

2. **Une conception obtenue par optimisation multi objectifs :** un certain nombre de travaux basés sur des outils d'optimisation proposent d'obtenir des solutions optimisées d'un point de vue global. Dans ces approches, le cahier des charges fonctionnel et les caractéristiques du procédé de fabrication sont traduits en fonctions objectifs et/ou contraintes d'optimisation. Ainsi, les travaux de thèse de *Toussaint* ont porté sur une méthodologie de conception et d'optimisation du couple produit-process intégrant, dès les phases préliminaires du cycle de vie, les problématiques de fabrication et fonctionnelles du produit [Toussaint, 2010].

Plus spécifiquement, *Harzheim et Graf* ont proposé une méthode de conception permettant, à l'aide d'une optimisation de type topologique, une conception optimisée d'un point de vue des exigences fonctionnelles et du procédé de fabrication, de pièces destinées à être fabriquées par moulage [Harzheim and Graf, 2005]. Ces travaux permettent d'éviter des solutions comportant des cavités internes, de contraindre l'épaisseur des pièces pour qu'elle soit quasiment constante et de contraindre leur géométrie

pour qu'elle soit démoulable dans une direction donnée. *Zuo et al* proposent aussi ce type d'approche pour l'usinage, en définissant une dimension minimale de poche pour limiter le ratio longueur/diamètre des outils [Zuo et al., 2005].

Avec ces méthodes, les morphologies de pièce obtenues sont relativement **non intuitives** pour le concepteur et permettent de répondre au mieux aux objectifs et contraintes du problème. Ces approches nécessitent cependant de **pouvoir traduire les spécificités du procédé de fabrication en fonctions globales** à optimiser, ce qui peut être, dans le cas de la fabrication additive :

- Difficile par manque de connaissance de ces procédés. Il n'existe, en effet, pas aujourd'hui de règles globales de conception liées à ces procédés.
- Pas suffisant, car les phénomènes physiques mis en jeu sont locaux et à ce jour, complexes à anticiper, car mal maîtrisés. La relation géométrie / fabricabilité est, à l'heure actuelle, encore peu explorée.

Pour intégrer dans la démarche de conception des produits aussi bien les opportunités que les contraintes associées à fabrication additive, il semble qu'une approche proactive alliant la simulation et l'optimisation soit nécessaire.

Avec le développement informatique de ces dernières décennies, l'utilisation d'outils d'optimisation pour la conception s'est beaucoup développée et commence à être étendue aux méthodes plus globales de type DFX. Nous détaillerons dans le paragraphe suivant les différentes topologies d'optimisation utilisées pour définir celles qui seraient les plus adaptées à la fabrication additive.

1.4 L'optimisation dans la démarche de conception de produits

À chaque fois qu'un produit est développé, le concepteur tente de trouver la meilleure solution possible. L'optimisation des produits n'est donc pas une notion nouvelle. Cependant, ce processus d'identification du "bon paramétrage" du produit est souvent fait manuellement de manière séquentielle, impliquant un temps de développement important. Ces dernières années, les outils mathématiques d'optimisation ont profondément évolué, permettant l'automatisation de ce processus. Ce paragraphe n'a pas vocation à analyser finement l'ensemble des algorithmes et méthodes employés. L'objectif est plutôt d'avoir une vision globale de ce qu'est un problème d'optimisation et des différentes typologies d'optimisation utilisées en conception mécanique.

1.4.1 Formulation d'un problème d'optimisation

D'un point de vue mathématique, un problème d'optimisation peut se formuler de la manière suivante :

Trouver $X^* = x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*$ solution optimale parmi $X = x_1, x_2, \dots, x_n$ (avec $n \in \mathbb{N}$) qui minimise la fonction objectif : $F(x) = f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)$ et qui respecte les contraintes d'égalité : $g_i(x) = 0$ ($i = 1, \dots, p$ avec $p \in \mathbb{N}$) et les contraintes d'inégalité $h_j(x) < 0$ ($j = 1, \dots, q$ avec $q \in \mathbb{N}$).

La fonction $F(x)$ regroupant plusieurs fonctions objectif, nous sommes dans le cas d'un problème multi-objectif. Dans le cas d'un problème mono-objectif, celle-ci se simplifie en une seule fonction objectif ($F(x) = f(x)$). L'expression ci-dessus désigne également un

problème visant à minimiser F , cas le plus courant en optimisation. Lorsqu'il s'agit de maximiser F , le problème est ramené à la minimisation de $-F$. La solution du problème d'optimisation est alors donnée par un ensemble de paramètres X^* pour lesquels la fonction objectif F présente une valeur minimale, en respectant les limitations d'égalité, d'inégalité et de domaine.

1.4.2 Typologie des problèmes d'optimisation

Une classification des problèmes d'optimisation mécanique, couramment reconnue par la communauté scientifique [Kim et al., 2002, Allaire, 2006, Roy et al., 2008] est liée à la nature des modifications apportées au modèle structural pour la recherche de la solution optimale :

1. **L'optimisation d'échelle, ou paramétrique**, consiste à optimiser le modèle dans le respect des ressources disponibles. La variation de la forme de la pièce est dans cette situation, prise en compte à travers des paramètres d'épaisseur, de courbure, etc., qui interviennent dans la fonction objective. La figure 2.4 montre un exemple d'optimisation paramétrique d'une poutre dont les paramètres sont les épaisseurs des éléments la constituant. La géométrie finale est optimisée pour minimiser la déformée ainsi que la masse de la poutre. Dans le cas d'une optimisation paramétrique, la géométrie optimisée est fortement dépendante de la géométrie initiale. Ainsi une modification de la géométrie initiale peut engendrer de grosses modifications sur la géométrie optimisée. Il est alors difficile, sans idée initiale de la géométrie à obtenir, de s'assurer d'obtenir la géométrie globalement optimale. L'optimisation paramétrique est d'ailleurs généralement utilisée à la fin du processus de conception des produits [Bendsoe and Sigmund, 2003].

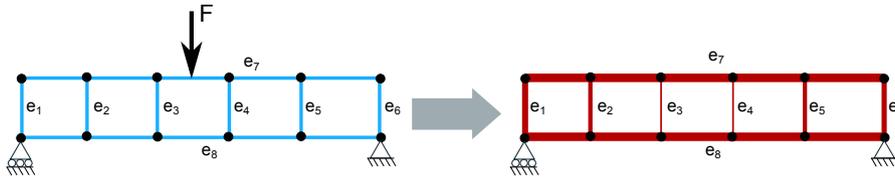


FIGURE 2.4 – Principe de l'optimisation paramétrique.

2. **L'optimisation de forme** consiste à optimiser les contours de la structure sans changer la nature des volumes délimités. Ainsi, la topologie de la pièce est fixe, seule sa forme est optimisée. Les paramètres d'optimisation sont alors les points de contrôle des lignes ou surfaces délimitant la pièce. La figure 2.5 montre dans le cas de la poutre précédente le résultat d'une optimisation de forme (en rouge) portant sur les frontières intérieures de la poutre (en bleu). Bien que ce type d'optimisation permette d'obtenir de meilleurs résultats que l'optimisation paramétrique, elle donne des résultats encore proches de la géométrie initiale [Chang, 2001], la topologie du volume de la pièce (en noir) n'est en effet pas changée. Dans l'exemple, la forme des cavités est optimisée par contre on ne sait pas si, avec 4 cavités au lieu de 5, le résultat n'aurait pas, par exemple, été meilleur.
3. **L'optimisation topologique** remet en cause la topologie de la pièce (c'est à dire le nombre de composantes, de frontières, de trous, etc.) et permet ainsi de bénéficier

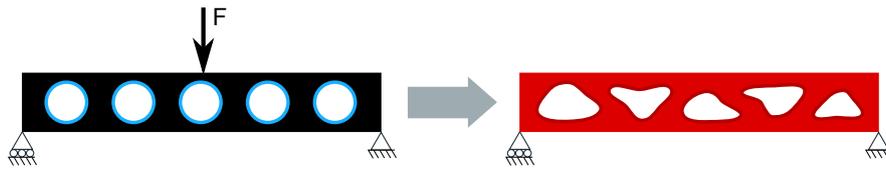


FIGURE 2.5 – Principe de l'optimisation de forme.

d'un potentiel d'optimisation plus élevé. Selon *Takezawa et al*, parmi les différentes catégories d'optimisation mécanique, l'optimisation topologique offre le meilleur potentiel pour explorer des structures fonctionnellement idéales [Takezawa al. 2006]. Celle-ci se décline en deux approches :

- L'approche continue, ou méthode d'homogénéisation (travaux de Bendsoe et Sigmund [Bendsoe and Sigmund, 2003]) qui subdivise un "domaine de conception" en un nombre infini de variables infinitésimales. Cette approche génère des problèmes d'optimisation complexes à résoudre, mais aboutit à des formes optimales ne dépendant pas de la géométrie initiale. Ainsi, il s'agit d'un outil de conception sans a priori qui permet d'obtenir une topologie de pièce non intuitive. Dans le cas de l'exemple précédent (Fig. 2.6), le domaine de conception (en bleu) est subdivisé en volumes infinitésimaux. Une variable est associée à la densité massique de chacun de ces volumes prenant la valeur de "1" (en rouge) pour indiquer une densité positive et "0" (en blanc) pour une densité nulle. La géométrie obtenue de la pièce est alors définie par l'ensemble des volumes infinitésimaux ayant une densité positive. Elle est indépendante de toute idée préconçue.

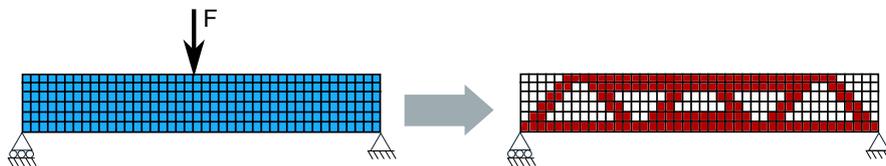


FIGURE 2.6 – Principe de l'optimisation topologique continue.

- L'approche par éléments discrets, qui est basée sur la formulation d'éléments de structures dérivés de la mécanique (éléments poutres, plaques, coques). Elle s'apparente plus à une combinaison de plusieurs catégories d'optimisation (d'échelle, de forme, topologique) qu'à de l'optimisation topologique proprement dite; la modification de la nature de la structure se faisant par la suppression ou l'ajout d'éléments. Dans cette deuxième approche, le concepteur manipule des éléments qui lui sont familiers et peut plus facilement avoir l'intuition des changements de comportement liés à la modification de leurs caractéristiques. En contrepartie, le résultat est relativement dépendant de la géométrie initiale. Pour reprendre l'exemple précédent, la poutre est initialement modélisée par un ensemble de poutrelles. Les variables du problème sont alors l'existence ou non de ces poutrelles. Le résultat final est proche de celui de l'optimisation topologique continue, mais dépend tout de même de la géométrie et de la position des poutrelles initialement définies (Fig. 2.7).

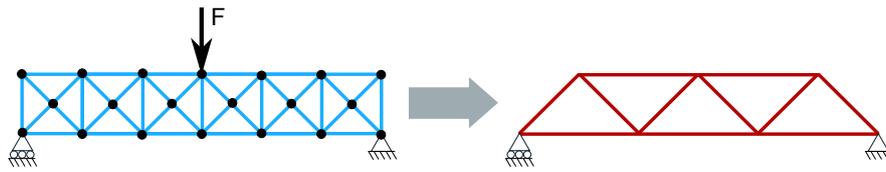


FIGURE 2.7 – Principe de l'optimisation topologique par éléments discrets.

Parmi les différentes typologies de problème d'optimisation, **l'optimisation topologique continue semble la plus adaptée** pour s'assurer de tirer profit des opportunités offertes par la fabrication additive. C'est en effet ce type d'approche qui permet de s'affranchir le plus d'une topologie initiale, elle ne nécessite, de la part du concepteur, que la définition d'un domaine de conception.

2 Les caractéristiques des procédés additifs

Cette section présente un état de l'art des connaissances de la communauté scientifique concernant les caractéristiques et les choix liés à la fabrication impactant sur les propriétés finales des pièces produites par ajout de matière. L'objectif est de définir, à partir du classement réalisé au paragraphe 1.3, le type d'approche DFM à mettre en place pour garantir les caractéristiques attendues des pièces conçues puis fabriquées.

L'idée n'est pas de faire une analyse fine d'un procédé en particulier, mais d'étudier les données à prendre en compte pour que la méthodologie proposée soit applicable au plus grand nombre de technologies possibles. Dans cette étude, nous nous limiterons cependant à l'analyse des caractéristiques des technologies couramment utilisées pour la fabrication directe, c'est à dire : les technologies lit de poudre, projection de poudre et dépôt de fil fondu.

2.1 Impacts de la stratégie de fabrication sur les caractéristiques des pièces produites

Au fur et à mesure que les différentes technologies de fabrication additive ont été développées, elles ont été caractérisées à l'aide de pièces tests permettant d'estimer leur capacité à fabriquer des formes géométriques et à respecter des tolérances fonctionnelles [Senthilkumaran et al., 2012](Fig.2.8).

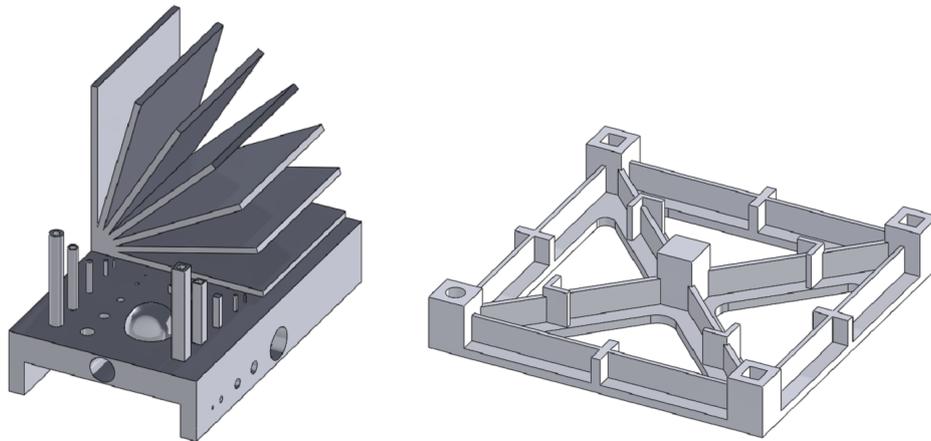


FIGURE 2.8 – Exemples de pièces tests utilisées pour caractériser les procédés additifs [Moylan et al., 2012].

En parallèle, et à partir des capacités estimées, des travaux ont été menés sur le coût de production effectif de ces procédés. Plusieurs modèles économiques ont ainsi été proposés pour estimer les coûts de production liés aux procédés additifs. *E. Atzeni et A. Salmi* proposent, par exemple, un modèle complet permettant d'estimer le coût de revient pour arriver au produit fini [Atzeni and Salmi, 2012]. Appliqué à un ensemble de pièces composant le train d'atterrissage d'un avion, ce modèle est employé pour déterminer jusqu'à combien de pièces à produire, il est, économiquement, intéressant d'employer le procédé de lit de poudre au lieu du moulage sous pression (Fig. 2.9).

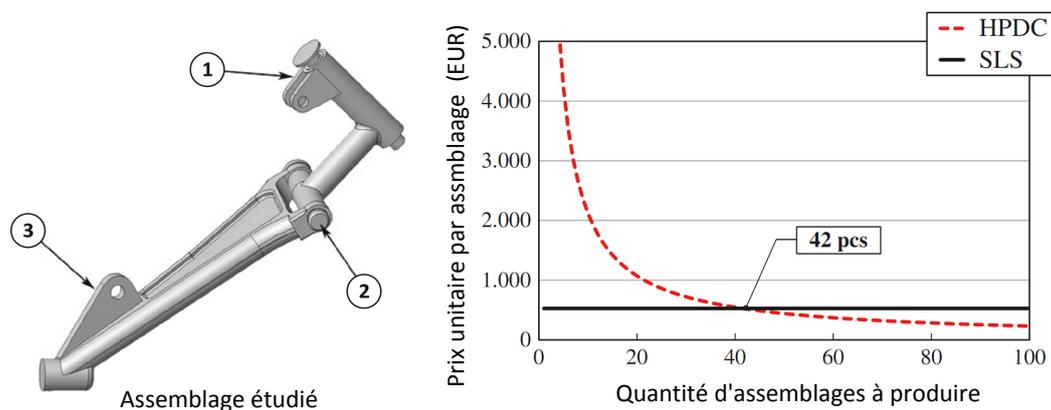


FIGURE 2.9 – Comparaison économique des procédés de lit de poudre (SLS) et de moulage sous pression (HPDC) en fonction du nombre d'assemblages à produire [Atzeni and Salmi, 2012].

De la même manière, les caractéristiques mécaniques et plus globalement les propriétés matériaux des pièces fabriquées font l'objet d'études poussées [Caulfield et al., 2007, Tolosa et al., 2010]. Ces études permettent, encore une fois, de comparer les procédés additifs aux procédés conventionnels. Les travaux de *I. Tolosa et al* comparent, par exemple, les caractéristiques mécaniques de l'acier inoxydable 316L obtenu par fabrication additive et par forgeage (Tab. 2.1). Ces travaux mettent en évidence que la fabrication additive permet d'obtenir des caractéristiques équivalentes voir meilleures que les procédés classiques.

	Lit de poudre	Forgeage
Résistance mécanique(MPa)	644-676	520-680
Résistance élastique(MPa)	616-664	220-270
Élongation(%)	33-40	40-45

TABLEAU 2.1 – Comparaison de la fabrication lit de poudre et du forgeage en termes de caractéristiques mécaniques pour l'acier inoxydable de type 316L [Tolosa et al., 2010].

Il apparaît dans l'ensemble de ces études que les choix liés aux stratégies de fabrication aient un impact fort sur les propriétés réelles des pièces fabriquées, qu'elles soient géométriques, économiques ou mécaniques. Les phénomènes physiques mis en jeu au cours de la fabrication sont en effet fortement dépendants des stratégies de fabrication employées. Or, ce sont ces phénomènes physiques qui définissent les limites théoriques des procédés [Wang and Zuo, 2010].

Pour les procédés étudiés, les stratégies de fabrication sont caractérisées par deux principaux paramètres : la trajectoire de fabrication et l'orientation de la fabrication. Pour une pièce donnée, la trajectoire de fabrication correspond à l'ensemble des courbes paramétriques le long desquelles la matière est progressivement apportée au cours du processus de fabrication. Et l'orientation de fabrication correspond, en chaque point de passage de la trajectoire, à l'orientation suivant laquelle la matière est apportée. Elle est décrite par une série de vecteurs unitaires. Ces paramètres sont illustrés figure 2.10.

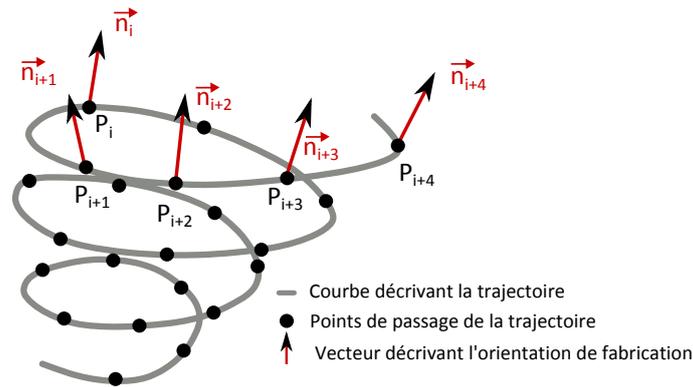


FIGURE 2.10 – Illustration d’une portion de stratégie de fabrication.

2.1.1 Impacts de l’orientation de fabrication sur les caractéristiques des pièces

L’orientation de fabrication est définie en fonction de la cinématique de la machine utilisée et dicte, entre autres, l’orientation de pose de la pièce dans la machine. Dans le cas particulier, aujourd’hui très courant, de trajectoires 2,5 axes l’orientation de fabrication est, par exemple, identique pour l’ensemble des trajectoires et correspond directement à l’orientation de pose.

Impacts sur le coût des pièces

En fabrication additive, l’orientation de fabrication est l’un des paramètres de fabrication ayant le plus d’impact sur le coût direct des pièces produites [Byun and Lee, 2006]. En effet, l’apport de matière en un point donné de la pièce nécessite d’avoir un support. Ce support peut être constitué d’une partie de la pièce fabriquée (on peut alors parler de support fonctionnel) ou bien correspond à un volume de matière supplémentaire non fonctionnel qui nécessitera une étape de parachèvement pour être, par la suite, enlevé. Dans ce dernier cas, les coûts de production peuvent être fortement augmentés. D’autre part, le temps de fabrication est également fonction de l’orientation choisie, car il est directement lié au nombre de couches nécessaires à la réalisation de la pièce. En prenant en compte ces deux aspects, *G. R. N. Tagore et al.*, par exemple, montrent que le coût de fabrication d’une pièce peut varier de près de 50 % suivant l’orientation de fabrication choisie avec la technologie de fil fondu (Fig. 2.11). Ces travaux montrent que le coût de fabrication de la pièce exemple varie de près de 50% suivant l’orientation de fabrication choisie.

La nécessité de support est dictée par l’orientation de fabrication choisie. Ainsi, dans le cas d’une unique direction de fabrication, la présence de volumes en porte à faux (par rapport à l’orientation de fabrication) peut impliquer un besoin de support. Ce besoin peut être limité en définissant, à l’emplacement correspondant, une orientation variable, correspondant à une fabrication de type 5 axes continus ou positionnés (Fig. 2.12).

La difficulté liée à une orientation de fabrication multiple provient de sa mise en œuvre qui reste délicate et nécessite de prendre en compte les problématiques d’accessibilité qui peuvent alors apparaître.

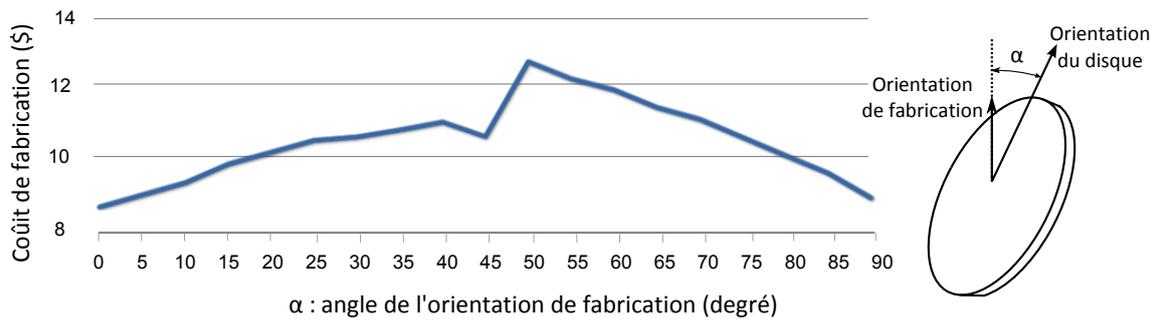


FIGURE 2.11 – Estimation du coût de fabrication d'un cylindre en ABS de diamètre 20 mm en fonction de l'orientation de fabrication choisie [Tagore et al., 2007].

Ainsi, la connaissance et la maîtrise des coûts, en fabrication additive, passent par un choix d'orientation de fabrication adapté. Ce choix nécessite la prise en compte de caractéristiques globales de la machine utilisée telles que sa cinématique ou l'accessibilité nécessaire. De plus, le choix d'une direction de fabrication implique un positionnement de la pièce à fabriquer dans la machine de production. Ainsi, pour la fabrication de pièces de grandes tailles, il est nécessaire de s'assurer que la position de la pièce est compatible avec les dimensions de l'espace de travail de la machine utilisée [Risacher et al., 1997].

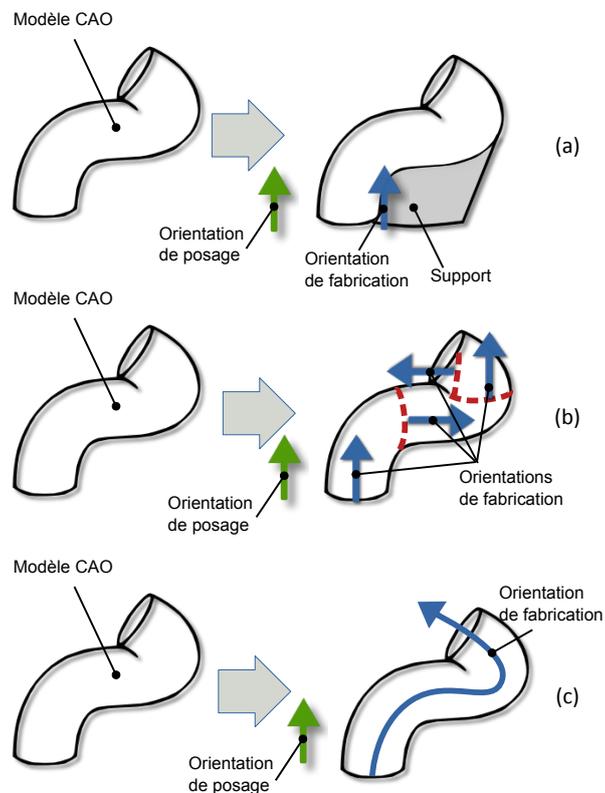


FIGURE 2.12 – Illustration de l'impact, concernant le besoin de support, d'une fabrication 5 axes positionnés (b) ou 5 axes continus (c), par rapport à une 3 axes (a).

Impacts sur les caractéristiques géométriques des pièces

L'état de surface des pièces fabriquées par ajout de matière dépend, lui aussi, fortement de l'orientation de fabrication choisie. De nombreux travaux montrent que l'"effet escalier" apparaît en effet, pour les surfaces n'étant ni orthogonales ni parallèles à l'orientation de fabrication [Arni and Gupta, 2001, Ma, 2004]. Ce phénomène impacte, comme le montrent les travaux de *V. Canellidis et al*, directement la rugosité des surfaces des pièces fabriquées (Fig 2.13). Il provient de la discrétisation en couches du volume des pièces (Fig. 2.14(a)).

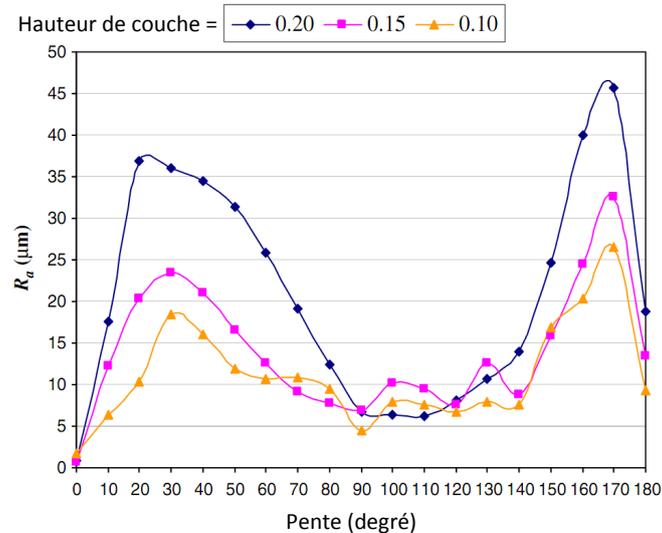


FIGURE 2.13 – Mesures expérimentales de l'impact de la position angulaire d'une surface plane par rapport à l'orientation de fabrication sur la rugosité pour trois hauteurs de couche différentes [Canellidis et al., 2009].

Le choix de l'orientation de fabrication vis-à-vis de ce phénomène a fait l'objet d'un grand nombre de publications. Aujourd'hui, il peut être minimisé voire complètement évité en :

- Choissant judicieusement une orientation de posage de la pièce dans la machine. Cette idée n'est pas nouvelle et a déjà fait l'objet d'études en usinage [Risacher et al., 1997].
- Ayant recours à des trajectoires 5 axes permettant de faire varier l'orientation de fabrication le long de la trajectoire pour que la matière soit localement agglomérée parallèlement à la surface extérieure de la pièce [Liou et al., 2007] (Fig. 2.14(b)).

Mis à part l'effet escalier, très peu de travaux portent sur l'impact du choix de l'orientation de fabrication sur la géométrie des pièces fabriquées. En particulier, son influence sur les phénomènes physiques mis en jeu au cours de la fabrication est, aujourd'hui, très peu connue. Pourtant cette influence est certaine. Les travaux de *P. Mercelis et J.P. Kruth* montrent, par exemple, dans le cas de trajectoire 3 axes, qu'il y a une relation indirecte entre l'orientation de posage et les contraintes thermiques induites par la fabrication [Mercelis and Kruth, 2006]. Imposant le positionnement de la pièce dans la machine, l'orientation de fabrication définit, en effet, le nombre de couches de matière nécessaire

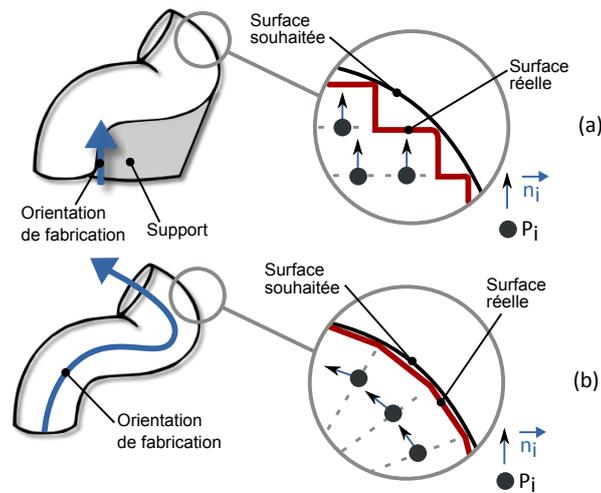


FIGURE 2.14 – Illustration de l'impact de l'orientation de fabrication sur l'état de surface : cas d'une orientation unique (a), cas d'une orientation adaptée (b).

à sa fabrication et donc modifie l'historique thermique de la pièce. Cela implique que les contraintes internes apparaissant, dans la pièce, au cours du processus de fabrication ne sont pas les mêmes selon l'orientation de fabrication choisie [Tolosa et al., 2010]. Il est donc important de définir judicieusement cette dernière pour minimiser les potentiels déformations, fissures ou même effondrements de matière.

Impacts sur les caractéristiques mécaniques des pièces

L'orientation de fabrication, au travers de l'orientation de posage, a aussi un impact avéré sur les caractéristiques mécaniques des pièces produites. Cela est particulièrement vrai pour les pièces plastiques [Caulfield et al., 2007] et les pièces mécaniques poreuses [Meier and Haberland, 2008]. Les caractéristiques telles que les résistances élastique et mécanique, le module d'Young ou encore le coefficient de Poisson sont alors fonction de l'orientation de posage. Le dimensionnement mécanique d'une pièce obtenue par fabrication additive doit, dans ce cas, tenir compte de cette anisotropie et donc du choix d'orientation de fabrication. Notons que ce phénomène est négligeable dans le cas de la fabrication de pièces métalliques denses (avec une fusion complète) [Delgado et al., 2012].

2.1.2 Impacts des trajectoires de fabrication sur les caractéristiques des pièces

Dans le cas de la fabrication additive, les trajectoires de fabrication sont historiquement limitées à des ensembles de courbes 2D. En effet la cinématique des machines a longtemps été limitée à 2,5 axes. Les trajectoires sont, encore aujourd'hui, déterminées à partir du tranchage du modèle géométrique des pièces, l'orientation de tranchage correspondant à l'orientation de posage. Des courbes paramétriques sont alors déterminées à partir de chacune de ces tranches [Kulkarni et al., 2000].

Cependant, un certain nombre de procédés (exploitant les technologies projection de poudres ou dépôt de fil) permettent, aujourd'hui, de générer des trajectoires 5 axes. La

définition de telles trajectoires commence, seulement, à être étudiée. Les rares approches proposées sont là encore basées sur le tranchage du modèle géométrique, les courbes de trajectoire ne sont cependant plus forcément contraintes par la géométrie des tranches [Ren et al., 2008]. Les trajectoires 5 axes générées sont, pour l'instant, limitées à des géométries simples (comportant des plans et axes de symétrie). En plus des problèmes d'accessibilité, les trajectoires sont en effet soumises à des contraintes spécifiques : elles doivent balayer l'ensemble du volume des pièces en passant qu'une seule fois à chaque endroit et chaque point de la trajectoire doit admettre un support. Pour toutes ces raisons, la génération de trajectoires 5 axes est aujourd'hui très délicate.

Concernant les trajectoires classiquement utilisées, deux principales topologies existent : les trajectoires de type balayage et les trajectoires de type spirale. Il est évidemment possible de combiner ces deux topologies au cours de la fabrication d'une même pièce.

Impacts sur les caractéristiques géométriques des pièces

Les formes des pièces fabriquées par ajout de matière sont directement dépendantes des trajectoires choisies. Ainsi, les travaux de *J.H. Kao et F.B. Prinz* portent sur l'impact du choix d'une trajectoire de type spirale sur la géométrie finale des pièces dans le cas de la technologie de projection de poudre [Kao and Prinz, 1998]. Ils démontrent que pour s'assurer de correctement "remplir" la géométrie d'une pièce (éviter les porosités et les cavités), il est nécessaire de définir sa forme extérieure en fonction de la trajectoire. Il propose pour cela une méthodologie basée sur le squelette topologique de la pièce à fabriquer. Ces travaux nous montrent que la géométrie d'une pièce, pour s'assurer qu'elle soit réalisable, doit être issue du choix des trajectoires qui seront utilisées pour la fabriquer.

L'impact des stratégies de trajectoire sur les caractéristiques géométriques des pièces provient également de leurs fortes influences sur les phénomènes physiques mis en jeu au cours du processus de fabrication [Sanusi et al., 2012]. En particulier, plusieurs travaux portent sur la relation entre la trajectoire et les contraintes internes dans les pièces fabriquées [Foroozmehr and Kovacevic, 2010, Bo et al., 2012]. *Q. Bo et al.* comparent, dans le cas de la technologie lit de poudre, avec des paramètres de fabrication identiques, les stratégies de type balayage et de type spirale, pour la fabrication d'une turbine. Comme le montre la figure 2.15, la pièce n'est tout simplement pas fabricable avec la première stratégie. Induisant de trop grandes contraintes thermiques, l'utilisation de cette stratégie fait s'écrouler la pièce au cours de sa fabrication. Cette différence, en intensité et en positionnement, des contraintes thermiques entre différentes stratégies de trajectoire est commune à l'ensemble des procédés de fabrication directe. *Foroozehr et al* le montrent par exemple pour la technologie de fabrication par projection de poudre [Foroozmehr and Kovacevic, 2010].

Ainsi, la fabricabilité et les tolérances atteignables pour une géométrie donnée dépendent très fortement des trajectoires et orientations de fabrication choisies. Cette dépendance peut être déterminée expérimentalement, comme dans les travaux de *Q. Bo et al.* mais cela nécessite, pour chaque pièce, la mise en place d'essais longs et coûteux. Il en résulte que si les choix de fabrication ont un impact avéré sur la déformation des pièces pendant leur fabrication, il est difficile de le prévoir sans une simulation complète de celle-ci. S'assurer que les pièces conçues respecteront, après fabrication, les caractéristiques

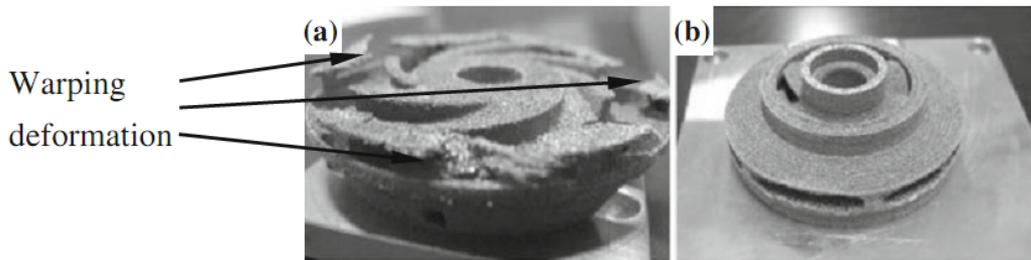


FIGURE 2.15 – Géométrie réellement fabriquée avec une stratégie de type balayage (a) et avec une stratégie de type spirale (b) [Bo et al., 2012].

mécaniques et dimensionnelles attendues nécessite donc de faire un choix de stratégie de fabrication puis de simuler l'ensemble du processus de fabrication.

Il est important de noter que la simulation numérique complète de la fabrication par ajout de matière de pièces fonctionnelles n'est actuellement pas une réalité. Bien que faisant l'objet de nombreuses publications ces dernières années, il n'existe aujourd'hui ni méthode ni outil permettant la simulation en un temps raisonnable de la fabrication d'une pièce "complexe" (autre qu'un mur). Ce manque d'outil de simulation est imputable à la relative jeunesse de ces procédés et à la connaissance seulement partielle des phénomènes multi-physiques mis en jeu au cours des processus de fabrication. La complexité de ces phénomènes implique de plus aujourd'hui un temps de simulation très important [Kumar and Roy, 2009].

2.2 Quelle approche DFM pour la fabrication additive ?

Nous avons vu dans cette section que les caractéristiques des pièces obtenues par fabrication additive dépendent fortement des choix concernant les stratégies de fabrication ainsi que des phénomènes qu'ils induisent. Pour s'assurer de garantir les caractéristiques attendues des pièces fabriquées, il est donc nécessaire de choisir la gamme de fabrication complète au plus tôt dans le processus de conception. Une **approche indirecte** est donc à privilégier.

D'autre part, il a été montré qu'à la vue de la complexité des phénomènes physiques mis en jeu au cours du processus de fabrication, l'utilisation de simples règles pour sélectionner une gamme de fabrication est inadaptée. Ce choix doit se faire **à partir de la simulation de ce processus**. C'est la géométrie résultante de cette simulation qui doit ensuite être comparée aux attentes du cahier des charges fonctionnel à l'aide **de mesures de types binaire et quantitative**.

Les **entrées** de la méthodologie doivent donc être **le cahier des charges fonctionnel** d'un côté et de l'autre, **le modèle multi-physique**, les paramètres de fabrication utilisés, ainsi que **les caractéristiques générales** de la machine de production. En effet ces dernières doivent nécessairement être prises en compte pour faire un choix de gamme de fabrication.

La sortie de la méthodologie doit être **la géométrie optimale** du produit étudié ainsi que **la gamme de fabrication associée**.

Maintenant que nous avons vu quelle approche DFM est nécessaire pour s'assurer de

répondre aux objectifs fixés en chapitre 1, nous allons étudier l'état de l'art des méthodologies DFM existantes associées à la fabrication additive.

3 Les méthodes DFAM existantes

Comparativement aux procédés classiques, peu de méthodologies de type Design For Manufacturing ont été développées pour les procédés additifs. On parle alors de DFAM pour Design For Additive Manufacturing. Cette partie présente les quelques travaux existant ainsi que, selon nous, leurs limites.

3.1 Les méthodologies de choix de procédés

Ces méthodologies représentent la majorité des travaux portant sur le DFAM. Elles consistent à sélectionner, dans une liste finie de procédés, le plus adapté pour fabriquer une pièce donnée.

Elles sont généralement multicritères et comparent les procédés additifs entre eux. Les critères utilisés sont majoritairement le temps et le coût de fabrication, la précision et l'état de surface atteignables et la tenue mécanique attendue. La sélection se fait alors à l'aide de méthode classique de choix telle que la méthode TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) [Byun and Lee, 2004] ou encore la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) [Armilotta, 2008]. Ces méthodologies permettent d'avoir une première réponse quant au choix du procédé. Elles restent cependant relativement limitées de par la méthode de détermination de leurs indices. Ces derniers sont, dans la grande majorité, issus de mesures expérimentales faites sur des pièces tests telles que celles présentées précédemment. Le principe est, pour chaque critère, de définir une valeur unique caractérisant le procédé. Or nous avons vu dans la section précédente que cela n'était absolument pas représentatif. Ainsi, la valeur des indices dépend de la géométrie de la pièce, mais aussi des stratégies de fabrication utilisées.

Quelques travaux portant sur la définition plus précise du temps et du coût de fabrication ont été publiés. Ils portent sur la comparaison d'un procédé additif avec un procédé traditionnel. Ainsi, *Ruffo et al.* proposent un modèle pour estimer et comparer le coût de fabrication de pièces plastiques pour la technologie lit de poudre et l'injection plastique [Ruffo and Hague, 2007]. La géométrie ainsi que les choix de stratégies de fabrication y sont pris en compte. Des travaux similaires sont proposés par *Atzeni et Salmi* pour les pièces métalliques fabriquées avec la technologie lit de poudre ou par moulage sous pression [Atzeni and Salmi, 2012]. Bien qu'utilisant des modèles plus précis, ces quelques travaux partent de l'hypothèse que la pièce étudiée est réalisable quelles que soient les stratégies de fabrication choisies et ne prennent pas en compte les phénomènes physiques mis en jeu au cours du processus de fabrication. Ainsi, les résultats obtenus peuvent ne pas correspondre du tout à la réalité. En effet, la pièce n'est en fait pas fabricable en l'état ou, du moins, nécessite une étape de parachèvement supplémentaire.

Globalement les méthodologies existantes permettent de faire un pré-choix de procédé et mettent en évidence l'intérêt économique de la fabrication additive pour les petites et moyennes séries. Elles ne permettent, cependant, pas de garantir la fabricabilité des pièces avec le procédé sélectionné. De plus elles n'apportent pas d'information à l'utilisateur quant aux zones critiques de la pièce pour l'aider à adapter sa géométrie vis-à-vis du procédé.

Sur ce point, l'approche de conception modulaire et hybride que propose *Olivier Kerbrat* dans ses travaux de thèse est la transition entre ces méthodologies et la démarche de conception de produit [Kerbrat, 2009]. Il propose, à partir des mêmes indices que précédemment, de choisir un procédé pour fabriquer non pas la pièce étudiée dans son ensemble, mais seulement des parties. Ainsi chaque procédé est mis à profit pour réaliser les zones pour lesquels il est le plus adapté, le résultat est la définition de modules fabriqués avec différents procédés qui assemblés forment la pièce souhaitée. Les propositions obtenues sont cependant restreintes par la géométrie de cette dernière.

3.2 Méthodes existantes d'aide à la conception pour la fabrication additive

3.2.1 Prise en compte des caractéristiques de type contrainte

Sur ce point, beaucoup de travaux sont de type indirect. Ils ont longtemps consisté, pour une pièce donnée, à déterminer l'orientation de posage la plus adaptée suivant différents critères : le coût et le temps de fabrication [Alexander, 1998], le support nécessaire et l'état de surface attendu [Byun and Lee, 2006]. Les optimisations sont généralement multicritères et basées sur des algorithmes génétiques [Canellidis et al., 2009].

Ces approches permettent de prendre en compte les caractéristiques générales du procédé choisi. Les indices utilisés se sont, au fur et à mesure, complexifiés pour être plus réalistes, mais ils restent encore une fois très théoriques. Par exemple du point de vue de l'état de surface seul le "phénomène escalier" est pris en compte. Le choix des stratégies de trajectoire n'est, par ailleurs, pas étudié. L'orientation de fabrication finalement sélectionnée ne garantit, de ce fait, pas la fabricabilité des pièces et des écarts importants peuvent exister entre les modèles CAO et les géométries réellement fabriquées.

Proches de ces études, quelques travaux portent sur l'établissement de règles de conception et de règles de fabrication permettant de concevoir et de fabriquer les pièces en prenant en compte les caractéristiques générales des procédés étudiés [Bandera et al., 2004, Filippi and Cristofolini, 2007, Teitelbaum, 2009]. Facilement compréhensibles par le concepteur, les règles proposées sont, cependant, relativement basiques et très génériques (par exemple : s'assurer que les dimensions des pièces sont inférieures aux dimensions de la machine, minimiser la hauteur des pièces, minimiser les porte-à-faux). De ce fait, elles ne permettent pas non plus, réellement, de prendre en compte les phénomènes liés au processus de fabrication. De plus, l'application de ces règles métiers se fait après que la topologie générale des pièces soit déterminée, il est donc difficile de s'assurer de tirer profit des opportunités offertes par les procédés additifs.

Toutes ces approches n'apportent pas d'indication quant aux zones complexes à fabriquer. Or elles partent toutes de la géométrie détaillée des pièces à réaliser. Ainsi les zones non fonctionnelles peuvent être paradoxalement celles qui impactent le plus sur la fabricabilité. Il pourrait donc être avantageux, selon nous, d'employer ces approches non pas à partir de la géométrie précise des pièces, mais à partir des surfaces et, plus généralement, des entités fonctionnelles tirées de leur cahier des charges fonctionnel. Ainsi seules les géométries fonctionnellement indispensables guideront le choix d'orientation de fabrication. La topologie générale de la pièce n'étant pas encore définie, elle pourra l'être par

la suite en prenant en compte ce choix. Il n'existe à l'heure actuelle, d'après nous, aucune méthodologie exploitant cette idée.

Il existe pourtant quelques méthodologies générales portant sur conception pour la fabrication additive. Mais, à l'image de celles proposées par *J. Kerninon* ou *S. Yim*, malgré une prise en compte des choix de stratégies de fabrication plus précise, elles ne permettent que de modifier localement quelques paramètres d'une géométrie initialement définie.

J. Kerninon propose la modification locale d'une CAO initiale à partir d'un choix de stratégies de fabrication au regard des spécifications fonctionnelles exigées [Kerninon, 2010]. *S. Yim*, de son côté, se propose d'optimiser le modèle paramétrique des pièces au regard à la fois du choix de la gamme de fabrication et du cahier des charges [Yim, 2007]. Dans les deux cas, les solutions proposées sont très proches de la géométrie initiale. De plus, l'impact des paramètres de fabrication sur la géométrie des pièces n'est pas le résultat d'une simulation des phénomènes physiques mis en jeu. Ainsi, les géométries proposées sont théoriques et ne garantissent, encore une fois, pas la fabricabilité des pièces conçues ou plutôt reconçues.

Enfin, **la prise en compte des contraintes de fabrication associées aux procédés additifs n'est aujourd'hui que théorique**. Les méthodes ou méthodologies développées sont basées sur des modèles simplistes du processus de fabrication qui ne prennent, à aucun moment, les phénomènes physiques mis en jeu. Ainsi **elles ne permettent pas de garantir la fabricabilité** des pièces proposées et encore moins de la maximiser. De plus, partant toutes d'une définition précise de la géométrie des pièces étudiées, les quelques propositions de conception sont toujours très proches des géométries initiales. Ce qui ne **permet pas de tirer profit des opportunités** de la fabrication additive.

3.2.2 Prise en compte des caractéristiques de type opportunité

Avec le développement des outils mathématiques d'optimisation, de plus en plus de travaux théoriques s'intéressent aux opportunités que la fabrication additive peut offrir, en termes de géométrie et de matériau. Les hypothèses de la grande majorité de ces travaux, concernant les procédés additifs, sont [Xia and Wang, 2008, Rodrigue and Rivette, 2010] :

- il n'y a aucune limitation de forme,
- il n'y a aucune limitation concernant la répartition du ou des matériaux,
- le coût de fabrication est totalement décorrélé de la complexité géométrique des pièces.

Les méthodologies proposées consistent alors à optimiser la forme et/ou la répartition de matériau des produits par rapport exclusivement à leur cahier des charges fonctionnel. Pour ce faire les méthodes d'optimisation sont principalement de type topologique, de forme ou un couplage des deux. La figure 2.16 montre l'exemple de la reconception d'une pièce aéronautique (support de charnière d'A320), initialement fabriquée par usinage. La reconception se fait alors à partir du cahier des charges fonctionnel initial constitué d'un domaine de conception et d'un chargement mécanique. Le domaine de conception est composé de volumes "obligatoires" où il doit fonctionnellement y avoir de la matière (en rouge) et de volumes "autorisés" où il peut y avoir (en vert). Les objectifs de l'optimisation

sont ici de minimiser la masse tout en maximisant la raideur de la pièce [Tomlin and Meyer, 2011]. Le résultat est une pièce à géométrie complexe non intuitive.

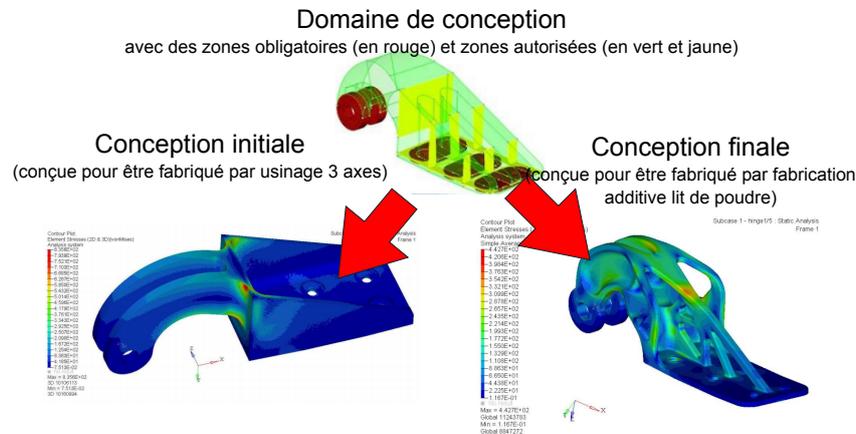


FIGURE 2.16 – Illustration de l'exploration des opportunités de la fabrication additive grâce à l'utilisation de l'optimisation topologique (à partir de [Tomlin and Meyer, 2011]).

Ce type d'approche permet réellement de s'affranchir du phénomène d'inertie psychologique qui pourrait empêcher les concepteurs de tirer pleinement profit des opportunités offertes par la fabrication additive [Liao et al., 2008]. Toutefois, ces études sont théoriques. Très peu de pièces sont réellement fabriquées et lorsqu'elles le sont, aucune information n'est disponible sur les possibles difficultés de fabrication ou les caractéristiques réelles des pièces fabriquées.

Nous avons vu que l'emploi des procédés additifs nécessite une connaissance poussée des phénomènes physiques mis en jeu. La prise en compte des opportunités d'un procédé additif sans celles de ces phénomènes n'a donc pas de réel intérêt pour le concepteur.

D.W. Rosen est, à notre connaissance, le seul, jusqu'à présent, à proposer une méthodologie pour prendre en compte, au moins dans le principe, des contraintes liées à la fabrication additive tout en proposant une géométrie optimisée par rapport à un cahier des charges fonctionnel. Pour cela, il propose d'optimiser des structures en treillis dont l'élément de base est une entité "fabricable" par ajout de matière (Fig. 2.17). Les variables de l'optimisation paramétriques sont alors les dimensions des éléments constituant le volume de la structure. Pour assurer leur fabricabilité, celles-ci sont contraintes par la dimension minimale théoriquement fabricable par le procédé utilisé (la stéréographie dans ce cas) [Rosen, 2007, Rosen, 2009].

La prise en compte du procédé de fabrication est cependant limitée à une réflexion sur la dimension minimale fabricable par le procédé, ce qui n'est malheureusement pas du tout la seule contrainte à prendre en compte. Bien que l'intégration de contraintes supplémentaires, liées au procédé de fabrication, pourrait être envisageable dans cette méthodologie, nous voyons deux principaux verrous à son utilisation :

- Il n'est pas prévu de guider le concepteur dans ses choix de géométrie initiale, ainsi la pièce étudiée pourrait dès le départ ne pas être fabricable avec le procédé choisi (par exemple à cause de dimensions incompatibles).
- Les phénomènes physiques mis en jeu au cours du processus de fabrication sont encore une fois non intégrés dans le raisonnement. La géométrie proposée n'est donc

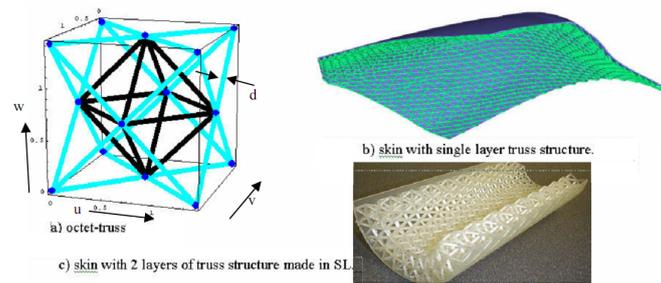


FIGURE 2.17 – Structure en treillis proposée par *D.W. Rosen* [Rosen, 2007].

toujours pas garantie d'être fabricable, même en cas de prise en compte de plusieurs contraintes procédé.

Par ailleurs, nous avons vu qu'une optimisation paramétrique n'est pas la plus adaptée pour s'assurer de tirer profit des opportunités de la fabrication additive. La géométrie optimale n'est pas forcément un treillis, or seule cette solution est ici possible.

3.3 Synthèse

L'analyse des travaux existants permet de mettre en lumière **le manque d'outils performants d'aide à la conception pour la fabrication additive**. Les méthodologies proposées ne permettent qu'une prise en compte partielle et cloisonnée des connaissances du procédé de fabrication. Elles s'intègrent encore dans une approche de type séquentiel (Fig.2.18) en trois étapes :

1. le processus de conception
2. le choix d'une stratégie de fabrication
3. la fabrication

Les connaissances relatives au procédé sont alors prises en compte séparément à chaque étape, à travers l'utilisation de règles génériques. L'effet "over the wall" (Fig. 2.1) est ici encore présent, car il y a très peu de retours d'information entre les étapes.

D'un côté, les méthodes de prise en compte des contraintes de fabrication qui partent d'une géométrie de pièce initialement définie. Elles consistent à sélectionner une stratégie de fabrication au regard de critères généraux. Ces approches ne permettent tout d'abord pas réellement de s'écarter de la morphologie de la géométrie initiale. De plus, parce que seules des caractéristiques générales des procédés sont prises en compte, les géométries proposées ne sont absolument pas garanties d'être fabricables. Selon nous, ces approches devraient être appliquées non pas à la géométrie précise des pièces, mais aux surfaces et, plus généralement, aux entités fonctionnelles tirées directement de leur cahier des charges fonctionnel. Le choix de stratégies de fabrication pourrait alors guider la définition de la morphologie de la pièce.

De l'autre côté, les méthodes mathématiques d'optimisation permettent de tirer théoriquement profit des opportunités de la fabrication additive. Ne prenant pas en compte les contraintes liées au procédé, les géométries obtenues, bien qu'innovantes, ne peuvent cependant pas être utilisées directement par le concepteur.

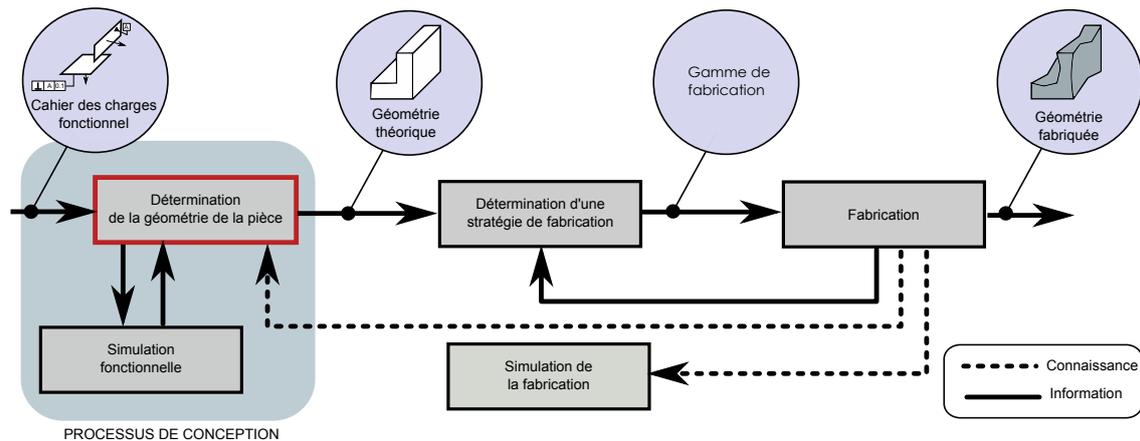


FIGURE 2.18 – État de l'art de la chaîne numérique en fabrication additive.

Aujourd'hui seule la méthodologie proposée par *Rosen* permet théoriquement la prise en compte à la fois de contraintes et d'opportunités liées à l'utilisation de la fabrication additive [Rosen, 2007]. Or nous avons vu qu'elle est, en réalité, quasi aussi limitée que celles ne permettant de prendre en compte qu'un seul de ces aspects. Dans tous les cas, les géométries proposées ne sont pas garanties d'être fabricables et des écarts importants peuvent exister entre les modèles CAO proposés et les géométries réellement fabriquées. Ceci provient de la non prise en compte systématique des phénomènes physiques mis en jeu au cours du processus de fabrication.

Il n'existe donc pas de réelle méthodologie DFAM qui garantit à la fois de tirer profit des opportunités offertes par la fabrication additive et de garantir la fabricabilité des pièces conçues. Nous constatons qu'en particulier les phénomènes physiques mis en jeu au cours du processus de fabrication ne sont jamais pris en compte. Nous avons pourtant vu que sans leurs connaissances, il n'est pas possible d'estimer, de manière fiable, la fabricabilité des pièces.

4 Problématique de nos travaux

L'analyse de l'état de l'art des travaux de recherche portant sur le thème de la conception pour la fabrication, puis celle des paramètres influents les caractéristiques des pièces produites en fabrication additive, nous a permis de définir le type d'approche à mettre en place pour :

- Permettre au concepteur d'intégrer au plus tôt, dans sa démarche de conception, les spécificités de la fabrication additive pour maximiser la fabricabilité des pièces proposées.
- Aider le concepteur à tirer profit des opportunités offertes par la fabrication additive pour proposer des géométries répondant au mieux à leur cahier des charges initial.

Il a été vu qu'une **approche indirecte** est nécessaire, permettant de choisir **une gamme de fabrication** qui grâce à la simulation du processus de fabrication définira la géométrie du produit. C'est la géométrie résultante de cette simulation qui doit ensuite être comparée aux attentes du cahier des charges fonctionnel à l'aide de **mesures de types binaire et quantitative**.

Or, nous avons vu que l'approche séquentielle dans laquelle s'inscrivent les méthodes actuelles d'aide à la conception pour la fabrication additive n'est pas adaptée pour répondre à ces objectifs.

Nous proposons donc **une nouvelle méthodologie DFAM** qui sera détaillée dans le prochain chapitre de ce manuscrit. Le concept général est, à partir du cahier des charges fonctionnel attendu et des caractéristiques du procédé utilisé, d'optimiser la stratégie de fabrication pour en déduire, par simulation, la géométrie correspondante (Fig. 2.19).

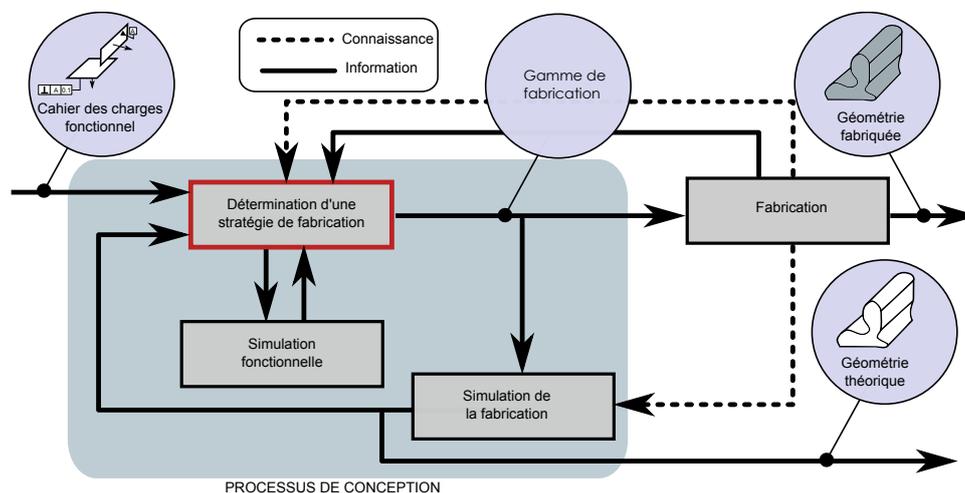


FIGURE 2.19 – Intégration de notre méthodologie dans la chaîne numérique en fabrication additive.

Garantir les caractéristiques des pièces après fabrication nécessite la prise en compte initiale des choix de stratégies de fabrication et la simulation des phénomènes physiques mis en jeu au cours du processus de fabrication. Les stratégies de fabrication seront donc optimisées à travers la qualification fonctionnelle des géométries correspondantes. Celles-

ci étant obtenues par simulation du processus de fabrication, leurs caractéristiques seront donc réalistes.

De plus, pour s'assurer de tirer profit des opportunités offertes par la fabrication additive, l'optimisation topologique, encadré par les choix de stratégies de fabrication, sera employée. Ainsi le domaine de conception sera défini à partir des entités fonctionnelles issues du cahier des charges du produit et des caractéristiques globales de la machine de fabrication choisie.

Chapitre 3

Méthodologie DFAM proposée

Ce chapitre a pour objectif de **présenter la méthodologie DFAM** que nous avons mise en place au cours de nos travaux de thèse. Le chapitre précédent nous a permis de mettre en évidence le manque d'outil d'aide à la conception pour la fabrication additive. Nous allons détailler ici la structure de la méthodologie que nous proposons pour répondre à ce manque.

La première partie portera sur la **description générale** de la méthodologie, les quatre principales étapes la composant seront introduites. **Les données nécessaires** pour alimenter la méthodologie, tant du point de vue du cahier charges fonctionnel que du procédé de fabrication, seront décrites.

La méthodologie proposée est générale et applicable à l'ensemble des procédés additifs utilisés dans le cadre de la fabrication directe. Chacun de ces procédés étant différent, seule la structure des étapes de la méthodologie est commune. La deuxième partie de ce chapitre détaille la structure de chacune des quatre étapes composant notre méthodologie.

La troisième partie conclura sur **les principaux points forts de la méthodologie** au regard des verrous identifiés au chapitre 2.

1 Vision générale

1.1 La structure de la méthodologie

L'objectif de la méthodologie que nous proposons est d'intégrer au plus tôt, dans le processus de conception des produits, les spécificités de la fabrication additive. Comme il a été vu dans les précédents chapitres, il y a deux aspects à prendre en compte :

- La possibilité de fabriquer des géométries réputées complexes, qui étaient jusqu'à présent difficiles, voir impossibles à fabriquer. De par le phénomène d'inertie psychologique, ces géométries sont intuitivement difficiles à déterminer pour les concepteurs.
- L'impact, aussi bien géométrique qu'économique, du choix des stratégies de fabrication sur les caractéristiques des pièces produites.

Pour répondre à la première problématique, notre parti pris est d'utiliser des outils d'optimisation topologique. Nous avons, en effet, vu que ce type d'optimisation est un outil de conception qui permet, sans a priori, d'obtenir une topologie de pièce optimisée vis-à-vis des objectifs du problème. Il est alors nécessaire de définir :

- Un domaine de conception, comportant des zones nécessitant obligatoirement de la matière et des zones où la répartition est libre.
- Une ou plusieurs fonctions objectifs et, si nécessaire, des fonctions contraintes.

Ces outils ne permettant de ne prendre en compte que des critères globaux, nous avons vu que leur utilisation seule donne des résultats théoriques qui ne sont, en réalité, pas compatibles avec la seconde problématique énoncée. Ainsi, l'optimisation topologique doit être "encadrée" par la prise en compte des choix liés aux stratégies de fabrication.

Pour cela, la méthodologie proposée est organisée en quatre principales étapes (Fig. 3.1) :

1. La définition d'un **domaine de conception**. Ce dernier caractérise l'espace où la matière constituant le produit final à concevoir est autorisée à la fois par le cahier des charges fonctionnel et le procédé de fabrication. Il doit donc être le résultat de l'intersection entre le domaine fonctionnel, tiré du cahier des charges du produit à concevoir, et le domaine procédé, accessible par la machine utilisée. L'idée est de choisir, au regard des entités fonctionnelles du problème et des contraintes qui leurs sont associées, la ou les orientations de fabrication à utiliser pour fabriquer la pièce qui est à concevoir. C'est à partir de ce choix et des caractéristiques générales de la machine que le domaine de conception est alors défini.
2. La définition de la **géométrie théorique finale du produit**. Cette étape permet, à l'intérieur du domaine de conception, de déterminer la géométrie théorique du produit répondant le mieux aux objectifs et contraintes globaux du problème. Ces derniers sont issus, à la fois, du cahier des charges fonctionnel et des règles métier issues de l'utilisation de la machine de production.
3. La définition de la **géométrie réaliste correspondante**. Celle-ci doit être à la fois la plus proche possible de la géométrie théorique et en même temps la plus facilement fabricable possible. Comme nous l'avons vu précédemment, le choix de

stratégie de trajectoire est déterminant quant à la réelle fabricabilité d'une géométrie. Ainsi cette étape nécessite de sélectionner une stratégie de trajectoire à partir de la géométrie théorique et des règles métier liées au procédé. Parce que les règles métiers ne suffisent pas pour garantir la prédiction de la géométrie réellement fabriquée, il est ensuite nécessaire de simuler le processus de fabrication. Cette étape est un point clé de notre méthodologie, nous verrons par la suite qu'elle reste cependant aujourd'hui difficile à mettre en œuvre, à cause de la complexité des phénomènes physiques mis en jeu.

4. L'estimation de la géométrie. Pour un même cahier des charges initial, plusieurs stratégies de fabrication sont, généralement, possibles, tant du point de vue de l'orientation que de la trajectoire de fabrication. Chacune de ces stratégies correspondant à une géométrie différente du produit final, cette étape doit permettre de les comparer en termes de fonctionnalité et de fabricabilité. La géométrie optimale ainsi que la stratégie de fabrication correspondante pourront, alors, être identifiées et proposées à l'utilisateur.

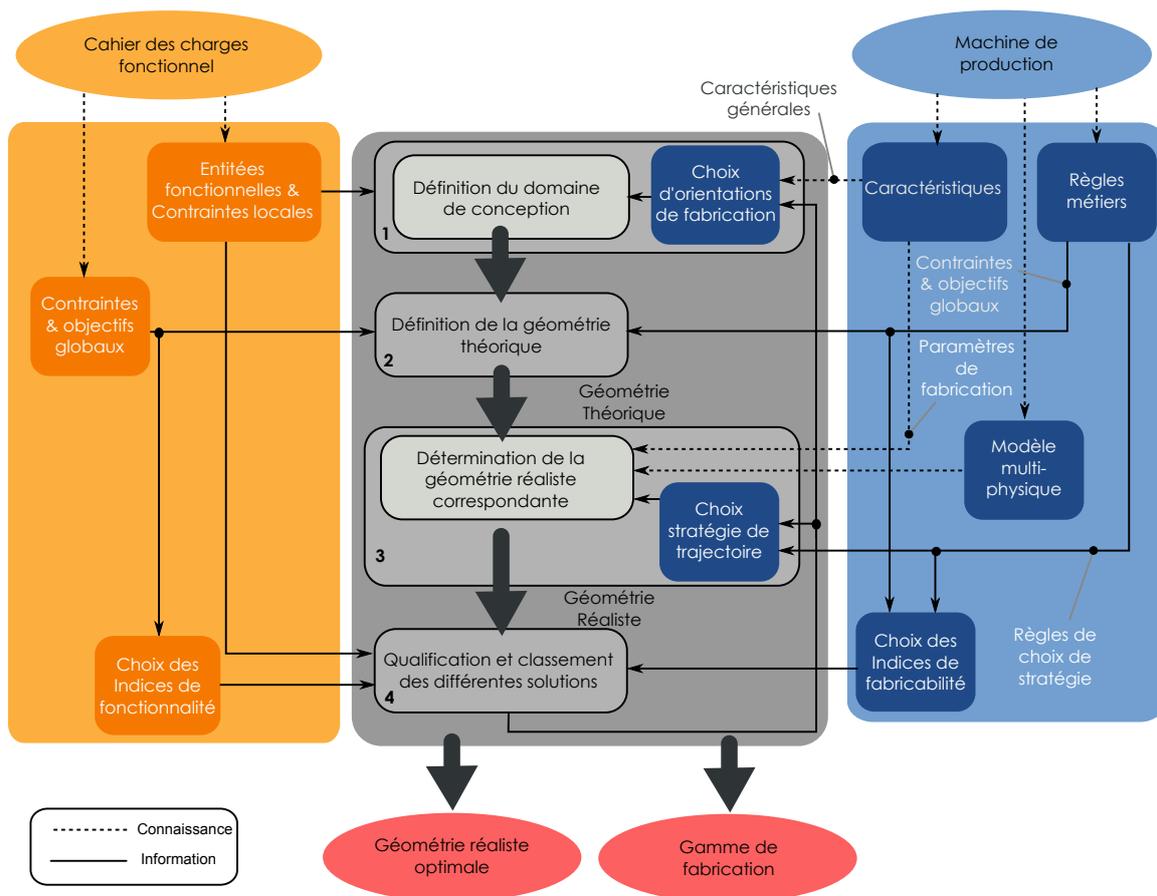


FIGURE 3.1 – Structure de la méthodologie proposée.

1.2 Les données nécessaires

1.2.1 Point de vue du procédé de fabrication

La mise en œuvre de la méthodologie proposée nécessite d’avoir initialement choisi la machine de production qui sera utilisée pour réaliser le produit à concevoir. En effet, comme nous l’avons vu au chapitre précédent, pour s’assurer de proposer une géométrie réaliste, il est nécessaire de prendre en compte l’ensemble des connaissances liées au moyen de production. Ces connaissances sont de trois types :

1. **Les caractéristiques générales de la machine**, qui peuvent être décrites sous forme de fiches. Elles correspondent à ce qui peut être retrouvé dans les travaux portant sur la sélection d’un procédé tel que ceux de *Massod* [Masood, 2002]. Elles correspondent aux caractéristiques physiques de la machine telles que la cinématique, les dimensions de l’espace de travail, les capacités en termes de précision et d’état de surface, les dimensions minimales fabricables ou encore les matériaux disponibles. Elles regroupent également les paramètres de fabrication associés à la machine.
2. **Le modèle multi-physique du procédé**, qui permet de simuler le processus de fabrication et donc de prédire les caractéristiques fonctionnelles des géométries finales correspondant aux stratégies de fabrication étudiées. La difficulté ici est de déterminer des modèles réalistes permettant de simuler dans un temps acceptable la fabrication. Nous avons vu que la relative jeunesse de la fabrication additive implique que de tels modèles n’existent pas actuellement en l’état. Dans le chapitre 4 de ce manuscrit, une modélisation du procédé de projection de poudres sera proposée, il permettra d’illustrer nos propos.
3. **Les règles métiers liées au procédé**. Elles peuvent être générales et s’appliquer à la géométrie de la pièce, elles sont alors traduites en fonctions objectifs ou contraintes pour alimenter l’étape d’optimisation topologique de la méthodologie. Elles peuvent aussi s’appliquer directement au choix des stratégies de trajectoires. À partir de ces règles métiers, des indices sont définis pour estimer la fabricabilité des géométries obtenues suite aux différents choix de stratégie de fabrication. Comme nous l’avons vu au chapitre précédent, il existe actuellement peu de règles métiers associées à la fabrication additive, quelques-unes seront proposées et utilisées dans ce manuscrit pour illustrer cet aspect de notre méthodologie. La structure de cette dernière permet cependant d’intégrer au fur et à mesure de nouvelles règles qui seront, sans aucun doute, prochainement développées.

Notons que deux procédés de fabrication peuvent être nécessaires pour atteindre les spécifications attendues : un procédé de fabrication et un procédé de parachèvement. Dans ce cas, il est également nécessaire de prendre en compte en parallèle les caractéristiques des deux procédés. Dans ce manuscrit, la seule caractéristique liée au procédé de parachèvement qui sera prise en compte est le besoin ou non de surépaisseur.

Par ailleurs, pour comparer différents procédés de fabrication vis-à-vis d’un même cahier des charges, il est envisageable d’appliquer la méthodologie une fois pour chacun d’entre eux. Les géométries finalement proposées pourront alors être comparées pour identifier le procédé le plus adapté pour répondre au besoin fonctionnel énoncé.

1.2.2 Point de vue du cahier des charges

Dans le cadre de notre méthodologie, le cahier des charges fonctionnel est décomposé en données locales et globales.

1. **Les données locales** sont les conditions limites du problème de conception. Elles sont composées des entités fonctionnelles telles que des surfaces fonctionnelles ou des zones d'application d'efforts ou de déplacements, ainsi que des spécifications géométriques et dimensionnelles associées. Elles se composent aussi des contraintes locales telles que les contraintes d'assemblage liées à l'intégration de la pièce à concevoir dans un système plus complexe. Ces données permettent de caractériser le domaine fonctionnel associé à chaque problème.
2. **Les données globales** portent sur la pièce dans son ensemble. En ce qui concerne la géométrie, elles sont traduites en fonctions contraintes et objectifs pour alimenter l'étape d'optimisation topologique de notre méthodologie. Une série d'indices est alors définie pour classer les différentes géométries finalement proposées par rapport aux objectifs globaux. En ce qui concerne les matériaux souhaités, il s'agit de s'assurer que le procédé choisi permette leur mise en œuvre.

2 Détails de la méthodologie

Dans cette section, nous allons détailler les quatre étapes de la méthodologie et en particulier, pour chacune d'elles, la façon dont sont utilisées les données d'entrée ainsi que ce qu'il en ressort. Pour illustrer nos propos, nous nous appuyerons sur l'exemple de la conception de la pièce dont un extrait du cahier des charges fonctionnel est présenté figure 3.2.

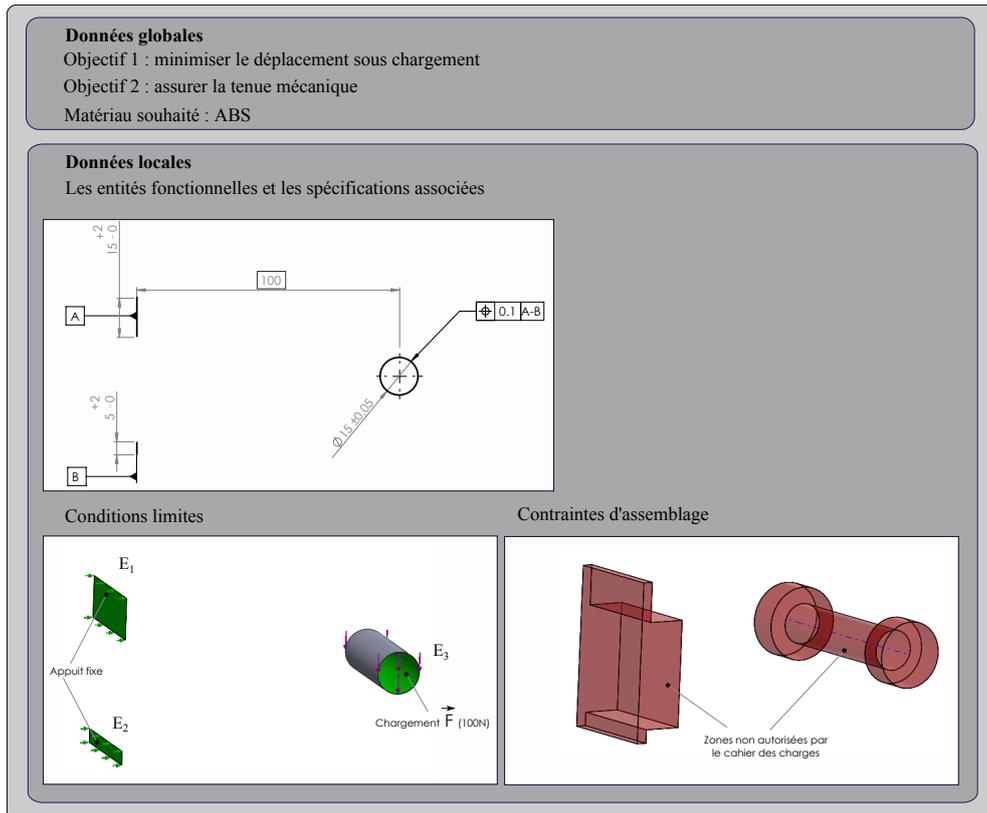


FIGURE 3.2 – Cahier des charges de la pièce exemple.

L'étude de cette pièce, relativement simple, va nous permettre d'illustrer la méthodologie en partant de surfaces fonctionnelles usuelles (cylindriques et planes). Cette conception se fera au regard de la machine Mojo du constructeur Stratasys. Basée sur le principe de fabrication par dépôt de fil plastique, cette machine fait partie de la nouvelle génération des machines industrielles permettant la fabrication de pièces fonctionnelles. Ces caractéristiques principales sont données figure 3.3.



Caractéristiques générales :
 Dimensions de l'espace de travail : 140 x140 x 140 mm³
 Cinématique : 3 axes positionnés
 $\Delta l(z) = \pm 0,15$ mm
 $\Delta l(x,y) = \pm 0,1$ mm
 $d_{\text{mini}}(z) = 0,18$ mm
 $d_{\text{mini}}(x,y) = 0,21$ mm
 Porte-à-faux maximal : 0°
 Matériau du fil : ABS
Règles métier :
 Globale : Minimiser la masse de la pièce

FIGURE 3.3 – Principales caractéristiques de la machine Mojo, utilisant le procédé de dépôt de fil fondu.

2.1 Définition du domaine de conception

2.1.1 Le concept

Le domaine de conception caractérise l'espace où la matière constituant le produit final à concevoir est autorisée à la fois par le cahier des charges fonctionnel et le procédé de fabrication. Noté $\mathcal{D}_{\text{conception}}$, il est composé de volumes obligatoires et de volumes admissibles et peut être exprimé mathématiquement par l'équation :

$$\mathcal{D}_{\text{conception}} = \mathcal{D}_{\text{procédé}} \cap \mathcal{D}_{\text{fonctionnel}} \tag{3.1}$$

Où $\mathcal{D}_{\text{procédé}}$ caractérise l'espace accessible par le procédé de fabrication choisi et $\mathcal{D}_{\text{fonctionnel}}$ correspond à l'espace autorisé par le cahier des charges fonctionnel du problème.

L'ensemble des données nécessaires à la définition du domaine de conception est synthétisé dans la figure 3.4.

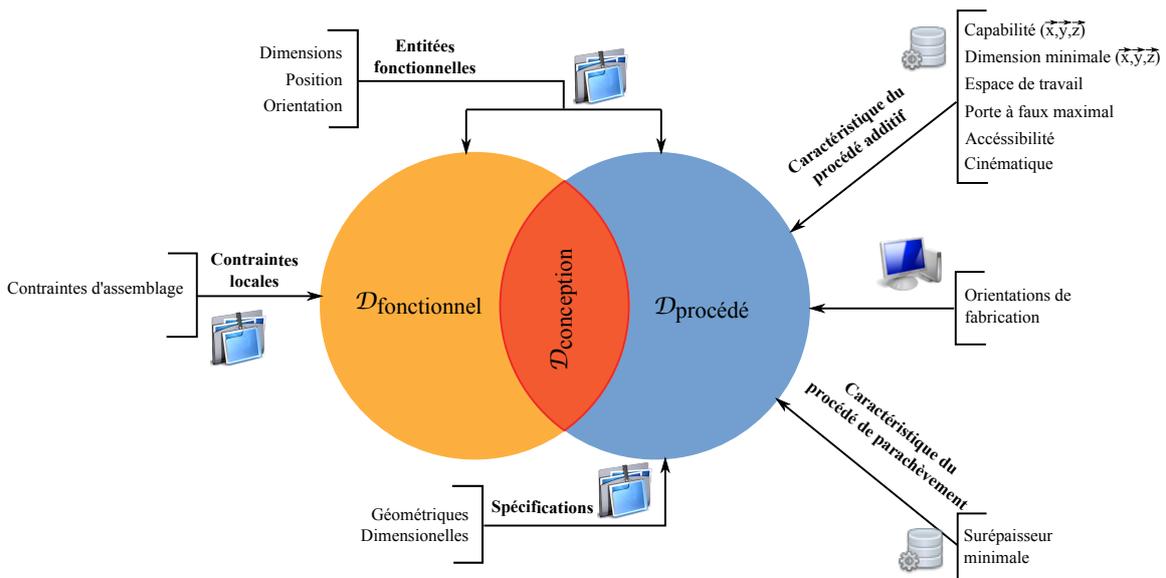


FIGURE 3.4 – Schématisation de l'étape de définition du domaine de conception et des données nécessaires.

Le domaine fonctionnel

$\mathcal{D}_{fonctionnel}$ est directement défini à partir du cahier des charges fonctionnel du produit à concevoir. Sa géométrie est donnée par les entités fonctionnelles du problème, notées E_i , et les contraintes locales associées. Les entités fonctionnelles seront limitées, dans ce manuscrit, à des surfaces fonctionnelles. La méthodologie proposée permet cependant l'utilisation d'entités volumiques répondant par exemple à un besoin de résistance minimale ou encore d'entités plus conceptuelles telles que des liaisons entre deux solides.

Dans tous les cas, il est nécessaire d'associer à ces entités une position dans l'espace, des dimensions et une orientation pour définir où doit se trouver la matière. De même, les contraintes locales du problème de conception sont à prendre en compte. Elles correspondent aux liaisons de la pièce à concevoir avec le milieu extérieur et imposent des zones dites interdites où la matière n'est pas autorisée.

La figure 3.5 illustre la définition du domaine fonctionnel dans le cas de notre exemple.

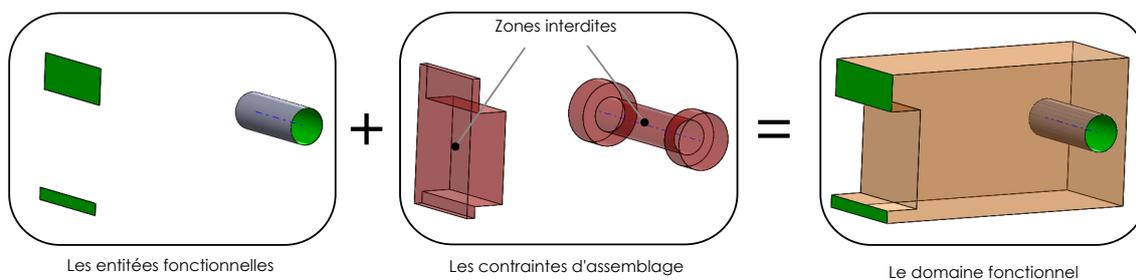


FIGURE 3.5 – Illustration de la définition du domaine fonctionnel.

Le domaine procédé

Pour un problème de conception donné, le domaine procédé est caractérisé par :

- L'ensemble des volumes accessibles par le procédé et compatible avec l'obtention des entités fonctionnelles.
- L'ensemble des volumes nécessitant obligatoirement de la matière pour s'assurer de respecter les spécifications associées aux entités fonctionnelles .

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, la définition de ces volumes est directement liée aux choix d'orientation de fabrication qui dictent à la fois le besoin ou non de support et les caractéristiques géométriques des pièces. L'idée est donc, à partir des entités fonctionnelles et des spécifications associées de faire un choix d'orientation(s) de fabrication dont découlera le domaine procédé.

L'approche mise en œuvre ici se rapproche de celles que l'on a pu identifier dans l'analyse de l'état de l'art au paragraphe 3.2.1 du chapitre 2, la finalité est par contre inversée. En effet, les travaux existants proposent, à partir de la géométrie des pièces initialement fixée, de déterminer les orientations de fabrication les plus adaptées pour les réaliser. Les informations fonctionnelles sont ici perdues dans la définition géométrique des pièces, le choix d'orientations de fabrication se fait donc aussi bien par rapport aux

zones fonctionnelles que par rapport aux zones non fonctionnelles. Ainsi, contraintes par leurs zones non fonctionnelles, les pièces fabriquées peuvent ne pas respecter leur cahier des charges alors que le procédé choisi le permettait.

À l'inverse, nous proposons de partir des entités fonctionnelles pour choisir des orientations de fabrication qui encadreront, par la suite, la définition de la géométrie des pièces. Le choix d'orientation de fabrication est, en effet, exclusivement fait à partir des entités fonctionnelles et des spécifications associées et c'est à partir de ce choix que le domaine de conception de la future pièce est défini. Il nécessite la connaissance précise des caractéristiques générales de la machine utilisée, c'est à dire :

- L'espace de travail.
- Les contraintes d'accessibilité.
- La cinématique.
- La capabilité en fonction de l'orientation de fabrication.

Le domaine procédé peut alors être déterminé, il est composé de :

- **Volumes obligatoires** notés V_{o_i} . Ce sont des volumes où la présence de matière est nécessaire pour respecter, avec la machine choisie, les caractéristiques géométriques exigées. La géométrie finale proposée devra comporter ces volumes.
- **Volumes accessibles** par la machine, suivant les orientations de fabrication choisies. Ces volumes sont notés V_{a_j} et correspondent aux espaces où, du point de vue du procédé de fabrication, la pièce finale peut comporter de la matière.

Comme expliqué précédemment, il n'est pas toujours possible de répondre directement aux contraintes fonctionnelles locales, avec un seul procédé. L'emploi d'un procédé de parachèvement peut être alors nécessaire, impliquant des contraintes supplémentaires telles que des surépaisseurs minimales. Ces contraintes doivent également être prises en compte lors de la définition des volumes obligatoires.

La définition du domaine fonctionnel étant une étape classique dans le processus de conception des produits, nos travaux se sont donc plutôt concentrés sur la définition du domaine procédé. Le paragraphe suivant en décrit la structure générale.

2.1.2 Détermination du domaine procédé

La figure 3.6 présente l'algorithme complet utilisé pour déterminer le domaine procédé $\mathcal{D}_{procédé}$. La méthodologie est composée de quatre principales étapes qui sont détaillées dans cette section.

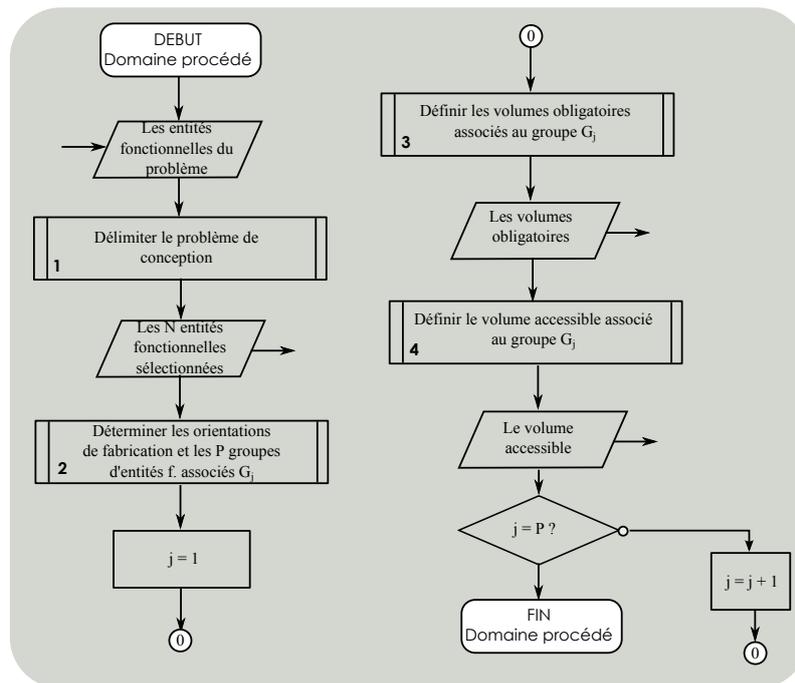


FIGURE 3.6 – Algorithme de la méthodologie permettant la détermination du domaine procédé.

La délimitation du problème de conception

L'objectif de cette phase est de définir si la machine choisie permet de lier l'ensemble des entités fonctionnelles du problème étudié en une seule pièce ou si elle nécessite de définir un assemblage. Il s'agit donc de vérifier si le volume englobant l'ensemble de ces entités est compatible ou non avec l'espace de travail de la machine. L'algorithme de cette étape est présenté figure 3.7.

Nous proposons de déterminer les dimensions du plus petit parallélépipède rectangle englobant les entités fonctionnelles du problème étudié. L'analyse de ses dimensions permet alors de déduire :

- S'il rentre dans l'espace de travail de la machine. Dans le cas contraire, le concepteur est amené à subdiviser le problème en plusieurs sous-problèmes, ce qui revient à transformer la pièce à concevoir en un assemblage de pièces. L'opération est répétée jusqu'à ce qu'il soit possible de définir N entités pouvant appartenir à une même pièce.
- Si le positionnement des entités fonctionnelles est contraint dans l'espace de travail. Il est, alors, nécessaire de prendre en compte cette contrainte dans le futur choix d'orientation de fabrication. Ce phénomène est illustré dans la figure 3.8.

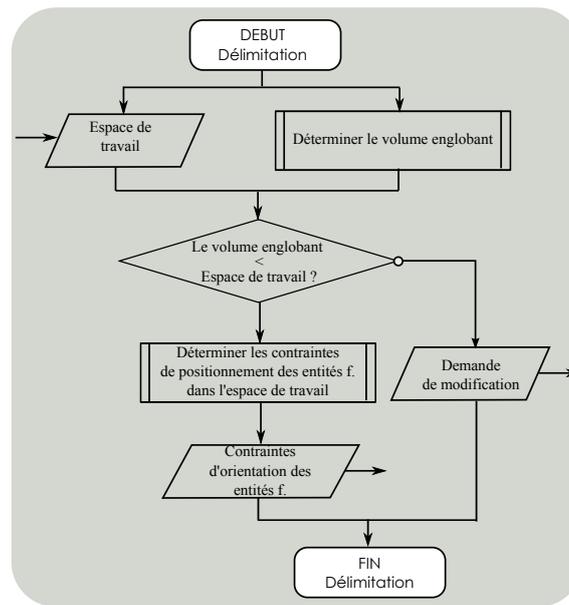


FIGURE 3.7 – Algorithme de l'étape de délimitation du problème de conception.

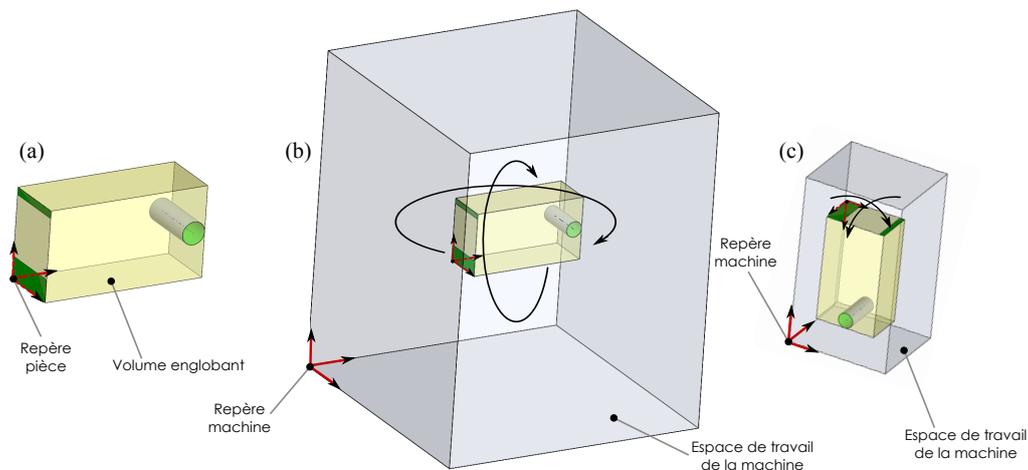


FIGURE 3.8 – Illustration de l'étape de délimitation du problème de conception. (a) volume englobant les entités fonctionnelles étudiées, (b) L'espace de travail ne contraint pas le choix de l'orientation de fabrication, (c) L'espace de travail contraint le choix de l'orientation de fabrication.

La détermination des orientations de fabrication

L'analyse de la géométrie de chaque entité fonctionnelle permet d'en déduire, des orientations de fabrication à privilégier pour les fabriquer [Ponche et al., 2012]. Ces orientations sont choisies pour :

- Minimiser le support potentiellement nécessaire à leur fabrication.

- Respecter les contraintes fonctionnelles locales.

Ainsi, à chaque entité fonctionnelle est associée une liste de vecteurs \vec{T}_k caractérisant les orientations à privilégier. Les entités fonctionnelles ayant un vecteur orientation en commun sont alors regroupées (Fig. 3.9) en p groupes G_j . L'objectif est, si possible, de déterminer une orientation de fabrication permettant de fabriquer au fur et à mesure chaque groupe défini. Le résultat dépend de quatre principaux facteurs :

- **La cinématique de la machine.** Si celle-ci est par exemple du type 2,5 axes, comme celles utilisant la technologie lit de poudre, une seule orientation peut être choisie, elle correspond à l'orientation de posage de la pièce. Par contre avec une cinématique 5 axes, il n'y a, potentiellement, pas de limite.
- **L'accessibilité des entités fonctionnelles** suivant l'orientation choisie. Celle-ci est déterminée à partir de la contrainte d'accessibilité liée à la machine et des positions relatives des différentes entités fonctionnelles. Ainsi le fait de fabriquer une entité avant une autre peut empêcher l'accès à cette dernière.
- **La nécessité de substrats** communs ou successifs pour fabriquer chaque groupe d'entités fonctionnelles dans les directions correspondantes. Chaque groupe d'entités doit en effet, pour être fabricable, avoir un substrat qui peut être soit un autre groupe soit le substrat initial.
- **La compatibilité de l'orientation étudiée** avec l'espace de travail de la machine. Cet aspect a été présenté au paragraphe précédent.

Comme expliqué précédemment, l'étape de détermination des orientations à privilégier peut utiliser les connaissances développées et exploitées dans les travaux portant sur les choix d'orientation de fabrication pour une géométrie initialement fixée (travaux présentés au paragraphe 3.2.1 du chapitre 2). Même si la démarche et la finalité ne sont pas les mêmes, les critères et règles de choix sont, en effet, communs.

L'étude des différents groupes d'entités G_j se fait de manière séquentielle : un groupe est sélectionné, les espaces obligatoires et admissibles associés sont déterminés en fonction de l'orientation de fabrication choisie, puis un second groupe est sélectionné et ainsi de suite jusqu'à ce que l'ensemble des groupes soit étudié et qu'ils aient tous au moins un volume à partir duquel ils puissent être fabriqués.

Pour un même ensemble d'entités fonctionnelles donné, plusieurs orientations de fabrication peuvent être possibles. Chacune d'elles peut permettre de définir un domaine procédé différent et donc, potentiellement, une géométrie finale de la pièce différente. Ces différentes orientations sont identifiées en faisant varier l'ordre d'étude des groupes G_j .

Dans l'exemple étudié, il existe deux orientations de fabrication communes à l'ensemble des entités fonctionnelles (Fig. 3.9). Il y a donc ici qu'un seul groupe G_1 et deux possibilités d'orientation.

La définition des volumes obligatoires

Les volumes obligatoires V_{o_i} sont les volumes de la pièce où, quelle que soit la géométrie finalement proposée, il doit y avoir de la matière. Garantir la présence des entités fonctionnelles dans la géométrie finale du produit et le respect des spécifications qui leurs sont

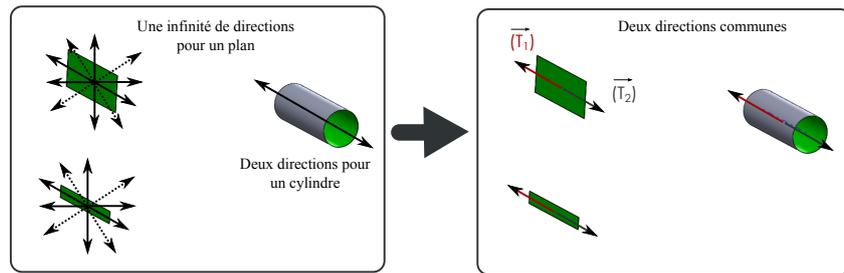


FIGURE 3.9 – Détermination du groupe d’entités fonctionnelles et des orientations de fabrication associées

associées nécessite en effet de définir des volumes minima de matière. Ces volumes sont définis en deux principales étapes à partir des caractéristiques de la machine choisie, des entités fonctionnelles et des spécifications associées ainsi que de l’orientation de fabrication choisie précédemment (Fig. 3.10).

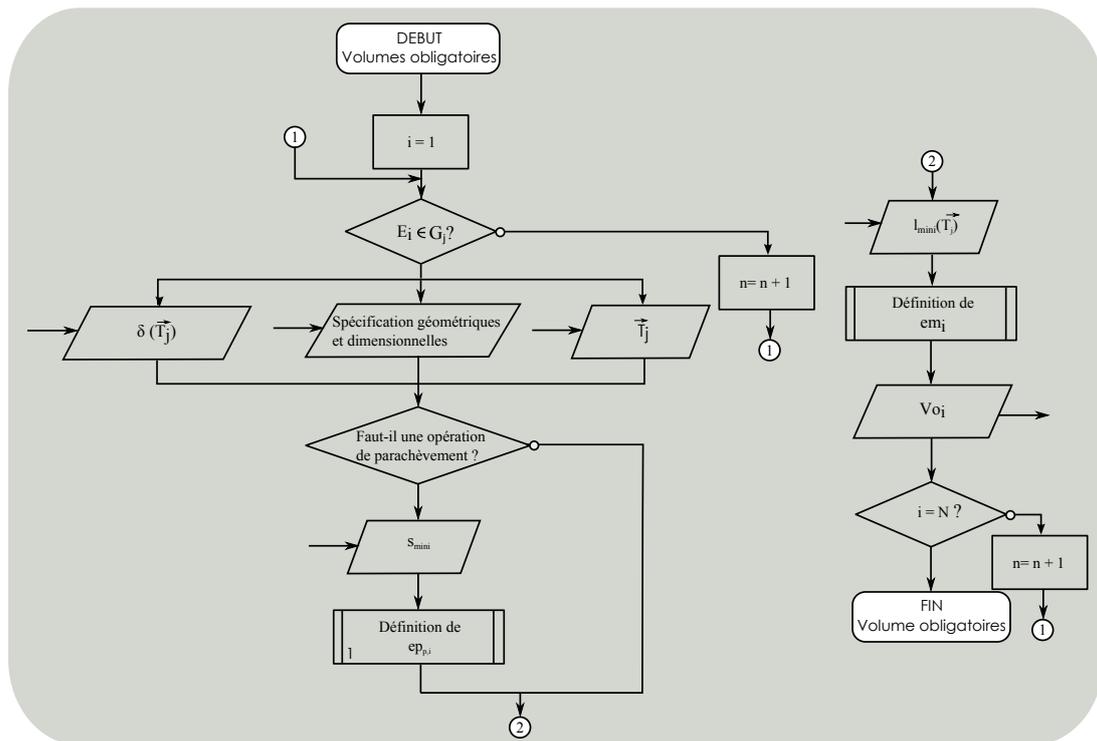


FIGURE 3.10 – Algorithme détaillant la définition des volumes obligatoires.

En premier lieu, pour chaque entité fonctionnelle E_i appartenant au groupe G_j , les spécifications associées sont comparées à la capacité de la machine dans la direction de fabrication \vec{T}_j sélectionnée. La nécessité ou non d’une opération de parachèvement est alors déterminée impliquant la définition d’une surépaisseur de parachèvement notée ep_i [Hascoet et al., 2011]. La valeur de ep_i est définie à partir des caractéristiques du procédé de parachèvement et de la tolérance réalisable par le procédé additif. Ainsi,

$$ep_i = \delta l(\vec{T}_j)/2 + s_{mini} \quad (3.2)$$

Avec $\delta l(\vec{T}_j)$ la tolérance donnée comme réalisable par le procédé additif choisi, dans la direction \vec{T}_j et s_{mini} la surépaisseur minimale nécessaire au procédé de parachèvement.

Il est important de noter que ep_i n'est qu'une épaisseur minimale. En effet, $\delta l(\vec{T}_j)$ n'est qu'une valeur indicative quant à la capacité du procédé (valeur fournie par le constructeur). En réalité, nous avons vu que cet intervalle dépend de la géométrie de la pièce et que seule la simulation du processus de fabrication complet permet d'estimer réellement sa géométrie finale. La définition de ep_i permet de proposer par la suite des trajectoires permettant d'assurer, à la pièce fabriquée, d'être compatible avec son cahier des charges initial.

Dans un second temps, une épaisseur minimum matière em_i , cette fois-ci, coté matière est définie. Cette épaisseur permet de s'assurer que l'entièreté de l'entité fonctionnelle E_i sera présente dans la géométrie finale de la pièce, même après parachèvement. Elle permet, également, de prendre en compte, si nécessaire, des contraintes d'épaisseurs minimales liées à la tenue mécanique des pièces pendant cette phase. La détermination de em_i se fait à partir de l'équation :

$$em_i \geq \delta l(\vec{T}_j)/2 + e_{mini} \quad (3.3)$$

Avec e_{mini} l'épaisseur minimale strictement positive. Sa détermination se fait grâce à l'équation :

$$ep_i + em_i = k.l_{mini}(\vec{T}_j) \quad (3.4)$$

Où k est un nombre entier strictement positif et $l_{mini}(\vec{T}_j)$ la dimension minimale fabricable par le procédé suivant l'orientation \vec{T}_j associée au groupe d'entité G_j . En effet, nous avons vu dans le chapitre précédent que les dimensions des pièces fabriquées par ajout de matière étaient fonction de la dimension minimale réalisable par le procédé, cette dimension étant dépendante de l'orientation de fabrication choisie.

La figure 3.11 présente les volumes obligatoires correspondant à notre exemple. Les grandeurs em_i et ep_i y sont en particulier présentées.

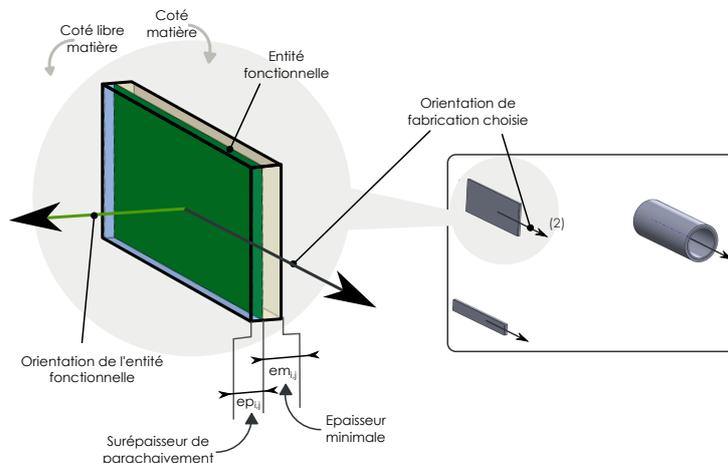


FIGURE 3.11 – Illustration de la définition des volumes obligatoires.

La définition des volumes accessibles

Pour chaque groupe G_j , suite à la définition des volumes obligatoires, un volume accessible Va_j est défini. Il correspond au volume englobant l'ensemble des volumes obligatoires du groupe en excluant les zones non accessibles par le procédé suivant l'orientation de fabrication choisie pour le groupe. Le domaine procédé est alors défini comme étant la somme des volumes obligatoires et des volumes accessibles de chaque groupe étudié. De cette manière, il est garanti :

- De pouvoir ajouter de la matière dans l'espace défini par $\mathcal{D}_{procédé}$ en utilisant les orientations de fabrication précédemment choisies.
- D'obtenir, après parachèvement, les entités fonctionnelles souhaitées et les spécifications associées.

La figure 3.12 illustre la définition du domaine procédé pour l'exemple étudié.

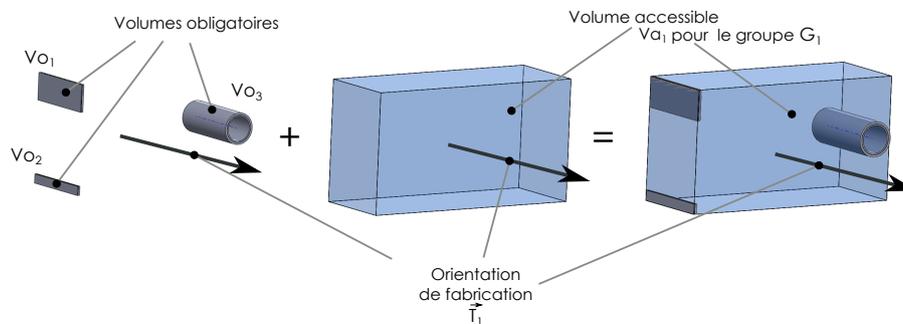


FIGURE 3.12 – Définition de Va_1 dans le cas de notre exemple.

Le domaine de conception peut ainsi être déterminé. Étant l'intersection du domaine fonctionnel et du domaine procédé, il n'intègre, en particulier, qu'une partie des volumes obligatoires de ce dernier : la partie correspondant aux épaisseurs minimum matière em_i . Cet aspect est illustré dans le cas de notre pièce exemple à la figure 3.13 .

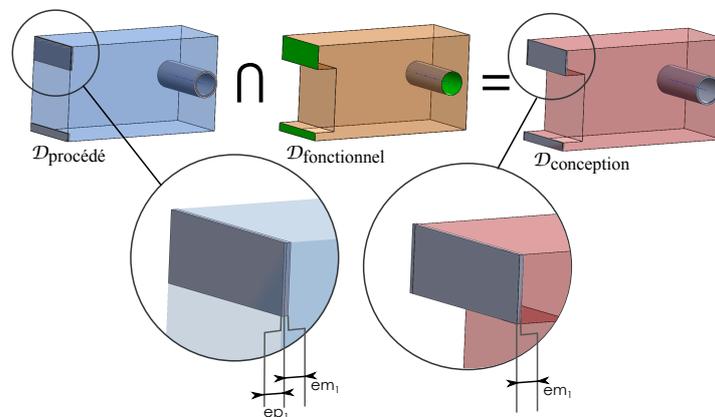


FIGURE 3.13 – Détermination du domaine de conception pour la pièce test avec \vec{T}_1 l'orientation de fabrication choisie.

Les volumes correspondants aux épaisseurs de parachèvement ep_i , notés Vp_i ne seront, en effet, pas présents dans la géométrie finale (après parachèvement) du produit, ils ne doivent donc pas être pris en compte pour le dimensionnement de ce dernier. Nécessaires pour la définition des stratégies de trajectoires, ils seront cependant pris en compte lors de la troisième étape de la méthodologie.

2.2 Définition de la géométrie théorique

2.2.1 Le principe

Nous appelons géométrie théorique de la pièce, la géométrie, incluse dans le domaine de conception précédemment établi, qui répond le mieux aux objectifs et contraintes globaux du problème de conception. Ces derniers peuvent aussi bien provenir du cahier des charges fonctionnel que des règles métiers liées au procédé additif utilisé.

Pour déterminer la géométrie théorique, notée Vt , nous avons vu au chapitre 2 que l'optimisation de type topologique continue est la plus adaptée, car elle permet d'optimiser les pièces, en termes de géométrie et/ou de répartition de matériaux, sans nécessiter d'idée préconçue les concernant. Nous allons donc, par la suite, employer ce type d'optimisation pour répondre à la première problématique qui est de s'assurer d'exploiter les opportunités de la fabrication additive.

La résolution d'un problème d'optimisation topologique passe par la discrétisation de la pièce à optimiser sous forme d'éléments finis. Une densité topologique variant entre 0 (pas de matière) et 1 (présence de matière) est attribuée à chacun des éléments. Cette densité est ensuite optimisée au regard des objectifs du problème.

Vt correspond au volume théorique de la pièce après une éventuelle opération de parachèvement. La géométrie de la pièce avant parachèvement, noté Vt_{brut} , peut alors être déterminée grâce l'équation suivante :

$$Vt_{brut} = Vt \bigcup_{i=1}^N Vp_i \quad (3.5)$$

La définition de Vt permet de déterminer une topologie générale de la pièce finale non nécessairement intuitive pour le concepteur. La difficulté est alors de correctement traduire le cahier des charges fonctionnel et les règles procédé en fonctions objectifs et contraintes.

La nature théorique de Vt et donc de Vt_{brut} provient du fait que l'optimisation, bien que contrainte par les choix d'orientation de fabrication au travers du domaine de conception, est globale. C'est-à-dire que les fonctions objectifs et contraintes portent exclusivement sur les caractéristiques générales de la pièce et non sur sa géométrie précise. Or nous avons vu, dans le chapitre précédent, que pour s'assurer de minimiser les écarts de fabrication il est aussi nécessaire de prendre en compte des critères locaux liés aux trajectoires de fabrication utilisées.

Ainsi, Vt_{brut} servira de "guide" pour effectuer un choix de trajectoires qui permettra d'estimer la géométrie réaliste correspondante de la pièce.

2.2.2 Illustration

Dans le cadre de nos travaux, l'étape d'optimisation topologique est, en pratique, réalisée avec le logiciel *Inspired*¹ de la société *Altair*, qui permet une utilisation simplifiée du logiciel d'optimisation *OptiStruct* du même éditeur. Ce logiciel est basé sur la méthode d'optimisation usuellement nommée SIMP pour "Solid Isotropic Material with Penalization" dont l'idée originale a été proposée par Bendsoe [Bendsoe, 1989].

L'utilisation de cet outil ne permettant pas actuellement une optimisation multi-objectifs, celle-ci est effectuée de manière itérative manuellement. L'optimisation topologique est alors effectuée avec une seule fonction objectif, les autres étant traduites en fonctions contraintes. À chaque itération, les contraintes sont modifiées pour, à la fin, déterminer la meilleure solution au regard de l'ensemble des objectifs.

Dans le cas de notre exemple, l'objectif fonctionnel est de minimiser la déformation de la pièce et l'objectif lié au procédé est de minimiser sa masse pour en minimiser le coût de fabrication. Le premier est alors utilisé comme fonction objectif pour l'optimisation topologique et le second comme contrainte. Pour cela, un paramètre a est choisi, représentant le rapport de la masse de la pièce optimisée par rapport au domaine de conception. a est initialement choisi égale à 5%, une première optimisation topologique est alors effectuée, la tenue mécanique de la géométrie obtenue est vérifiée grâce au module éléments finis de Solidworks², si celle-ci n'est pas respectée, a est augmenté et une nouvelle optimisation topologique est effectuée et ainsi de suite jusqu'à ce que ce soit le cas (Fig. 3.14). Vt est alors sélectionné et Vt_{brut} calculé.

Pour effectuer l'optimisation, la compliance de chaque élément de discrétisation du domaine de conception est calculée en fonction de sa densité grâce à l'équation suivante :

$$c(\rho_i) = U^T K U = \sum_{i=1}^N u^T k_i u \quad (3.6)$$

Avec :

$$\begin{aligned} k_i &= \rho_i^P \cdot E \\ p &\geq 1 \\ 0 > \rho_i &\geq 1 \end{aligned}$$

Où U est le déplacement global, K la matrice de raideur globale, u le déplacement élémentaire, k_i la matrice de raideur élémentaire. ρ_i est la densité du $i^{\text{ème}}$ élément, E le module d'Young du matériau, N le nombre d'éléments et P le coefficient de pénalisation permettant favoriser les densités proches de 0 ou de 1.

À chaque pas de l'optimisation, le volume de la pièce est calculé grâce à l'équation :

$$V = \sum_{i=1}^N \rho_i \cdot v \quad (3.7)$$

Où v est le volume d'un élément.

1. <http://www.solidthinking.com/InspiredFeaturesStart.aspx> (25/06/2013)

2. <http://www.solidworks.fr/> (25/06/2013)

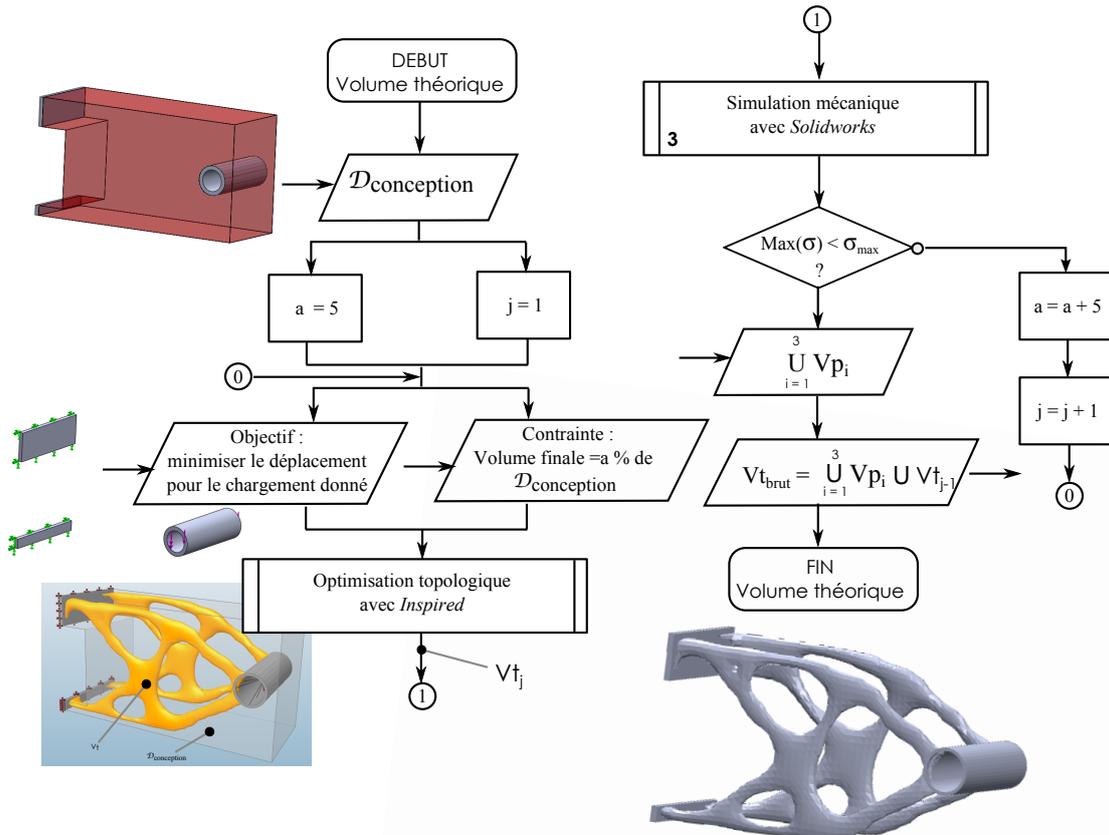


FIGURE 3.14 – Obtention de la géométrie théorique de la pièce dans le cas de la pièce exemple.

2.3 Détermination de la géométrie réaliste

2.3.1 Le principe

L'objectif de cette étape est de définir une géométrie de pièce, réaliste vis-à-vis du procédé de fabrication, qui soit la plus proche possible de la géométrie théorique Vt_{brut} déterminée précédemment. Celle-ci est en effet la géométrie cible à atteindre pour répondre au mieux aux objectifs globaux du problème. La méthode générale pour la détermination de la géométrie réaliste (notée Vr_{brut}) est présentée figure 3.15.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, pour s'assurer de prédire la géométrie d'une pièce, la prise en compte de règles métiers n'est pas suffisante. Il est en effet nécessaire de simuler le processus de fabrication pour prendre en compte les phénomènes physiques mis en jeu et ainsi prédire le comportement réel de la pièce au cours de sa fabrication. Cette étape est un point clé de notre méthodologie, cependant l'établissement de modèles réalistes des procédés additifs est complexe. La relative jeunesse de ces procédés ainsi que la complexité des phénomènes physiques qu'ils mettent en jeu en sont les principales raisons. Parce que chaque procédé nécessite un modèle spécifique, l'établissement d'un tel modèle n'est pas l'objet de ce paragraphe, nous nous contenterons ici de présenter le cadre d'utilisation de la simulation dans notre méthodologie. La modélisation

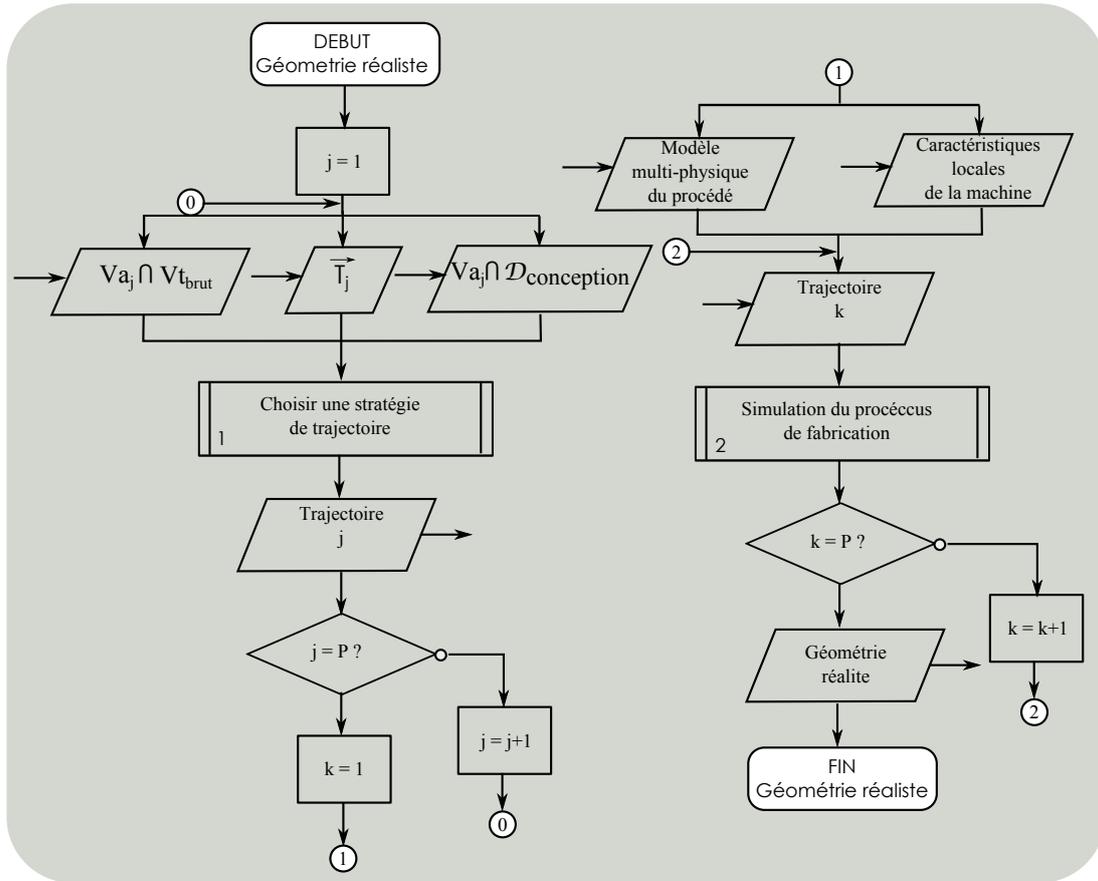


FIGURE 3.15 – Algorithme de détermination de la géométrie réaliste.

et la simulation du procédé de fabrication par projection de poudres seront spécifiquement étudiées dans le chapitre 4.

Dans le cadre de la méthodologie, la détermination d’une géométrie réaliste d’une pièce se fait à partir de l’ensemble de sa gamme de fabrication. À ce stade, il est donc nécessaire de choisir une trajectoire de fabrication. Ce choix se fait à partir de Vt_{brut} et des choix antérieurs (étape 1) d’orientations de fabrication et en fonction des règles de choix de trajectoires associées au procédé utilisé. Ainsi, pour groupe G_j , un choix de stratégie de trajectoire est effectué à partir de la géométrie théorique incluse dans le volume accessible associé ($Vt_{brut} \cap Va_j$), du domaine de conception $\mathcal{D}_{conception}$ et de l’orientation de fabrication \vec{T}_j .

Une fois que la trajectoire de fabrication a été définie pour l’ensemble des groupes, le processus de fabrication doit être simulé pour définir la géométrie réaliste Vr_{brut} . Les paramètres de fabrication spécifiques à la machine de production sont alors nécessaires. Le degré de réalisme de la géométrie obtenue est fortement dépendant du degré de précision du modèle utilisé. Un modèle multi-physique complexe permet de prendre en compte une majorité de phénomènes, mais le temps de simulation peut alors exploser. À l’inverse un modèle simple permet une simulation rapide, mais donne des résultats approximatifs.

La géométrie réaliste Vr_{brut} correspond à la géométrie avant parachèvement. La géométrie réaliste après parachèvement peut être déterminée par l'équation :

$$Vr = Vr_{brut} - \sum_{i=1}^N Vp_i \quad (3.8)$$

Vr est la géométrie finale de la pièce correspondant à un choix de stratégie de fabrication donné. Sa compatibilité avec les contraintes fonctionnelles ainsi que sa performance vis-à-vis des objectifs du problème initial peuvent par la suite être déterminées.

2.3.2 Illustration

Les différentes étapes de détermination d'une géométrie réaliste dans le cas de notre exemple sont présentées figure 3.16.

Le choix d'une stratégie de type balayage avec offset (un dépôt qui suit les contours de la pièce) a ici été fait. L'angle du balayage a été ici choisi égal à 45 degrés. Ce type de trajectoire est classiquement utilisé dans le cas des procédés par dépôt de fil. Ce procédé nécessitant l'utilisation de support, ce dernier est déterminé pour réaliser la pièce.

En ce qui concerne la simulation, le modèle choisi est basique, il consiste à faire parcourir, par une sphère, dont le diamètre correspond à celui du fil utilisé avec la machine Mojo, la trajectoire choisie. Cette simulation est purement géométrique et ne prend pas en compte les phénomènes physiques tels que les phénomènes thermomécaniques. Cependant, la géométrie obtenue numériquement, à l'aide du logiciel Matlab, permet d'avoir une idée de la géométrie réelle. Le bon remplissage du volume de la pièce peut, en particulier être vérifié.

2.4 Sélection et classement des solutions viables

La géométrie Vr obtenue correspond à une combinaison de choix d'orientations de fabrication (effectué à l'étape 1) et de choix de trajectoires de fabrication (effectué à l'étape 3). Il est donc possible, avec des combinaisons de stratégies différentes, de déterminer plusieurs géométries pour un même problème initial. L'objectif de la dernière étape de la méthodologie est de classer ces différentes possibilités géométriques au regard :

- Des contraintes fonctionnelles issues du cahier des charges. Celles-ci sont soit respectées, soit non respectées. Dans ce dernier cas, la solution est écartée.
- Des objectifs globaux issus du cahier des charges fonctionnel et des règles procédé. Pour chaque objectif, un indice de performance est déterminé permettant de classer les différentes solutions envisagées.

Ainsi, des indices de performance, liés à fabricabilité et à la fonctionnalité de la pièce conçue, sont définis. Ces indices permettent au concepteur de classer les différentes géométries possibles et l'aident donc finalement à en sélectionner une.

Dans notre exemple, les indices de performance sont, pour la fonctionnalité, le déplacement maximal de la pièce sous chargement et pour la fabricabilité, sa masse. Le temps, ainsi que la quantité de support nécessaire à la fabrication, peuvent également être analysés pour aider le concepteur à faire un choix final.

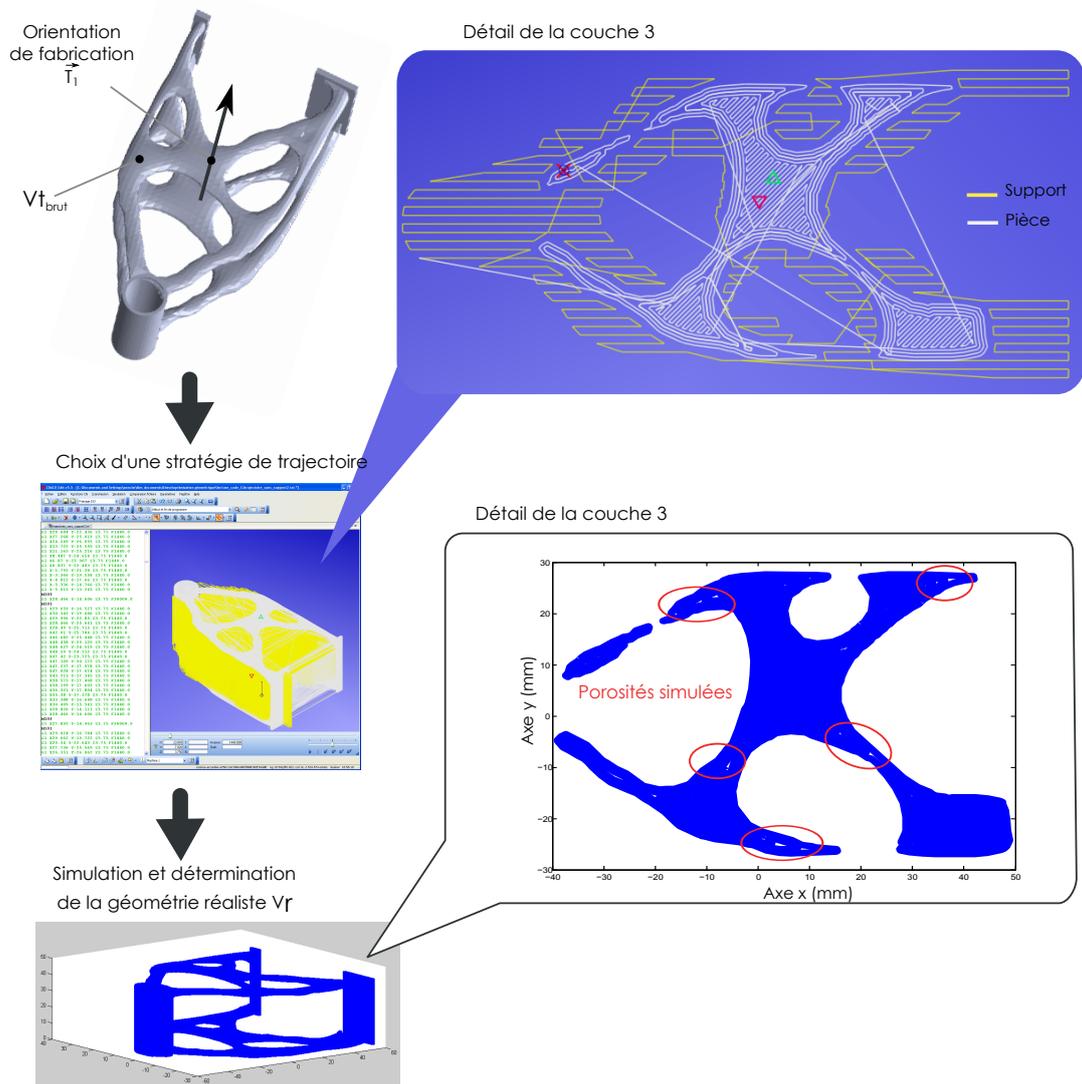


FIGURE 3.16 – Détermination d’une géométrie réaliste dans le cas de la pièce exemple.

3 Synthèse

Ce chapitre présente la structure générale de la méthodologie. Elle permet de prendre en compte l'ensemble des caractéristiques et règles liées au procédé de fabrication choisi, qu'elles soient locales ou globales. De cette manière il est possible de répondre au double objectif défini au chapitre 1 de ce manuscrit :

1. Aider le concepteur à tirer profit des opportunités offertes par la fabrication additive.
2. Permettre au concepteur d'intégrer au plus tôt, dans sa démarche de conception, les spécificités de la fabrication additive pour s'assurer que le produit fabriqué puisse répondre aux exigences fonctionnelles de son cahier des charges.

Le premier point est traité par l'utilisation d'**outil d'optimisation topologique**. Nous avons vu grâce à l'état de l'art que ce type d'optimisation permettait de déterminer une morphologie de pièce optimale vis-à-vis d'objectifs et contraintes globaux sans idées initiales de la forme à obtenir. Notre méthodologie propose donc d'intégrer ce type d'outil, **pour prendre en compte les contraintes et objectifs globaux** des problèmes de conception et en déduire une géométrie théorique du produit sans a priori.

Cependant, l'ensemble des données contenues dans le cahier des charges fonctionnel d'un produit comme celles concernant le procédé de fabrication choisi ne peuvent pas être traduites en fonctions objectifs ou contraintes globales. Nous avons donc "encadré" l'étape d'optimisation topologique pour répondre au deuxième objectif que nous nous sommes fixé. L'optimisation topologique n'est donc que **la deuxième étape** de notre méthodologie.

L'optimisation topologique nécessite la définition d'**un domaine de conception**. Il n'existe pas, dans la littérature, de règles ou méthodes permettant de définir ce dernier vis-à-vis d'un procédé. Or nous avons vu dans le chapitre 2 que pour le cas de la fabrication additive, les choix d'orientations de fabrication avaient un impact fort à la fois sur les caractéristiques locales des pièces produites et sur les zones accessibles ou nécessitant du support. Ainsi, **la première étape** de notre méthodologie permet de déterminer un domaine de conception à partir d'un choix d'orientations de fabrication, permettant **de garantir le respect des spécifications fonctionnelles locales**.

La troisième étape de méthodologie permet de passer d'une géométrie théorique, bien que contrainte par un choix d'orientations de fabrication et des fonctions globales, à une **géométrie réaliste** vis-à-vis de la machine de production choisie. Le peu de recul qu'a la communauté vis-à-vis des phénomènes physiques mis en jeu en fabrication additive implique qu'à l'heure actuelle, il n'est pas possible de prédire la géométrie finale d'une pièce sans en simuler la fabrication. Ainsi nous proposons à partir de la géométrie théorique issue de l'optimisation topologique de **déterminer une stratégie de trajectoire**, puis, à partir d'un modèle du procédé et des paramètres de fabrication, de **simuler la géométrie réelle du produit**.

La géométrie obtenue grâce aux trois premières étapes de notre méthodologie est issue de choix successifs de stratégies de fabrication. Pour un même problème initial, plusieurs stratégies peuvent être possibles, impliquant des géométries potentiellement différentes. **La quatrième et dernière étape** de méthodologie consiste donc à **classer les différentes géométries possibles** et les stratégies correspondantes au regard des objectifs et contraintes du problème. De cette manière, la géométrie finalement proposée est non seulement réaliste, mais également, optimisée vis à vis du problème globale.

Notre méthodologie permet donc la prise en compte en parallèle **des contraintes et objectifs globaux et locaux** issus à la fois **du cahier des charges fonctionnel** étudié et **du moyen de fabrication** choisi. Cependant, pour un procédé donné, le réalisme des pièces conçues vis-à-vis du procédé dépend fortement des connaissances apportées à la méthodologie. En plus de la structure de la méthodologie, il est donc primordial de développer et proposer des règles métiers et des modèles multi-physiques liés aux procédés utilisés.

Nous avons vu dans le chapitre 2 que la sélection et l'optimisation de l'orientation de fabrication, pour une géométrie initialement fixée, a fait l'objet de plusieurs travaux. Bien que ne permettant pas directement de définir le domaine de conception, ces travaux peuvent être adaptés pour être utilisés dans la première étape de notre méthodologie. De même, plusieurs travaux portant sur le développement d'outils d'optimisation topologique peuvent être mis à profit dans la seconde étape de notre méthodologie. À notre connaissance, très peu de travaux portent, par contre, sur l'impact des stratégies de fabrication sur la géométrie réelles des pièces en simulant le processus de fabrication. Nous avons donc décidé d'orienter nos travaux sur cette dernière partie qui fera l'objet du chapitre quatre de ce manuscrit. Les phénomènes physiques mis en jeu au cours du processus de fabrication étant différents pour chaque procédé il est nécessaire d'établir pour chacun des règles et un modèle multi-physique également différents. Dans le chapitre 4, nous nous sommes particulièrement intéressés au procédé de projection de poudres.

Chapitre 4

Application à la projection de poudres

Nous avons vu au chapitre précédent l'importance de l'étape trois de notre méthodologie afin de s'assurer de garantir la géométrie attendue des pièces conçues. La détermination des géométries réalistes passe nécessairement par un choix de stratégie de trajectoire et par la simulation du processus de fabrication. Ces deux aspects dépendent fortement de la technologie du procédé de fabrication utilisé, ce chapitre les détaille dans le cas de la technologie de fabrication par projection de poudres.

Dans la **première partie**, la **fabrication par projection de poudres** ainsi que **ses applications** sont présentées. Nous verrons en particulier que cette technologie est particulièrement adaptée à la fabrication de pièces à parois minces, couramment employées dans le domaine de l'aéronautique.

Dans la **deuxième partie**, le volet **simulation du procédé** est abordé. Nous verrons tout d'abord les différents verrous actuels liés à la modélisation et à la simulation multi-physique du processus de fabrication. Dans un second temps, et à la vue de ces verrous, nous proposerons un modèle adapté permettant d'estimer de manière réaliste la géométrie fabriquée, dans le cas de pièces à parois minces. Ce modèle sera validé expérimentalement.

Le volet portant sur le **choix de trajectoires de fabrication** sera abordé dans la **troisième partie**. Nous y proposerons une méthodologie d'aide au choix de stratégie de trajectoire dans le cas de pièces à parois minces permettant de générer des trajectoires de fabrication, à partir de règles métier liées au procédé, qui soient guidées et non bornées par la géométrie théorique des pièces.

La **quatrième et dernière partie** de ce chapitre permettra de **synthétiser** les apports de nos travaux quant à la détermination réaliste de pièces fabriquées par projection de poudres.

1 Le procédé de fabrication par projection de poudres

Parmi les procédés additifs, la technologie de projection poudres est l'une des plus récentes. Depuis une dizaine d'années, elle fait l'objet d'un nombre croissant de brevets et de publications scientifiques (Fig. 4.1). Initialement utilisé pour le rechargement de pièces existantes, à réparer ou à modifier [Ren et al., 2006], ce procédé est aujourd'hui principalement employé pour la fabrication directe de pièces métalliques. Les améliorations récentes de la technologie permettent également, aujourd'hui, l'obtention de pièces céramiques et multi-matériaux [Muller et al., 2013a].

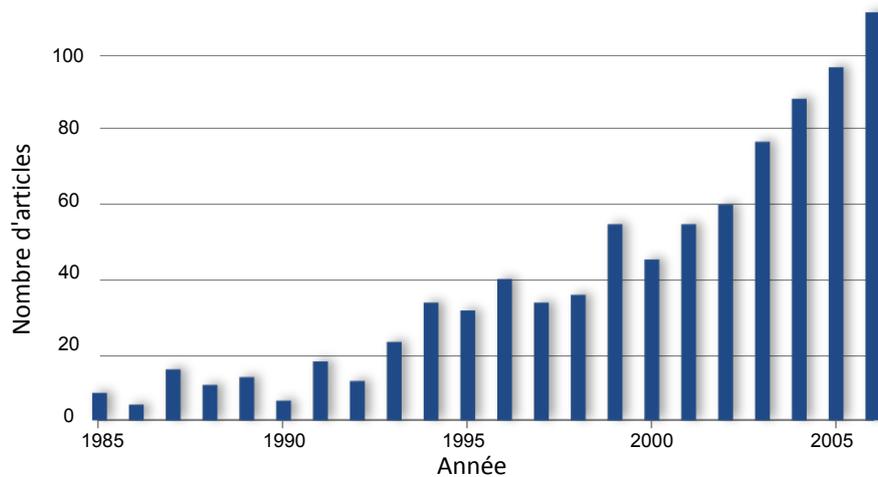


FIGURE 4.1 – Nombre de publications portant sur la fabrication par projection de poudres entre 1985 et 2006 [Dubourg and Archambeault, 2008].

Ce procédé consiste à projeter, sur un substrat, de la poudre dans un bain de fusion local obtenu grâce à un laser de puissance. La poudre est alors fondue et s'agglomère au substrat. Elle est projetée à l'aide d'une buse fixe par rapport au laser, l'ensemble est appelé tête de projection. Avec ce principe, les pièces sont fabriquées au fur et à mesure avec le déplacement de la tête de projection (Fig 4.2). Il existe trois types de projection [Weisheit et al., 2001] :

- La projection radiale : une seule buse projette la poudre latéralement sur le rayon laser.
- La projection coaxiale continue : la projection est conique et centrée sur le faisceau laser.
- La projection coaxiale discontinue : trois ou quatre buses projettent la poudre coaxialement autour du faisceau laser.

Le principal type utilisé est la projection coaxiale. Qu'elle soit continue ou non, elle permet, associée à une structure multi-axes, de fabriquer les pièces en faisant varier, au cours de la fabrication, l'orientation de fabrication. Cette particularité permet, comme nous l'avons vu au chapitre 2, de minimiser, voir de supprimer, le support nécessaire à la réalisation des pièces, même en cas de formes complexes. Elle permet également de partir d'un substrat non nécessairement plan, rendant possible l'ajout d'un volume de matière à une pièce déjà existante pour augmenter, par exemple, sa fonctionnalité.

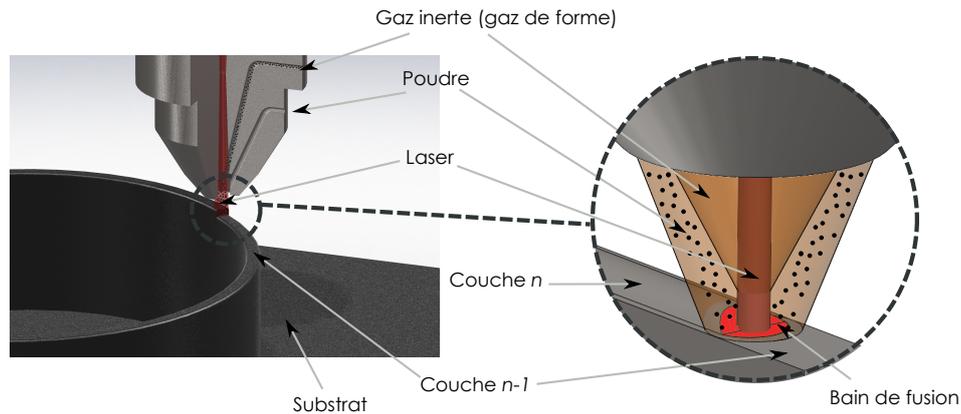


FIGURE 4.2 – Principe du procédé de fabrication par projection de poudres, dans le cas d’une projection coaxiale continue.

Cette technologie a par ailleurs un fort potentiel pour la fabrication directe dans les domaines de l’aviation et de l’aérospatial qui font partie, comme nous l’avons vu figure 1.6(b), des principaux domaines employant la fabrication directe. Dans ces domaines, la possibilité de fabriquer des pièces à parois minces semble être l’un des atouts majeurs de la projection de poudres. En effet ce type de structure est couramment employé dans ces domaines, où les pièces sont allégées au maximum. Composées essentiellement de parois fines, ces pièces se caractérisent par une structure nervurée permettant d’assurer leur tenue mécanique.

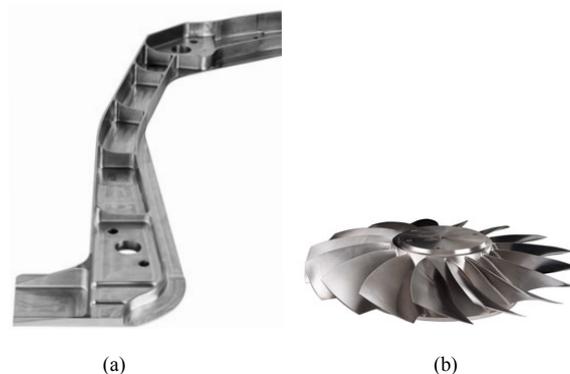


FIGURE 4.3 – Exemple de pièces allégées à parois minces : (a) pièce aéronautique¹ de structure en titane (b) rotor de turbine

Généralement obtenues par usinage, en partant d’un brut massif, ces pièces sont coûteuses en temps et en matière à fabriquer. De plus, elles peuvent être complexes à usiner du fait de la contrainte d’accessibilité outil limitant le ratio largeur/profondeur des poches [Kerbrat et al., 2011] et des problèmes de vibration au cours de l’usinage [Caperaa, 2005]. L’utilisation de la technologie de fabrication par projection de poudres permet, à

1. <http://aciers.free.fr/index.php/2012/03/12/kobe-steel-expanding-titanium-capacity-for-aerospace-sector-us/> (25/06/2013)

contrario, de n'utiliser quasiment que la matière constituant la pièce finale et de s'affranchir de la majorité des limites géométriques dues à l'accessibilité outil en usinage.

La fabrication par projection de poudres, de par sa relative jeunesse et son fort potentiel en termes d'application industrielle, semble être particulièrement adaptée pour être appliquée à notre méthodologie. Ce chapitre est donc consacré à l'implémentation de l'étape trois de notre méthodologie dans le cas particulier de l'utilisation du procédé de fabrication par projection de poudres pour la réalisation de pièces à parois minces. Cette étape de la méthodologie (Fig. 3.1), nécessite la mise en place d'un modèle multi-physique du procédé ainsi qu'une méthode de choix de stratégie de trajectoire. Chacun de ces deux points sera détaillé dans la suite de ce chapitre.

Les expérimentations présentées dans ce chapitre ont été réalisées avec la machine de projection de poudres CLAD de l'entreprise IREPA LASER², dont est équipée l'IRCCyN. Cette machine comporte deux têtes de projection de type coaxial continu, associées à une cinématique 5 axes. Nous n'utiliserons dans le cadre de nos travaux de thèse qu'une seule des deux têtes de projection, ses caractéristiques seront détaillées au paragraphe 2.2.

2. <http://www.beam-machines.com/> (25/06/2013)

2 Modélisation multi-physique du procédé

Après un état de l'art des outils et modèles existants pour simuler le procédé de fabrication par projection de poudres, nous proposerons un modèle utilisable dans le cadre de notre méthodologie que nous appliquerons à la machine CLAD.

Notre problématique est d'établir un modèle multi-physique du procédé permettant de prédire de manière réaliste la géométrie des pièces (Fig. 4.4) et ainsi d'optimiser les stratégies de fabrications vis-à-vis des besoins fonctionnels et des contraintes procédé. Cela implique d'être capable de simuler le plus réalistement possible la fabrication de géométries complexes et ce dans un délai compatible avec le processus de conception.

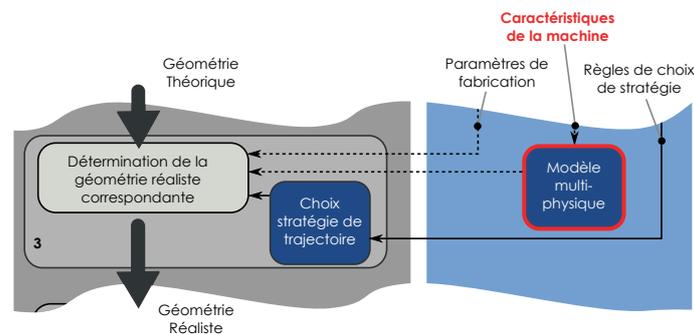


FIGURE 4.4 – Extrait de la méthodologie proposée.

La notion de géométrie complexe est très relative, nous entendons par là des géométries correspondant à des pièces fonctionnelles, ce qui implique en termes de fabrication :

- Des trajectoires multi-couches
- Des trajectoires autres que simplement linéaires, comportant entre autres des courbures et des angles géométriques.

2.1 État de l'art

2.1.1 Modélisation empirique

Dans le cas de la fabrication par projection de poudres, un grand nombre de paramètres gouvernent la qualité des pièces fabriquées. Or la compréhension de la relation entre ces paramètres et leurs effets sur le processus de fabrication est cruciale pour maîtriser la qualité géométrique et physique des pièces produites. Parce que l'utilisation industrielle de ce procédé en dépend, plusieurs travaux ont, ces dernières années, porté sur cette relation.

Il existe plusieurs études de sensibilité des différents paramètres de fabrication sur les caractéristiques locales du dépôt [Zhang et al., 2007] ou sur la microstructure des pièces produites [Choi and Chang, 2005]. Dans ces travaux, les quatre principaux paramètres étudiés sont (Fig. 4.5) :

- La puissance laser, qui caractérise la quantité d'énergie apportée à la pièce à chaque instant.
- Le débit de poudre en sortie de la buse, qui caractérise la quantité de matière projetée sur la pièce à chaque instant.
- La distance entre la tête de projection et le substrat, qui définit la répartition de l'énergie et du flux de poudre apportés à la pièce à chaque instant.
- La vitesse relative entre la tête de projection et le substrat.

Ces études permettent d'identifier les paramètres les plus influents et leurs plages d'utilisation pour garantir les caractéristiques attendues des pièces fabriquées [Lu et al., 2010]. Des modèles empiriques sont ensuite proposés pour prédire la géométrie du dépôt en fonction des paramètres utilisés [El Cheikh et al., 2012]. Bien qu'apportant de la connaissance sur le procédé, les modèles obtenus se limitent à une géométrie de base généralement monocouche. De plus ils dépendent très fortement des conditions expérimentales dans lesquelles ils ont été menés, il est alors difficile de les généraliser pour estimer la géométrie réaliste d'une pièce complète. Ainsi dans le cadre de notre méthodologie nous préférons avoir recours à une modélisation numérique du processus de fabrication.

Notons qu'à partir de ces études, des propositions d'asservissement des principaux paramètres influents ont été proposées pour contrôler la géométrie locale du dépôt [Bi et al., 2007, Tang and Landers, 2011]. Les travaux montrent une amélioration de la qualité des pièces obtenues, celles-ci sont cependant exclusivement limitées à des formes basiques de type "mur" qui ne reflètent pas la complexité des pièces fonctionnelles. Bien que nécessaire, l'asservissement de quelques paramètres de fabrication ne permet donc pas, à lui seul, de garantir, de manière systématique, la qualité des pièces produites.

2.1.2 Modélisation numérique

Ces dix dernières années, beaucoup de travaux ont été publiés sur la modélisation directe des phénomènes physiques mis en jeu au cours du processus de fabrication. Ces phénomènes sont couplés et interagissent entre eux. Dans le cas de la projection de poudres, la géométrie finale des pièces dépend essentiellement de deux facteurs (Fig. 4.5) :

- La géométrie locale du dépôt réalisé à chaque instant de la fabrication.
- Les déformations et les contraintes internes apparaissant au cours de la fabrication.

La géométrie locale du dépôt est directement liée à la dimension du bain de fusion créé par le laser sur le substrat, elle est aussi fortement dépendante du flux de poudre tant en termes de débit que de répartition.

Les contraintes internes et donc les déformations sont quant à elles dictées par le gradient de température associé aux propriétés thermiques et mécaniques des matériaux en présence.

La détermination des champs thermiques dans la pièce au cours du temps est donc une condition sine qua non pour espérer prédire la géométrie réaliste d'une pièce. Beaucoup d'auteurs ont travaillé sur ce point, il s'agit de résoudre l'équation de conduction de la chaleur :

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (4.1)$$

Où ρ est une constante représentant la masse volumique du substrat, $C_p = C_p(T)$ est la chaleur massique du substrat, $T = T(x, y, z, t)$ est la température mesurée à l'instant t au point de coordonnées cartésiennes (x, y, z) dans le repère lié au substrat, k est la conductivité du substrat et enfin $Q = Q(x, y, z, t)$ est la puissance volumique au point étudié à l'instant t .

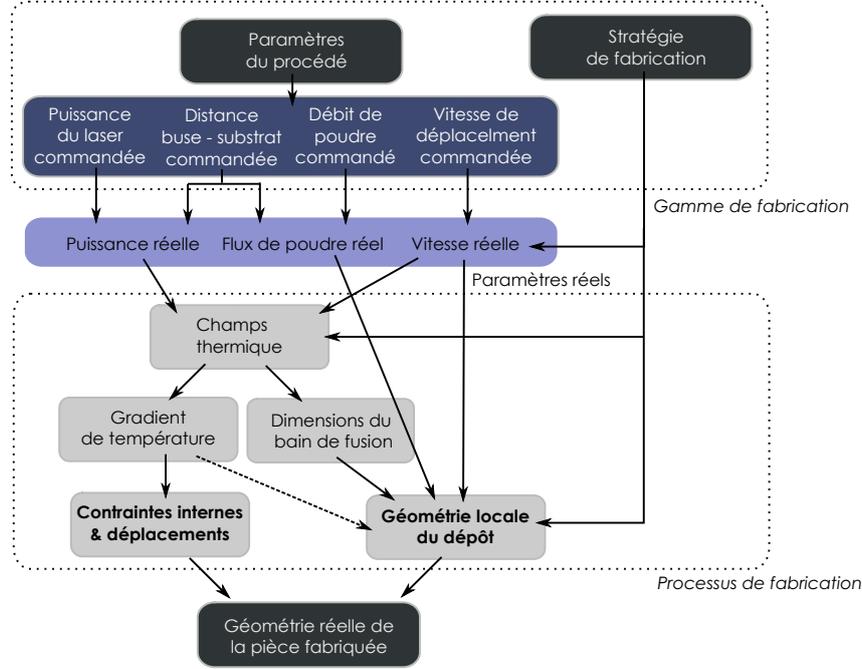


FIGURE 4.5 – Schématisation des phénomènes définissant la géométrie finale des pièces fabriquées par projection de poudres.

La résolution de cette équation doit se faire sous les conditions limites et initiales correspondantes au processus de fabrication. Ainsi la condition initiale est :

$$T(x, y, z, 0) = T_0 \quad (4.2)$$

Où T_0 est la température ambiante dans l'enceinte de la machine (on suppose celle-ci constante au cours de la fabrication). Les conditions limites sont :

$$k\nabla T \cdot n = \begin{cases} I - \varepsilon_R \sigma_R (T^4 - T_0^4) - h(T - T_0), & \text{sur } S_{laser}(t) \\ -\varepsilon_R \sigma_R (T^4 - T_0^4) - h(T - T_0), & \text{sur } S_{deposit}(t) \\ -h(T - T_0) & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.3)$$

Où (x, y, z) représente les coordonnées des points appartenant aux surfaces extérieures de la pièce et du substrat. n est le vecteur normal de ces surfaces, ε_R l'émissivité, h le coefficient d'échange par convection, σ_R la constante de Boltzman ($5.6710^8 W \cdot m^{-2} \cdot W^{-4}$), S_{laser} la surface irradiée par le laser à l'instant t , $S_{deposit}$ l'ensemble des surfaces irradiées par le laser avant l'instant t et $I = I(x, y, z, t)$ l'intensité laser absorbée au temps t en un point de $S_{laser}(t)$ de coordonnées (x, y, z) dans le repère lié au substrat.

Deux techniques sont régulièrement employées pour résoudre ce système d'équations [Steen and Mazumder, 2010] :

- La modélisation analytique, qui est utilisée dans le cas d'une étude stationnaire avec substrat semi-infini.
- La modélisation par éléments finis, qui est utilisée pour les études plus fines et plus complètes des phénomènes mis en jeu.

Modélisation analytique

Dès 1946, *D. Rosenthal* applique cette modélisation pour prédire la forme de la zone fondue dans le cas d'un traitement de surface [Rosenthal, 1946]. Le principe est de considérer l'apport d'énergie comme un point ou un ensemble de points sources qui se déplacent sur la surface extérieure d'un substrat. La solution de l'équation 4.1 peut alors être déterminée à l'aide des fonctions de Green. Ce type de modélisation permet d'avoir rapidement une idée de la distribution de température dans une pièce au cours de sa fabrication. Cependant elle impose plusieurs hypothèses simplificatrices qui limitent le réalisme des résultats pour une géométrie complexe. Ces principales hypothèses sont :

- La source de chaleur est un point et non une répartition s'approchant de la répartition réelle de puissance.
- La pièce est considérée comme un corps semi-infini. Cette hypothèse peut être vérifiée dans le cas d'une pièce massive, elle le sera beaucoup moins dans le cas des pièces à formes fines.
- Les pertes par conduction et rayonnement sont négligées. La même remarque que précédemment peut être faite.
- Les propriétés thermo-physiques de la pièce sont considérées comme constantes.
- Seul l'état stationnaire est étudié.

Ce constat fait, il nous semble difficile d'utiliser ce type d'approche pour simuler entièrement la fabrication de pièces complexes. Nous nous tournons donc vers la méthode des éléments finis.

Modélisation par la méthode des éléments finis (EF)

Plus récemment développée, cette approche permet de prendre en compte un plus grand nombre de phénomènes. Ainsi *E. Toyserkani et al* ont développé un modèle 3D pour étudier l'effet des principaux paramètres du procédé sur les caractéristiques de la zone fondue [Toyserkani et al., 2004]. *C. Cho et al* complètent ces travaux en ajoutant l'effet de la chaleur latente dans le cadre d'un domaine semi-infini [Cho et al., 2004]. Les résultats de simulation sont comparés à des mesures expérimentales et montrent une bonne corrélation dans les cas d'un dépôt unique (monocouche).

En ce qui concerne les contraintes et déformations induites par les champs thermiques, plusieurs travaux ont été publiés, *S. Ghosh et Choi*, par exemple, proposent un modèle prenant en compte les changements de phase du matériau pour déterminer les contraintes internes lors de la fabrication d'un cordon [Ghosh and Choi, 2005]. *E. Foroozmehr et Kovacevic* proposent quant à eux de prendre en compte l'apport continu de matière en activant au fur et à mesure des éléments de maillage du substrat [Foroozmehr and Kovacevic, 2010]. Ils simulent ainsi les contraintes induites par le dépôt d'une couche complète.

Dans l'ensemble de ces travaux, la déformation de la pièce est représentée par l'équation :

$$\epsilon_{i,j} = \epsilon_{i,j}^M + \epsilon_{i,j}^T + \epsilon_{i,j}^P \quad (4.4)$$

Où $\epsilon_{i,j}^M$, $\epsilon_{i,j}^P$ et $\epsilon_{i,j}^T$ sont les déformations dues respectivement à des actions mécaniques, à la plasticité du matériau et au gradient de température. La relation contrainte / déformation est dans l'ensemble des études considérée comme linéaire, ainsi :

$$\sigma_{p,q} = D_{p,q,i,j} \cdot \epsilon_{i,j} \quad (4.5)$$

Avec $\sigma_{p,q}$ les contraintes élastiques et $D_{p,q,i,j}$ le tenseur de raideur du matériau utilisé.

Les travaux portant sur la détermination des contraintes et déformations des pièces comportent, dans l'ensemble, une étude expérimentale pour valider le modèle thermique, il n'existe cependant pas d'étude comparant les déplacements induits simulés avec ceux obtenus expérimentalement. De plus les simulations portent sur des géométries de base (un cordon, un mur ou une couche).

Sur la détermination de la géométrie locale du dépôt, plusieurs approches sont proposées. D'un coté les études comme celle de *S. Morville et al*, qui proposent un modèle 2D permettant de déterminer la géométrie locale du dépôt en déformant le maillage initial du substrat en fonction des forces capillaires et thermocapillaires induites par le champ de température (effet Marangoni) [Morville et al., 2010]. Avec un autre point de vue, *E. Toyserkani et al* proposent eux aussi de modéliser le dépôt, mais cette fois-ci en 3D [Toyserkani et al., 2004]. Pour ce faire, ils déterminent à chaque pas de temps, les frontières du bain de fusion et modélisent l'apport de matière à cet instant par l'équation :

$$\delta h(x, y) = \frac{\delta t \cdot \dot{m}_p}{\rho \cdot S_{powder}} \quad (4.6)$$

Où δt est le pas de temps de la simulation, \dot{m}_p le débit massique, ρ la masse volumique de la poudre et S_{powder} la surface de projection du jet de poudres sur la pièce.

Ce modèle a été réutilisé dans plusieurs travaux qui démontrent sa validité dans les cas de dépôts monocouches (un cordon) et multicouches (un mur) [Alimardani et al., 2009, Fallah et al., 2011]. Il nous semble pour cela intéressant pour être appliqué dans le cadre de notre méthodologie. Aucune application n'a cependant encore été faite sur une géométrie "complexe", cela provient très certainement du coût très élevé, en termes de temps de calcul, de cette modélisation. Le temps de calcul nécessaire pour simuler le dépôt d'un cordon de quelques dizaines de millimètres de longueur est, en effet, compris entre quelques heures et quelques jours.

2.1.3 Synthèse de l'état de l'art

Finalement, il existe un certain nombre de travaux portant sur la simulation des principaux phénomènes mis en jeu au cours du processus de fabrication par projection de poudres. Dans notre analyse de l'état de l'art, nous nous sommes concentrés sur les phénomènes thermiques et les phénomènes induits qui sont les plus influents quant à la géométrie finale des pièces fabriquée. Des deux approches étudiées, la modélisation par éléments finis semble être la plus adaptée pour simuler la fabrication complète d'une pièce, elle permet en effet de prendre en compte beaucoup plus de phénomènes. Cette remarque faite, les

travaux existant sur la mise en place de tels modèles dans le cas de la projection de poudres souffrent de trois principaux verrous vis-à-vis de nos besoins pour notre méthodologie :

- **Verrou 1** : il n'existe pas d'étude confrontant des déplacements prévus par la simulation à des résultats expérimentaux correspondants. On ne sait donc pas si les modèles existants sont véritablement réalistes sur ce point.
- **Verrou 2** : le coût en termes de temps de calcul est très important, ainsi il est difficile d'envisager, aujourd'hui, de simuler l'ensemble de la fabrication d'une pièce en utilisant ces modèles.
- **Verrou 3** : ces modèles n'ont été appliqués que pour simuler la fabrication de géométries extrêmement simples de type cordon ou mur (de quelques cordons de hauteur au mieux), mais jamais pour celles de pièces complexes/réelles.

À partir de notre analyse de l'état de l'art, nous proposons d'établir le modèle pour la machine CLAD. Après présentation de la modélisation utilisée, nous étudierons chacun des trois verrous pour tenter d'en déduire un modèle simplifié applicable, mais néanmoins réaliste, dans le cadre de notre méthodologie. Nous validerons expérimentalement notre modèle pour la fabrication de structures fines. En effet, ce type de structure a été identifié comme particulièrement intéressant à fabriquer avec la technologie de projection de poudres.

2.2 Proposition d'un modèle complet pour la machine CLAD.

2.2.1 Modélisation thermique

L'objectif est de déterminer, à chaque instant de la fabrication, les champs thermiques dans la pièce, cela nécessite de connaître la vitesse de déplacement de la source d'énergie (le laser) le long de la trajectoire ainsi que sa puissance (en termes de valeur et de répartition). Une fois connus, les champs thermiques permettent d'estimer les contraintes internes et les déplacements de la pièce ainsi que la géométrie locale du dépôt réalisé à chaque instant de la fabrication (Fig. 4.6).

La modélisation thermique du processus de fabrication est réalisée avec le logiciel Morfeo, entre autres conçu pour la simulation éléments finis des procédés de soudage. Les calculs sont effectués avec un ordinateur sous Windows 7 avec un processeur Intel Xeon cadencé à 2.67 GHz (2 processeurs) et 12 Go de mémoire vive. Le pas de temps utilisé lors de la simulation est de $2 \cdot 10^{-3}$ s. Il est déterminé à partir de la dimension minimale du maillage ($1 \cdot 10^{-1}$ mm).

L'équation (4.1) est résolue par la méthode des éléments finis. À chaque pas de temps, le régime stationnaire est supposé atteint. L'expression de l'équation est alors :

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial(T)}{\partial t} = \nabla(k \cdot \nabla T) \quad (4.7)$$

Pour la définition des conditions limites, la convection étant libre dans de l'air, le coefficient d'échange par convection h_c est fixé à $16 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ et l'émissivité à 0,98. La température ambiante T_0 est considérée égale à 293 K.

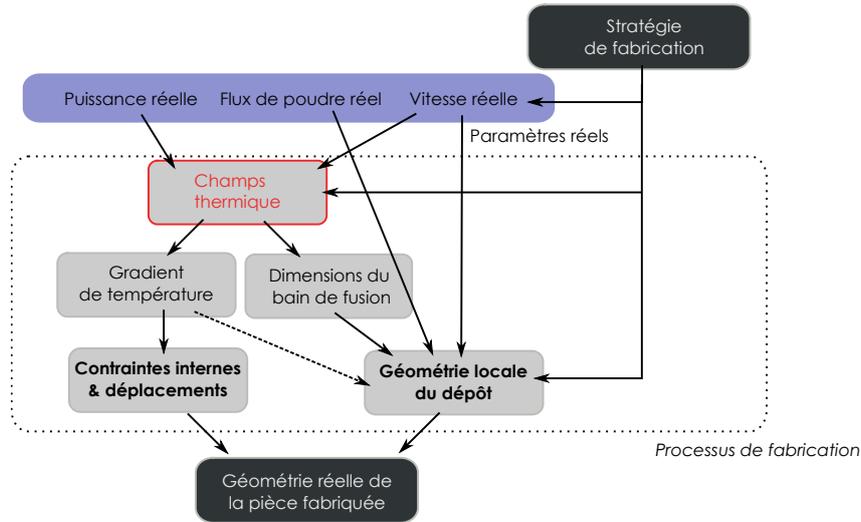


FIGURE 4.6 – Schématisation des phénomènes définissant la géométrie finale des pièces fabriquées par projection de poudres.

La source d'énergie

Dans le cas de la machine CLAD, le laser utilisé est à fibre et de type IPG YLS-4000-ST2 (Ytterbium Fiber Laser System) avec une distance focale de 300 mm et une longueur d'onde de $1070\text{-}1080\text{ nm}$. Plusieurs modules sont placés en série pour pouvoir délivrer une puissance comprise entre 0 et 4 kW . Dans nos travaux, nous utiliserons la plus petite buse de la machine, la puissance du laser est réglée entre 150 W et 300 W , son rendement énergétique est alors proche de 30% . L'analyse du faisceau laser par un appareil à sténopé permet de déterminer la répartition de la puissance du faisceau dans différents plans, les résultats sont présentés à la figure 4.7.

Dans le plan de focalisation, le diamètre du faisceau est de $0,53\text{ mm}$ et la distribution de puissance est quasiment uniforme. À une distance de 8 mm de ce plan, le diamètre du faisceau est proche de $0,6\text{ mm}$ et la distribution de puissance est de type Gaussienne. Lors des essais, la distance entre la buse et le substrat est de 5 mm , ainsi, la distance entre le substrat et le plan focal du laser est de $1,5\text{ mm}$, le diamètre du faisceau correspondant est $0,55\text{ mm}$, la répartition de puissance est, quant à elle, supposée de type Gaussienne. Finalement, la puissance apportée par le faisceau laser peut être mathématiquement décrite par :

$$I(x, y, z, t) = \frac{\beta \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot R_l^2} \exp\left(\frac{-r^2}{R_l^2}\right) \quad (4.8)$$

Avec R_l le rayon du faisceau laser, β (%) le taux d'absorption, P la puissance nominale du laser et r la distance entre un point donné appartenant au faisceau et le centre de ce dernier.

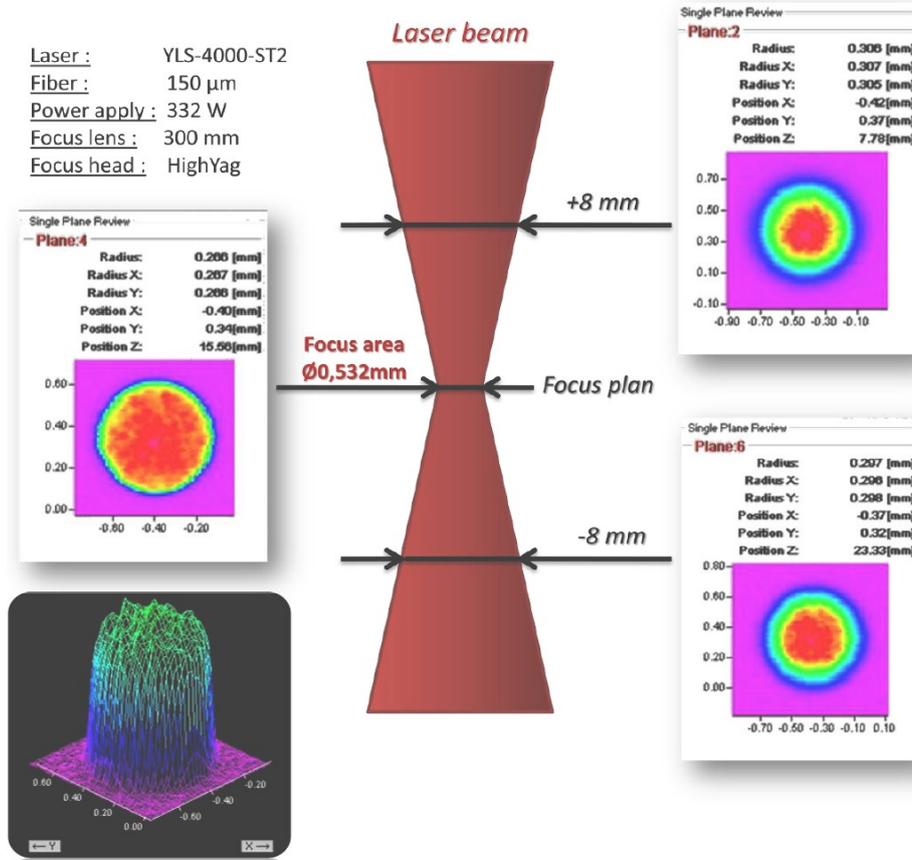


FIGURE 4.7 – Analyse du faisceau laser dans trois plans distincts.

La position de $I(x, y, z, t)$ est, à chaque instant t_i , définie par la trajectoire de fabrication. Celle-ci est discrétisée en K points $M(x, y, z, t_i)$. La distance séparant deux points M_i et M_{i-1} est donnée par l'équation :

$$dl_i = v(t_i).dt \quad (4.9)$$

Avec $v(t_i)$ la vitesse relative de la tête de projection par rapport à la pièce à l'instant t_i .

2.2.2 Modélisation mécanique

L'objectif est d'estimer les contraintes internes et les déplacements de la pièce, induits par sa fabrication (Fig. 4.8). Les contraintes mécaniques dans la pièce sont calculées à partir des équations (4.4) et (4.5). La déformation thermique est donnée par l'équation :

$$\epsilon_{i,j}^T = \alpha.(T - T_0)\delta_{i,j} \quad (4.10)$$

Avec α le coefficient d'expansion thermique et $\delta_{i,j} = 1$ si et seulement si $i = j$.

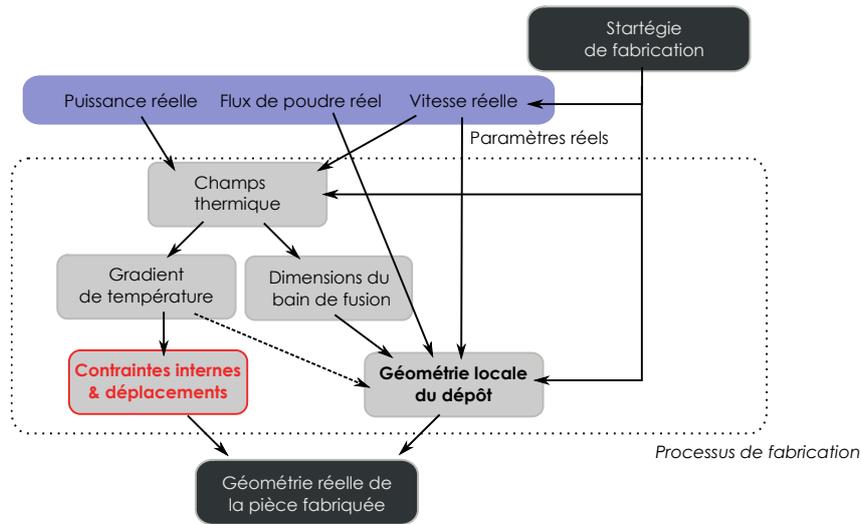


FIGURE 4.8 – Schématisation des phénomènes définissant la géométrie finale des pièces fabriquées par projection de poudres.

La déformation plastique est calculée à partir de la loi d'écoulement plastique standard [Bonnet and Frangi, 2006] :

$$\dot{\epsilon}_{i,j}^P = \begin{cases} \lambda \cdot \frac{\partial(f)}{\partial \sigma} & \text{si } f(\sigma) = 0 \\ 0 & \text{si } f(\sigma) < 0 \end{cases} \quad (4.11)$$

Avec λ le multiplicateur plastique et $f(\sigma)$, défini par la loi de Ludwik :

$$f(\sigma) = \sigma - \sigma_Y - H \cdot p^N \quad (4.12)$$

où σ est la contrainte de Von-Mises équivalente, σ_Y , la contrainte élastique initiale du matériau, H est le module d'écrouissage, p la déformation plastique accumulée et N le coefficient d'écrouissage.

Pour s'assurer de simuler l'entièreté des phénomènes thermomécaniques régissant la géométrie des pièces, le refroidissement de la pièce après fabrication est simulé. La pièce est considérée comme refroidie lorsque la température maximale est inférieure à 303 K.

2.2.3 Modélisation géométrique

L'objectif est de déterminer la géométrie locale du dépôt à chaque instant de la fabrication. Cela nécessite de considérer le flux de poudre (en termes de débit et de répartition), la vitesse de la tête de projection par rapport à la pièce et la dimension du bain de fusion (Fig. 4.9). L'influence du gradient de température sur la géométrie du dépôt sera négligée, cela revient à ne pas considérer les phénomènes thermocapillaires induits.

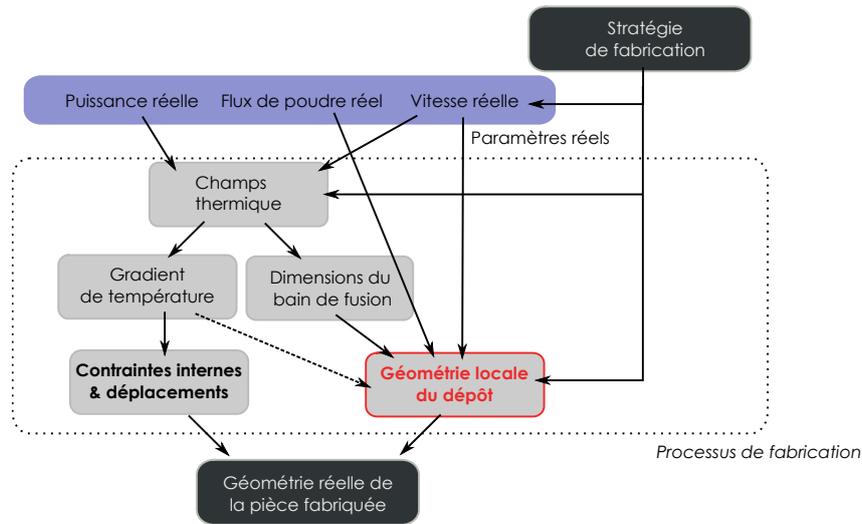


FIGURE 4.9 – Schématisation des phénomènes définissant la géométrie finale des pièces fabriquées par projection de poudres.

La répartition du flux de poudre apporté à la pièce à chaque instant de la fabrication est dictée par la distance buse/substrat notée d_{bs} . La figure 4.10 schématise ce flux. À la sortie de la buse, le jet de poudre forme un cône creux de diamètre 2,4 mm, le sommet de ce cône appartenant au plan focal du laser (positionné à 3,5 mm de la buse). Le substrat étant distant de 5 mm de la buse, l'interaction entre la poudre et le substrat est un disque dont le diamètre est estimé à 2 mm. À l'intérieur de ce disque, la répartition de poudre est considérée comme homogène.

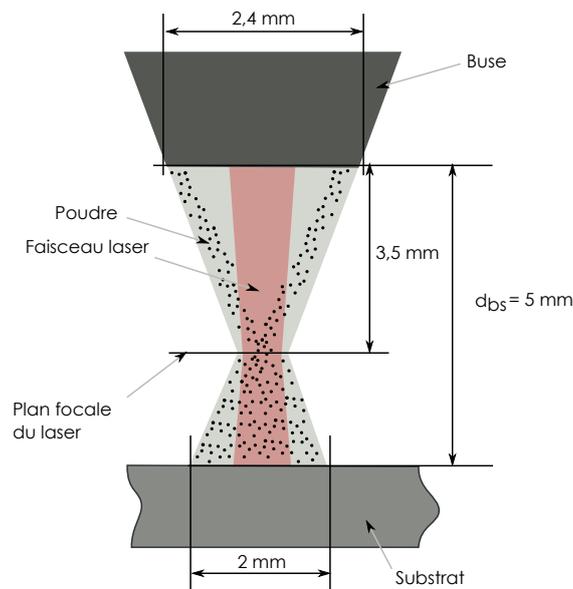


FIGURE 4.10 – Répartition schématique du flux de poudre de la sortie de la buse jusqu'au substrat.

À partir de ces données et hypothèses, nous proposons de modéliser l'apport de matière selon la méthode proposée par *Torserkani et al*, c'est-à-dire à partir de l'équation (4.6) [Toyserkani et al., 2004]. L'hypothèse principale de ce modèle consiste à supposer que l'ensemble la poudre projetée sur le bain de fusion est agglomérée à la pièce. Cette partie de la simulation a été faite à l'aide du logiciel Matlab, à partir des résultats obtenus à l'aide du logiciel Morfeo (pour la simulation thermomécanique).

Pour effectuer la simulation, la surface supérieure du substrat est subdivisée en $n \times n$ éléments infinitésimaux. Si l'on considère comme uniforme la répartition surfacique du flux de poudre sur le substrat, le phénomène d'apport de matière à l'instant t_i peut être modélisé par l'équation :

$$dh(x, y, z, t_i) = \frac{dt \cdot \dot{m}_p(t_i)}{\rho \cdot S_{poudre}} \text{ if } (x, y, z) \in S_{bain} \cap S_{poudre} \quad (4.13)$$

$$= 0 \text{ if } (x, y, z) \notin S_{bain} \cap S_{poudre} \quad (4.14)$$

Où (x, y, z) sont les coordonnées des éléments de la surface supérieure du substrat, S_{bain} et S_{poudre} sont les surfaces respectivement du bain de fusion et de la projection du flux de poudre sur la pièce, ρ est la masse volumique du matériau de la poudre et enfin, $\dot{m}_p(t_i)$ le débit massique de poudre en sortie de la buse à l'instant t_i . La représentation schématique de cette équation est donnée figure 4.11. Les frontières du bain de fusion sont déterminées à partir de la simulation thermique et la température de fusion T_f du matériau du substrat.

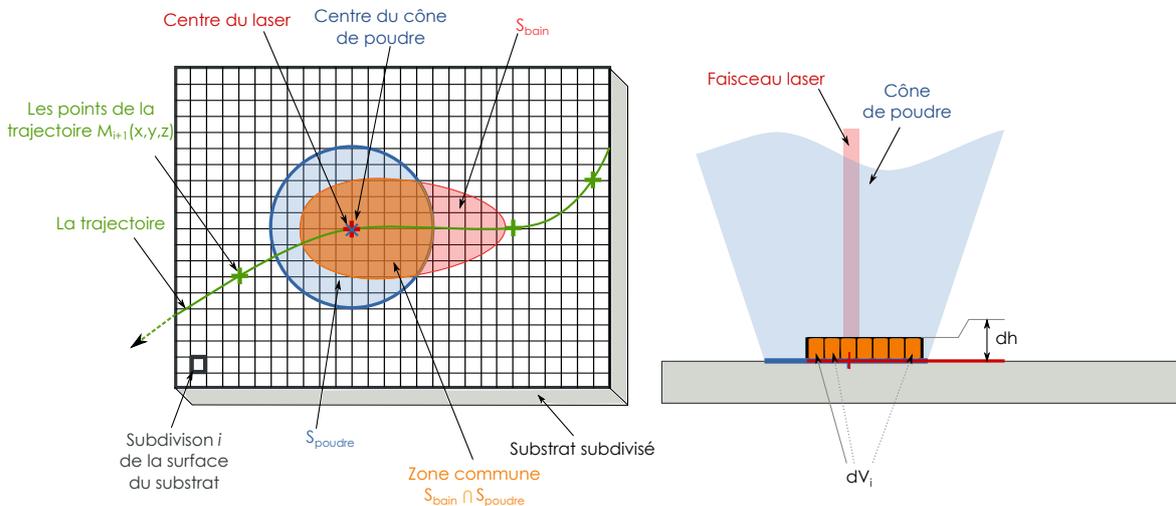


FIGURE 4.11 – Illustration du modèle du processus d'ajout de matière.

Le processus d'ajout de matière est alors simulé pour chaque point $M(x, y, z)$ de la trajectoire. À chaque pas de temps, la hauteur associée aux éléments de substrat est incrémentée, ce qui mathématiquement peut s'écrire :

Pour k allant de 1 à K ,

$$\forall(x, y, z), \quad h(x, y, z, t_k) = h(x, y, z, t_{k-1}) + dh(x, y, z, t_k) \quad (4.15)$$

Les conditions initiales géométriques sont :

$$\forall(x, y, z), h_{x,y,z}(t_0) = 0 \quad (4.16)$$

Dans le cas de la machine CLAD, *P. Muller et al* ont identifié la loi reliant le débit de poudre théorique (demandé par le programme de fabrication), noté $\dot{m}_p^*(t)$ et le débit réel, noté $\dot{m}_p(t)$. Cette loi est donnée par l'équation suivante [Muller et al., 2013b] :

$$\tau_a \cdot \frac{d\dot{m}_p(t)}{dt} + \dot{m}_p(t) = \dot{m}_p^*(t - \tau_r) \quad (4.17)$$

avec τ_a et τ_r des constantes de temps respectivement égales à 10 s et 6.2 s.

Parce que le débit \dot{m}_p a une influence directe sur $dh(x, y, z, t_i)$, nous prendrons en compte cette loi lors de nos calculs.

2.2.4 Analyse des déplacements (verrou 1)

L'objectif est de voir si le modèle proposé permet d'estimer de manière réaliste les déplacements induits par la fabrication d'une géométrie simple. Le déplacement des pièces au cours de leur fabrication est en effet l'une des sources d'écart entre les modèles géométriques et les géométries réellement fabriquées, il serait donc intéressant de pouvoir le prédire.

Les propriétés du matériau

Pour rester dans les conditions habituelles d'utilisation du procédé, les expériences effectuées ont toutes été réalisées avec les mêmes matériaux : de l'acier inoxydable de type 316 L pour la poudre et de l'acier bas carbone de type S235 pour les substrats. Couramment utilisés au sein de l'IRCCyN, ces matériaux sont ici employés pour nous permettre de nous assurer d'utiliser des paramètres de fabrication adaptés. Les propriétés de ces matériaux dépendent fortement de la température, les valeurs utilisées pour effectuer les simulations sont définies en annexe. Notons que lors de la simulation, le mélange de matière dans le bain de fusion n'est pas pris en compte.

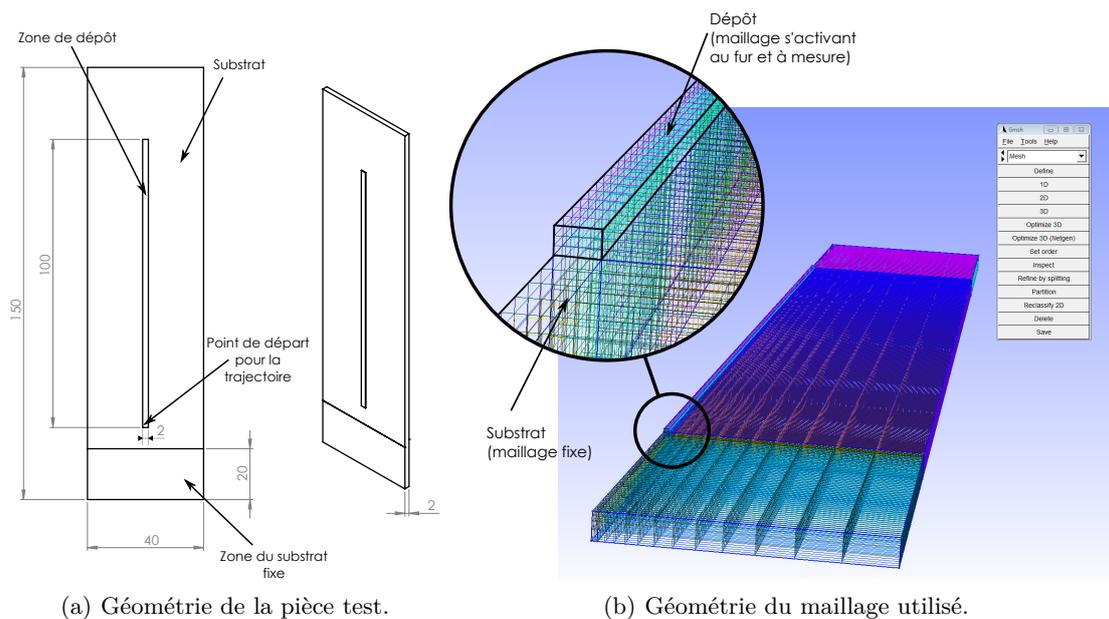
Concernant les caractéristiques cinématiques des axes de la machine, elles sont fixées et données dans le tableau 4.1.

Présentation de l'expérience

Dans le but de vérifier si notre modèle permet de prédire les déplacements des pièces au cours de leur fabrication, une expérience a été mise en place. Elle consiste à déposer un cordon d'acier inoxydable d'une longueur de 100 mm sur un substrat en acier S235 de 2 mm d'épaisseur (Fig. 4.12(a)).

Paramètre	Symbole	valeur
Jerk maximal ($m.s^{-3}$)	J_{max}	50
Accélération maximale ($m.s^{-2}$)	A_{max}	100
Vitesse maximale ($m.s^{-1}$)	V_{max}	10

TABLEAU 4.1 – Paramètres cinématiques limites correspondant à la machine CLAD.



(a) Géométrie de la pièce test.

(b) Géométrie du maillage utilisé.

FIGURE 4.12 – Caractéristiques de la pièce test et du maillage correspondant.

Au cours de l'expérience, le substrat est bridé à l'une de ses extrémités. Le profil de la surface supérieure du substrat est mesuré, à l'aide d'un comparateur, avant et après la fabrication, pour en déduire les déplacements résultants. Les paramètres utilisés sont donnés dans le tableau 4.2. Le débit de gaz permet de contrôler la répartition du flux de poudre, la valeur utilisée correspond à une répartition homogène.

Paramètre	Symbole	valeur essai (1)	valeur essai (2)
Puissance laser (W)	P	260	180
Vitesse de déplacement ($mm.s^{-1}$)	v	12	12
Débit de poudre ($g.min^{-1}$)	\dot{m}_p	5	5
Distance buse/substrat (mm)	d_{bs}	5	5

TABLEAU 4.2 – Paramètres de fabrication utilisés pour le dépôt d'un cordon linéaire.

Pour minimiser le temps de calcul de la simulation, la symétrie de la pièce est exploitée et seule la moitié du substrat est considérée. De plus, comme ici seul le déplacement nous intéresse, le phénomène d'ajout de matière est simplifié et remplacé par l'activation

d'éléments de maillage. Pour la même raison, le maillage est défini structuré. Il est non uniforme pour optimiser les résultats avec des mailles plus fines dans les endroits où le gradient de température est le plus important (dans la zone de dépôt). Dans cette zone, la dimension maximale du maillage est 0,1 mm pour s'assurer de bien prendre en compte la faible épaisseur du domaine dans lequel le rayonnement du laser est transformé en chaleur (Fig. 4.12(b)).

Par ailleurs, le comportement cinématique de la machine au cours de la fabrication est donné (valeurs calculées) figure 4.13.



FIGURE 4.13 – Comportement cinématique de la machine lors de la fabrication de la pièce test.

Les résultats

Une série de deux essais a été réalisée pour chacun des deux jeux de paramètres de fabrication. Dans tous les cas, nous constatons un écart important entre les valeurs mesurées et celles simulées, à l'image des résultats présentés figure 4.14 qui montrent un rapport allant jusqu'à 10 entre les deux. Ces écarts peuvent provenir des différentes hypothèses prises pour définir le modèle utilisé. Les propriétés matériaux sont, entre autres, très importantes et celles renseignées pour la simulation sont issues de la littérature et n'ont pas été mesurées expérimentalement. Un travail de caractérisation plus poussé est certainement nécessaire. La même remarque peut être faite concernant le taux d'absorption β , nous le considérons comme égal à 30% en nous basant sur l'état de l'art, cette valeur nécessiterait cependant une investigation plus poussée [Wang and Felicelli, 2006].

Pour l'heure, à partir des résultats obtenus, plusieurs constats peuvent déjà être faits :

- Les résultats expérimentaux ne sont, contrairement à l'hypothèse prise en simulation, pas symétriques. Cela peut provenir d'une géométrie initiale du substrat non

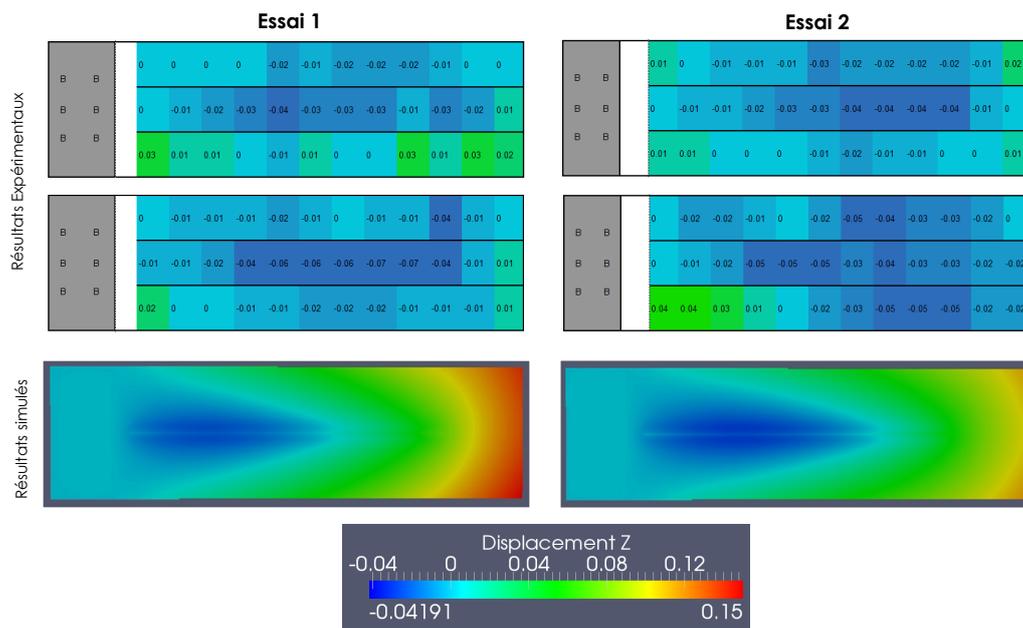


FIGURE 4.14 – Comparaison des valeurs expérimentales et théoriques.

symétrique et du centrage approximatif du dépôt par rapport au substrat lors des essais.

- Il existe une très forte dispersion entre les résultats expérimentaux pour des paramètres de fabrication identiques. Cela peut encore une fois provenir de la géométrie initiale des substrats, mais également de l'inhomogénéité des caractéristiques de ces derniers. Nous avons par exemple constaté que le sens du fibrage (les substrats sont obtenus par laminage) est un paramètre influent sur les résultats. Une plus grande campagne d'essais sera nécessaire pour réellement caractériser cette dispersion.
- Le temps de calcul est très important, il est compris entre 93 h et 162 h (soit plus de 7 jours), en fonction des paramètres choisis. La géométrie fabriquée n'est pourtant qu'un cordon monocouche.

Bilan de l'apport relatif au verrou 1

Au cours de notre état de l'art, nous n'avons pas trouvé de travaux portant sur la simulation et la confrontation avec le réel, des déplacements des pièces au cours de leur fabrication. En proposant un modèle thermomécanique complet, nous avons tenté de combler ce manque. Nos résultats de simulation sont cependant éloignés des valeurs expérimentales et le temps de calcul nécessaire à la simulation nous empêche de mettre en place un véritable plan d'expériences numérique pour déterminer précisément les raisons, au niveau du modèle, de ces écarts.

Finalement, ces essais nous permettent de comprendre pourquoi il n'existe pas aujourd'hui de publication sur ce point en fabrication additive. La complexité des modèles et donc le nombre de données nécessaires, couplés à un temps de calcul très important, nous empêchent aujourd'hui d'obtenir des résultats réalistes pour une géométrie basique comme

un cordon. Il n'est donc, actuellement, pas envisageable d'intégrer ce type de simulation dans une approche de type DFM telle que la notre.

2.2.5 Diminution du temps de calcul (verrou 2)

Nous avons vu que le temps nécessaire à la simulation est un véritable frein à son utilisation dans le cadre de notre méthodologie. Il n'est pas réaliste d'imaginer passer plusieurs jours pour estimer une trajectoire parmi d'autres.

La suppression du modèle mécanique dans notre modélisation complète, ne diminue cependant que faiblement le temps de calcul de la simulation, car c'est la détermination du champ thermique qui nécessite le plus de temps. Nous allons donc regarder dans quelle condition la simulation thermique est nécessaire. Le but est d'en déduire s'il est possible d'estimer, de manière réaliste, la géométrie locale du dépôt sans effectuer l'ensemble de la simulation thermique.

Présentation de l'expérience

Nous nous basons sur la même pièce test que précédemment (Fig. 4.12(a)). Du point de vue du modèle, nous ne prenons donc pas en compte la partie mécanique, par contre le modèle géométrique complet, présenté au paragraphe 2.2.3 est, lui, intégré. Les paramètres opératoires sont présentés tableau 5.1.

Paramètre	Symbole	valeur
Puissance laser (W)	P	260
Vitesse de déplacement ($mm.s^{-1}$)	v	12
Débit de poudre ($g.min^{-1}$)	\dot{m}_p	5
Distance buse/substrat (mm)	d_{bs}	5

TABLEAU 4.3 – Paramètres de fabrication utilisés pour la fabrication de la pièce test.

Dans un premier temps, nous nous baserons sur la simulation thermique pour estimer la géométrie du bain de fusion, les frontières du bain de fusion seront alors calculées à chaque pas de temps de la simulation thermique. Dans un second temps, à partir de la première expérience, nous considérerons un bain de fusion constant. Pour simplifier les calculs, l'intersection des frontières du bain de fusion avec la surface supérieure du substrat sera considérée comme circulaire. L'objectif est de voir si pour une forme simple, l'hypothèse d'un bain de fusion constant est acceptable.

Pour l'expérience, la géométrie réelle du dépôt est mesurée grâce à la machine à mesurer tridimensionnelle optique *Infinitefocus*³ fournie par l'entreprise ALICONA. Elle permet, en mesurant un nuage de point, de reconstituer sa surface extérieure.

3. <http://www.alicon.fr/home/produits/infinitefocus-standard.html> (25/06/2013)

Les résultats

Les géométries mesurées et simulées sont comparées, la figure 4.15 montre une partie de ces géométries. Cette figure met en évidence le fait que la surface réelle du dépôt comporte des aspérités non simulées, ces aspérités proviennent de l'agglomération de grains de poudre partiellement fondus.

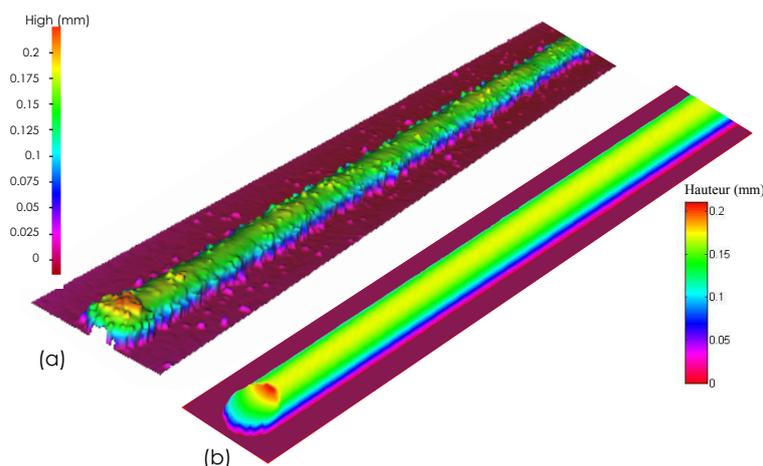


FIGURE 4.15 – Zoom sur les géométries mesurées (a) et simulées (b) en début de cordon.

Pour que la comparaison soit correctement lisible, nous comparerons séparément la hauteur et la largeur des dépôts. La figure 4.16 présente la comparaison entre les hauteurs et les largeurs mesurées et celles obtenues par la simulation complète.

En termes de hauteur, la mesure est directe et se fait donc tous les 4.10^{-3} mm (résolution de l'appareil de mesure). Les aspérités identifiées précédemment sont ici aussi visibles. La variation importante aux extrémités du dépôt est essentiellement due à la variation en vitesse des axes de la machine. Cette variation est prise en compte dans les simulations thermique et géométrique. Entre les extrémités, la hauteur varie, mais faiblement, cette variation est due à l'évolution au cours de la fabrication de la géométrie du bain de fusion. L'écart moyen entre les hauteurs mesurées et simulées est de 3,2%.

En termes de largeur, étant relativement constante, seule une mesure tous les 10 mm est réalisée. L'écart moyen entre les largeurs mesurées et simulées est de 1,9%.

Les résultats obtenus sont donc relativement satisfaisants en termes de valeur. En temps de calcul, ils ne sont, par contre, pas encore compatibles avec notre méthodologie. Le temps nécessaire à la simulation complète (thermique et géométrique) du dépôt avec les paramètres choisis est d'environ 102h, la partie thermique correspondant à la majorité de ce temps.

Pour le minimiser, nous proposons de considérer ce bain de fusion constant, l'intersection de ses frontières avec la surface supérieure du substrat est alors considérée comme un cercle de diamètre $0,52 \text{ mm}$. Cette dimension correspond à la moyenne des largeurs du dépôt précédemment simulées. L'analyse du bain de fusion au cours de la fabrication montre que cette hypothèse est proche des valeurs simulées (Fig. 4.17).

En considérant le bain de fusion constant, la simulation thermique n'est plus à effectuer.

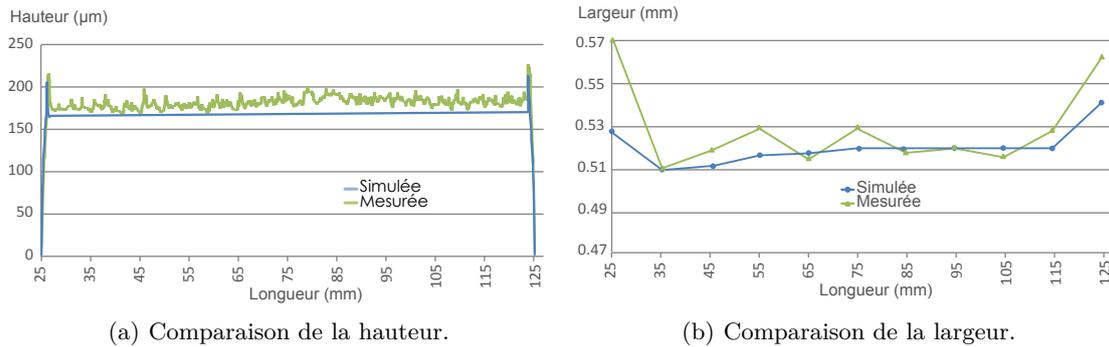


FIGURE 4.16 – Comparaison des géométries simulées et fabriquées, dans le cas de la simulation complète.

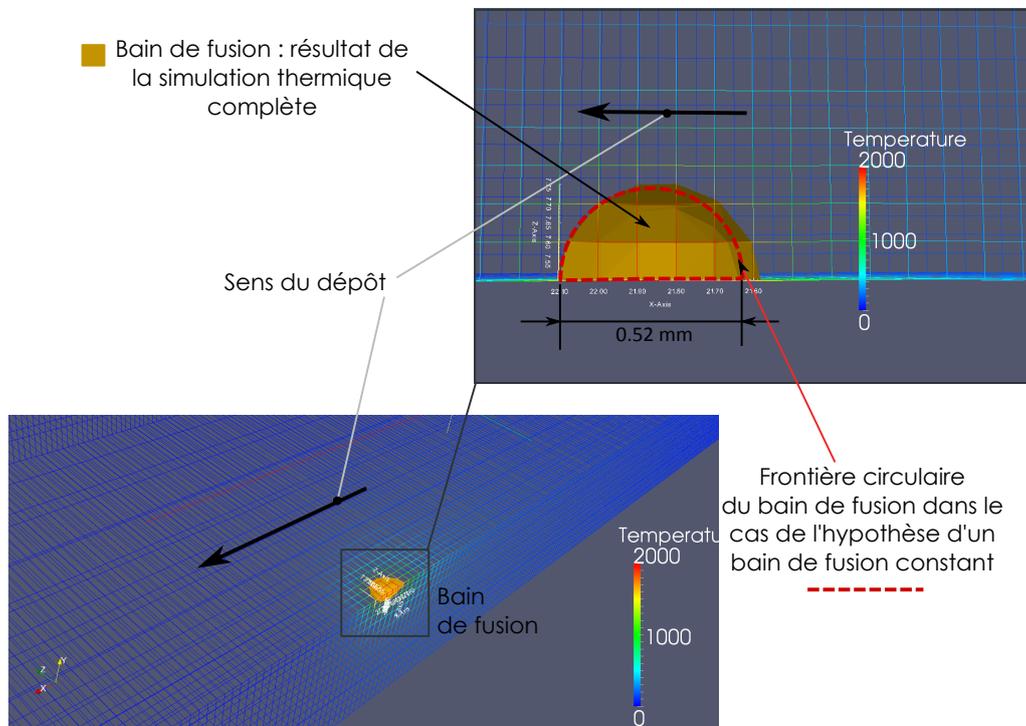


FIGURE 4.17 – Analyse de la géométrie du bain de fusion à l'instant $t = 4, 2s$.

La simulation du dépôt étudié prend alors 223s.

Les résultats obtenus sont comparés aux résultats expérimentaux sur la figure 4.18. En ce qui concerne la hauteur, l'écart entre les hauteurs moyennes mesurées et simulées est de 6,3%. Nous constatons qu'en dehors des extrémités du cordon, la hauteur du cordon simulé est cette fois-ci constante, cela est dû à l'hypothèse d'un bain de fusion constant.

Même remarque concernant la largeur du dépôt, la simulation la donne constante. L'écart entre les largeurs moyennes mesurée et simulée est de 2%.

Les écarts avec les valeurs mesurées nous semblent acceptables vis-à-vis du degré de simplification du modèle. Cette expérience semble valider la possibilité de prendre comme hypothèse un bain de fusion constant pour simuler la géométrie d'un dépôt de type cordon

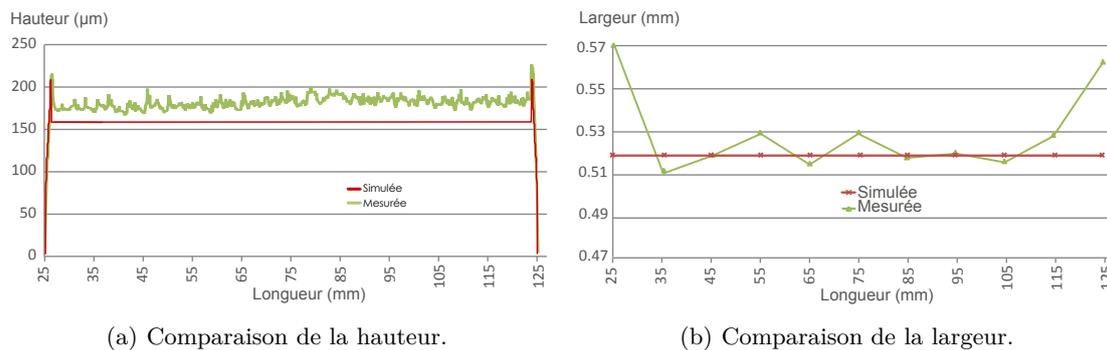


FIGURE 4.18 – Comparaison des géométries simulées et fabriquées, dans le cas de la simulation simplifiée.

monocouche.

Bilan de l'apport relatif au verrou 2

Suite au constat d'un temps de simulation incompatible avec notre méthodologie, nous avons proposé un modèle simplifié pour le réduire. L'hypothèse d'un bain de fusion constant dont l'intersection avec le substrat correspond à un cercle semble réaliste dans les conditions expérimentales étudiées. Plusieurs remarques peuvent cependant être faites :

- Le diamètre du cercle modélisant l'intersection des frontières du bain de fusion avec le substrat est dépendant des paramètres de fabrication utilisés. Ainsi il est tout de même nécessaire d'effectuer une simulation thermique pour chaque jeu de paramètres utilisé.
- Le modèle a été validé pour un cordon simple monocouche. Pour être utilisé dans notre méthodologie, il est encore nécessaire de le valider pour des géométries plus complexes.

2.2.6 Simulation d'une géométrie complexe (verrou 3)

Présentation de l'expérience

Dans le but de vérifier si notre modèle permet de prédire la géométrie du dépôt dans le cas d'une structure fine complexe, une nouvelle expérience est proposée. La figure 4.19 présente la pièce test utilisée. Elle a été choisie pour comporter différentes morphologies qui pourraient être trouvées sur des pièces fonctionnelles et qui se traduisent, en termes de trajectoire, par la présence de :

- différents rayons de courbure (entre 0,2 mm et 10 mm),
- points de discontinuités (avec des angles obtus, droits et aigus),
- des zones de croisement.

En ce qui concerne le comportement cinématique de la machine au cours de la fabrication, pour simplifier les calculs et au vu de la faible vitesse d'avance commandée, seules les variations de vitesse dues aux points de discontinuité de la trajectoire ont été calculées. Les paramètres opératoires sont les mêmes que précédemment (Tab. 5.1).

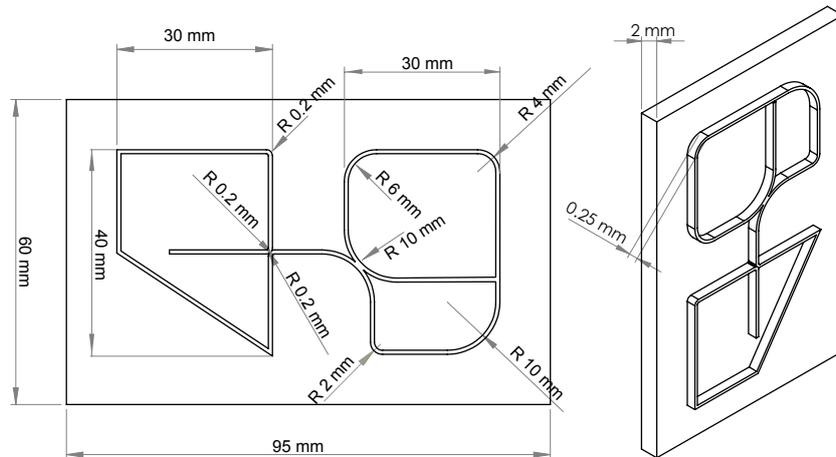


FIGURE 4.19 – Description de la géométrie de la pièce test.

Les résultats

Comme les paramètres procédé sont les mêmes que précédemment, le diamètre du bain de fusion est conservé égal à $0,52 \text{ mm}$. Le temps de la simulation est alors de 5min 40s.

La géométrie estimée à l'aide de la simulation est une nouvelle fois comparée aux valeurs expérimentales obtenues avec la machine *Infinitefocus*. La figure 4.20 présente les hauteurs correspondantes ainsi que l'écart entre les deux. Bien que l'écart maximal soit de 30,2%, l'écart moyen reste relativement faible (7,2%) ce qui est, compte tenu du temps de simulation nécessaire, une valeur acceptable.

Le profil de hauteur mesuré présente encore une fois des variations à haute fréquence, elles sont principalement, comme précédemment, dues à l'agglomération de grains de poudre partiellement fondus. Huit oscillations d'amplitude plus importante sont, cependant, identifiables. Provenant d'une variation du dépôt local, elles correspondent à huit zones particulières de la trajectoire :

- Les 2 extrémités, où la variation de vitesse de la tête de projection est dictée par les caractéristiques cinématiques de la machine.
- Les points de discontinuités, où là encore, une variation de vitesse apparaît.
- Les faibles rayons de courbure ($0,2 \text{ mm}$), où le recouvrement des dépôts réalisés à chaque instant varie.

Bien que les écarts avec les valeurs expérimentales peuvent aller jusqu'à 30,2 %, il est intéressant de noter que le modèle proposé nous permet de bien identifier ces huit zones correspondant à des variations importantes de la hauteur.

Le profil du dépôt a été étudié (Fig. 4.21) en trois points particuliers du dépôt. Les écarts mesurés avec les valeurs simulées sont relativement faibles, ils sont détaillés dans le tableau 4.4. Au niveau de la forme, le profil simulé est aussi relativement proche du réel.

Nous considérons donc que le modèle simplifié, proposé précédemment, permet d'estimer la géométrie du dépôt dans le cas d'une fabrication complexe monocouche. Or, pour s'assurer de pouvoir utiliser ce modèle dans le cadre de notre méthodologie, il est aussi

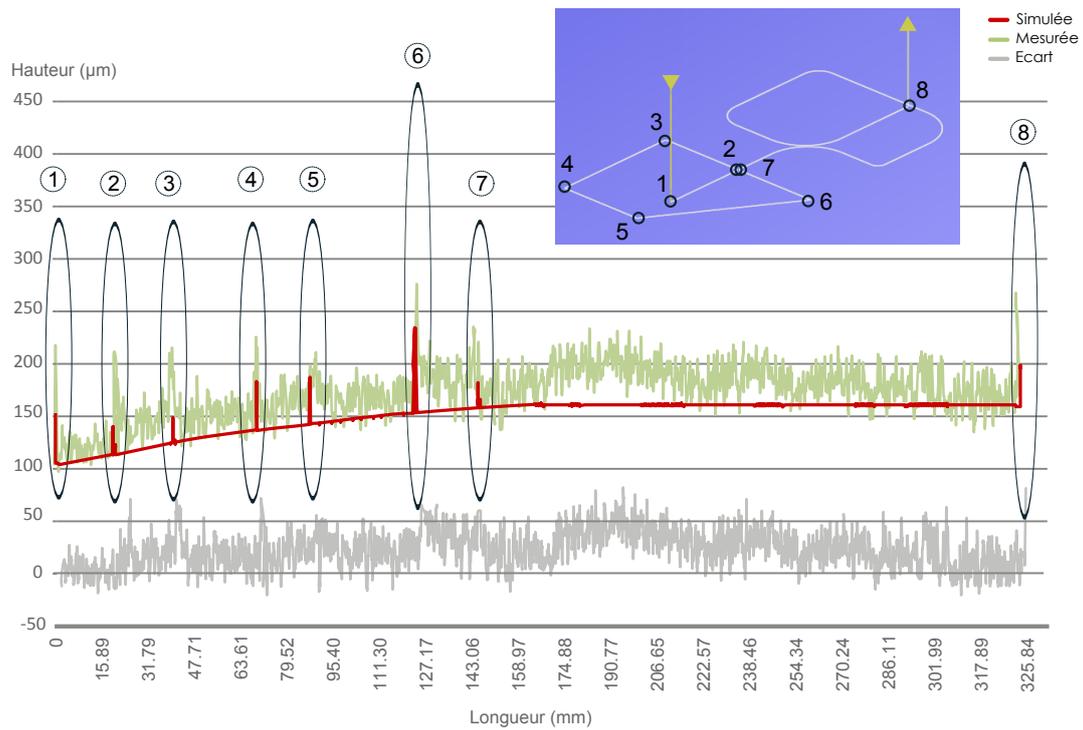


FIGURE 4.20 – Comparaison entre les hauteurs mesurées et simulées pour 1 couche déposée.

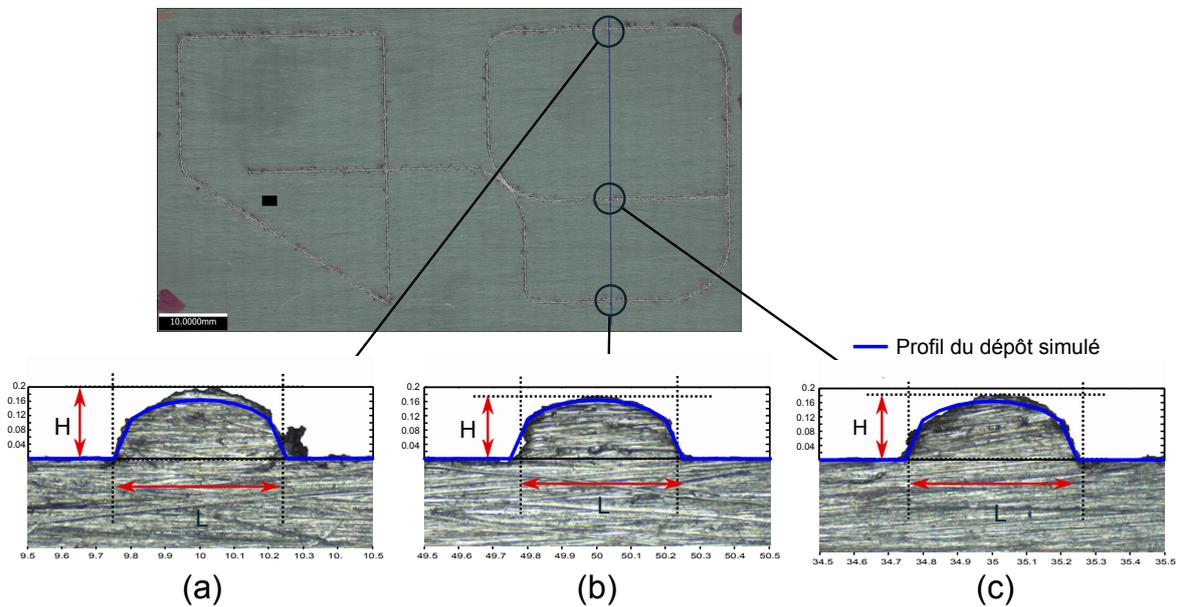


FIGURE 4.21 – Comparaison de la section du dépôt en trois endroits distincts du dépôt.

nécessaire de vérifier qu’il est valable pour simuler la fabrication complète, et donc multi-couche, d’une pièce.

Ainsi une nouvelle expérience a été mise en place. La trajectoire de l’expérience pré-

	Cas (a)	Cas (b)	cas (c)
Largeur mesurée(mm)	0,485	0,457	0,492
Largeur simulée(mm)	0,52	0,52	0,52
Écart(%)	7,2	13,7	5,6
Hauteur mesurée(mm)	0,199	0,176	0,182
Hauteur simulée(mm)	0,164	0,164	0,164
Écart(%)	18	6,8	9,8

TABLEAU 4.4 – Valeur des hauteurs et largeurs simulées et mesurées aux trois points particuliers étudiés.

cédente a été réutilisée pour réaliser non plus une seule couche de dépôt, mais dix. La simulation nécessite alors environ 50 min, les résultats sont présentés figure 4.22. L'écart moyen entre les hauteurs simulées et mesurées est de 6,8% pour un écart maximal de 25,9%. Ces valeurs sont très proches de celles correspondant à la fabrication monocouche. Pour les mêmes raisons, ces valeurs nous semblent acceptables.

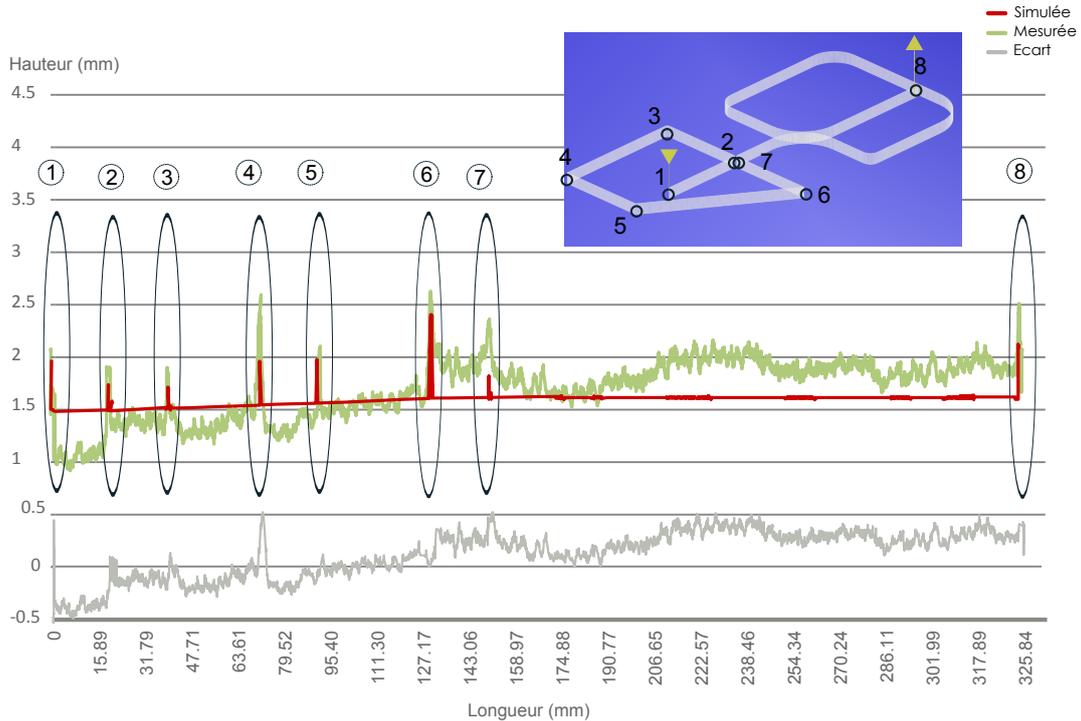


FIGURE 4.22 – Comparaison des hauteurs mesurées et simulées pour 10 couches déposées.

Bilan de l'apport relatif au verrou 3

Après avoir validé le modèle simplifié pour un cordon linéaire monocouche, nous avons vu que les résultats obtenus pour la simulation d'une géométrie complexe pouvaient être considérés comme acceptables, et ce aussi bien pour un dépôt monocouche que pour un dépôt multicouche. Les écarts entre les valeurs simulées et mesurées nous semblent en particulier acceptables pour évaluer les trajectoires les unes par rapport aux autres, au regard du temps de simulation nécessaire. Le modèle proposé permet, en effet, de prévoir les principales variations de hauteur du dépôt avec un temps de calcul relativement faible.

2.3 Synthèse sur le modèle finalement proposé

Notre problématique initiale était d'établir un modèle multi-physique du procédé de fabrication par projection de poudres permettant de prédire de manière réaliste la géométrie des pièces à concevoir, et ce dans un délai compatible avec le processus de conception.

Pour cela, nous nous sommes tournés vers la modélisation par éléments finis, en identifiant **trois principaux verrous** concernant les travaux existants :

- La non confrontation des valeurs de déplacement simulées avec des valeurs expérimentales.
- Le coût très important en termes de temps de calcul.
- La nature basique des géométries simulées.

Ces verrous sont de véritables freins à l'utilisation de la simulation de ce type dans une approche de type DFM. Nous les avons donc étudiés chacun séparément pour **proposer un modèle simplifié applicable**, en termes de temps de calcul, mais néanmoins réaliste pour l'utiliser **dans le cadre de notre méthodologie**.

Concernant l'estimation de la déformation, nos résultats de simulation sont relativement éloignés des résultats expérimentaux. Outre les erreurs dues aux conditions expérimentales, le modèle thermomécanique et les caractéristiques des matériaux nécessiteraient d'être validés par des études supplémentaires. Trop coûteux en temps de calcul, nous avons finalement décidé de ne pas traiter ce point et donc de ne pas prendre en compte, pour la suite, les phénomènes mécaniques mis en jeu.

Par ailleurs, nous avons montré que le temps nécessaire à la simulation des phénomènes thermiques seuls est déjà beaucoup trop important pour être intégré dans une démarche de type DFM. Nous avons donc décidé de ne plus simuler thermiquement l'ensemble de la fabrication, mais seulement une partie pour déterminer, pour une combinaison donnée de paramètres de fabrication, la géométrie du bain de fusion correspondante. Celle-ci est ensuite considérée comme constante. Cette approche permet un gain de temps très important tout en permettant de simuler de manière suffisamment réaliste la géométrie d'une pièce.

Outre le cas d'un cordon linéaire monocouche, nous avons montré que cette modélisation simplifiée était, en effet, **valable pour estimer la géométrie d'une pièce complexe** à parois minces. C'est-à-dire une pièce correspondant à une stratégie de trajectoire multicouche et dont la géométrie est autre que linéaire (présence de courbures et d'angles géométriques). **Nous avons, notamment, vu que ce modèle permettait,**

avec un temps de simulation raisonnable, de prévoir les variations importantes de la géométrie du dépôt lors de la fabrication et donc les potentiels défauts géométriques induits par le choix d'une stratégie de trajectoire.

Enfin, nos travaux présentés dans cette section montrent toute la **difficulté de prédire la géométrie réelle des pièces fabriquées par ajout de matière**. Les phénomènes mis en jeu étant complexes et couplés, il existe aujourd'hui, entre autres, une très forte dualité entre la qualité des résultats et le temps de calcul nécessaire. Le modèle mis en place répond, en partie, à cette problématique en permettant l'estimation de la géométrie du dépôt. De plus, la physique du procédé n'étant jusqu'à présent étudiée que dans un contexte d'amélioration du procédé, notre modèle bien que fortement simplifié nous permet **d'avoir un premier outil pour estimer le choix d'une stratégie de trajectoire parmi plusieurs d'un point de vue fabricabilité et fonctionnalité**. Ce qui est, selon nous, un premier résultat encourageant à poursuivre pour intégrer au plus tôt les spécificités des procédés additifs dans le processus de conception des produits. Nous allons, dans la section suivante voir comment, en pratique, cet outil peut être utilisé pour sélectionner une stratégie de trajectoire dans le cadre de notre méthodologie DFAM.

3 Méthode de choix des stratégies de trajectoire

Le choix de la stratégie de trajectoire est une partie importante de notre méthodologie, c'est en effet lui qui définit la géométrie finale de la pièce étudiée (Fig. 4.23). Comme expliqué dans le chapitre 3, ce choix doit être guidé par deux objectifs :

- Obtenir une géométrie finale proche de la géométrie théorique déterminée en amont dans la méthodologie. Cette dernière est, en effet, la géométrie répondant au mieux aux objectifs du problème initial de conception.
- Optimiser la fabricabilité de la géométrie finale en prenant en considération les règles métier associées au procédé de fabrication utilisé.

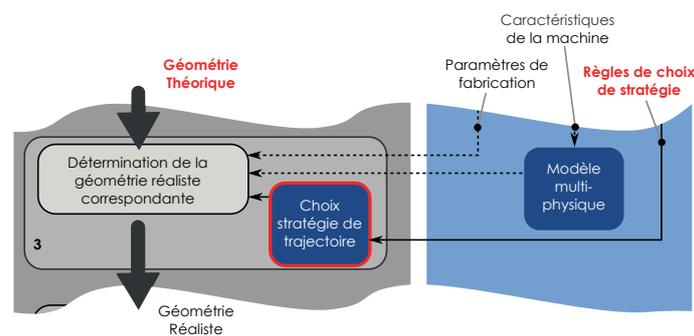


FIGURE 4.23 – Extrait de la méthodologie proposée.

Dans le cas de la fabrication par projection de poudres, à partir d'un modèle géométrique initial, les possibilités de trajectoire sont nombreuses, voire illimitées. En effet, pour une topologie de trajectoire donnée (par exemple balayage ou spirale), il est possible de faire varier de nombreux paramètres tels que la forme, l'orientation de la courbe guide, les points initiaux, etc. Ainsi l'évaluation de l'ensemble des possibilités de trajectoires pour une géométrie fixée n'est pas envisageable. Cela est encore plus vrai dans notre cas où elle n'est justement pas entièrement fixée.

Il est donc nécessaire de mettre en place une approche permettant, pour une pièce donnée, de faire un choix de stratégie de trajectoire qui ne soit non pas contraint mais seulement guidé par la géométrie théorique correspondante. Pour garantir la fabricabilité de la pièce, ce choix doit avant tout être dicté par les règles métier associées au procédé.

L'approche proposée devra être particulièrement adaptée pour la conception de pièces à parois minces. Comme évoqué précédemment, l'obtention de ce type de pièce est, en effet, l'un des principaux domaines d'application de la fabrication par projection de poudres.

Après un état de l'art des règles et méthodes existantes concernant la génération de trajectoire pour la fabrication par projection de poudres, des règles applicables dans le cas de géométries à parois minces seront proposées. Une nouvelle approche sera ensuite présentée pour pouvoir générer des trajectoires dans le cadre de notre méthodologie DFAM.

3.1 État de l'art

3.1.1 La génération de trajectoire

En ce qui concerne la génération de trajectoire, les travaux portant sur la technologie de fabrication par projection de poudres se sont fortement inspirés de ceux portant sur la technologie lit de poudre qui a été développée plus tôt. Cela explique qu'actuellement encore, la plupart des méthodes développées proposent de générer des trajectoires 2,5 axes de type balayage ou spirale uniquement [Liu and Liou, 2010]. L'approche utilisée est toujours la même : le modèle géométrique est tranché, chaque tranche correspondant à une couche de matière à déposer. La trajectoire 2D dans chaque tranche est alors géométriquement définie.

Pour cela, il existe différentes méthodes basées soit sur la discrétisation du contour de la tranche [Jin et al., 2011], soit sur son squelette topologique [Kao and Prinz, 1998]. Se limitant à des couches planes uniformes, ces approches ne permettent pas réellement de tirer profit de la technologie de projection de poudres, pour cela, il est nécessaire de pouvoir générer des trajectoires 5 axes. Ce type de trajectoire, plus complexe, commence seulement à être proposé [Zhang et al., 2008]. Il permet de minimiser le besoin de support pour la fabrication des pièces et donc de limiter les opérations de parachèvement pour l'enlever. La méthode utilisée pour la génération de trajectoires 5 axes consiste, encore une fois, à trancher le modèle géométrique de la pièce, mais cette fois-ci dans le but de déterminer les orientations de fabrication à privilégier [Ruan et al., 2007]. C'est à partir de ces orientations et de la géométrie de la pièce que la trajectoire 3D est ensuite générée [Kanakanala et al., 2010].

Qu'ils portent sur la génération de trajectoires 2,5 axes ou 5 axes, l'ensemble de ces travaux partent tous d'une géométrie de pièce initialement fixée. Ces travaux se positionnent, en effet, tous en aval du processus de conception, ainsi les approches mises en œuvre sont purement géométriques et consistent à déterminer une trajectoire permettant de "remplir" le modèle géométrique de la pièce étudiée. Elles ne peuvent donc pas être intégrées en l'état dans une démarche de type DFM qui implique que la géométrie n'est pas encore, définitivement, fixée. Une modélisation plus conceptuelle des trajectoires est donc ici nécessaire.

3.1.2 Les règles métier

Concernant les règles métier utilisées, la seule prise en compte par la plupart des travaux concernés est la nécessité, pour la tête de projection, de parcourir l'ensemble du volume correspondant à la pièce étudiée en ne passant qu'une seule fois au même endroit [Choset and Pignon, 1997]. Parmi les rares travaux proposant de prendre en compte d'autres règles pour la génération de trajectoires, nous pouvons citer ceux de *Y. Yang et al* qui génèrent des trajectoires dont la géométrie est déterminée pour minimiser le temps de fabrication des pièces [Yang et al., 2002]. Ils proposent pour cela d'optimiser une trajectoire de type spirale. *H. Bian et al*, quant à eux, proposent de générer une trajectoire de type balayage en adaptant l'intervalle entre deux passes en fonction de la géométrie pour minimiser les défauts géométriques dus à un recouvrement variable entre les dépôts [Bian et al., 2008].

Ces règles sont applicables lorsque la géométrie des pièces est de type massive. Il existe alors un grand nombre de possibilités concernant les trajectoires de fabrication.

Cette diversité de solutions permet de déterminer l'optimum vis-à-vis d'un critère donné pour "remplir" la géométrie initiale (Fig 4.24). En revanche, dans le cas des pièces à parois minces, la relation entre la géométrie de la pièce et la trajectoire est une fonction bijective. Ainsi, optimiser la trajectoire nécessite donc de modifier la géométrie de la pièce. Or il n'existait, jusqu'à présent, pas de travaux portant sur cette idée de définir la géométrie des pièces à partir d'un choix de trajectoires. Dans les travaux existants, la géométrie des pièces étant définie en amont, la trajectoire est indirectement dictée, il ne reste en effet quasiment aucune marge de manœuvre pour l'optimiser. Il n'existe donc, tout simplement, pas de règles métier concernant la génération de trajectoire dans le cas de pièces à parois minces.

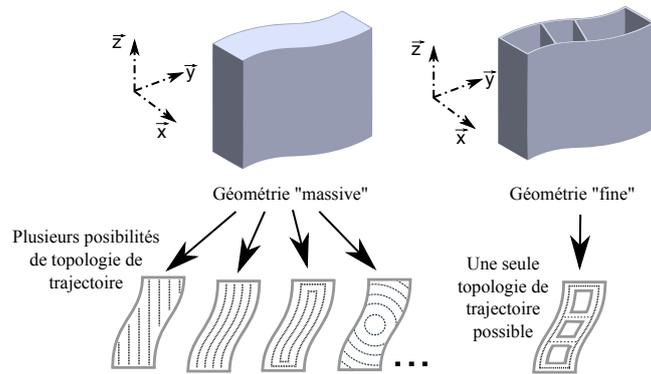


FIGURE 4.24 – Illustration de la relation directe entre la géométrie et la trajectoire dans le cas de pièces à parois minces.

Dans la suite de ce manuscrit, seules les pièces dont l'épaisseur maximale est strictement inférieure à celle correspondant à trois dépôts parallèles seront dites à parois minces.

3.1.3 Synthèse de l'état de l'art

L'analyse de l'état de l'art concernant la génération de trajectoire pour la fabrication par projection de poudres, met en évidence le peu de travaux existants. De plus, elle nous a permis d'identifier deux verrous vis-à-vis de nos besoins :

- **Verrou 1** : il n'existe pas de règles métier portant sur la génération de trajectoire dans le cas de géométrie à parois minces. Dans le cadre d'une approche de type DFM telle que la nôtre, il est nécessaire d'avoir deux types de règles : des règles globales portant sur la topologie de la trajectoire et des règles locales portant sur sa définition géométrique locale.
- **Verrou 2** : il n'existe pas, actuellement, de méthode permettant de générer des trajectoires qui puissent "s'écarter" du modèle géométrique initial des pièces. De telles propositions nécessitent d'aborder le problème de la génération de trajectoire avec un niveau d'abstraction supérieur à celui d'une analyse purement géométrique pour prendre en compte les règles globales liées au procédé.

Les deux verrous identifiés par l'analyse de l'état de l'art illustrent la relative immaturité des travaux portant sur la fabrication directe par projection de poudres. Dans la suite de cette section nous présentons nos propositions pour lever ces verrous.

3.2 Propositions

3.2.1 Proposition de règles métier (verrou 1)

Avant toute chose, garantir la fabricabilité des pièces, dans le cas de la fabrication par projection de poudres, nécessite de s'assurer qu'à tout instant de la fabrication, la poudre soit projetée sur un substrat ou un dépôt précédent. Ainsi pour une portion de trajectoire donnée, il est nécessaire qu'il en existe une autre accessible suivant l'orientation de fabrication choisie, pour pouvoir la supporter. La première règle concernant la définition de la trajectoire que nous proposons est donc :

- **Règle 1** : pour tout point de la trajectoire, un autre doit pouvoir lui servir de support. Cela nécessite que pour un point donné, il en existe un autre point, positionné en amont, distant de la valeur du paramètre procédé d_{bs} suivant l'orientation de fabrication.

Il est, par ailleurs, établi que dans le cas de la technologie de fabrication par projection, la fabricabilité des pièces est directement liée à la variation au cours de leur fabrication de la hauteur du dépôt [Liu and Li, 2005]. En effet, la fabrication se fait par ajout successif de dépôts de matière les uns sur les autres. Ainsi, la géométrie du dépôt à un instant donné est directement dépendante de la géométrie du dépôt précédent qui lui sert de substrat. Une variation de la hauteur du dépôt à un instant donné implique donc, pour le dépôt suivant, une variation du paramètre de fabrication d_{bs} (la distance buse-pièce). Or ce paramètre dicte, à chaque instant de la fabrication, l'énergie et la quantité de matière apportées à la pièce (Fig 4.25). Ainsi, la variation de la hauteur de dépôt s'accroît avec le nombre de couches successives (Fig. 4.26).

Cette variation augmente alors jusqu'à empêcher un dépôt correct et finalement, à moyen terme, empêcher la fabrication de la pièce ou du moins imposer une étape intermédiaire de surfaçage pour la poursuivre. Cette phase supplémentaire impliquera au minimum un temps de fabrication supplémentaire. Elle peut également induire des écarts de fabrication issus d'erreurs de positionnements, si les pièces doivent être changées de machine pour effectuer l'opération de surfaçage, ou encore de la déformation des pièces lors de cette opération, en particulier si les pièces sont à parois minces. Pour maximiser la fabricabilité des pièces et donc minimiser le besoin de surfaçages intermédiaires, la variation de hauteur du dépôt doit, par conséquent, être maîtrisée tout au long de la fabrication.

Or, au cours de nos expériences présentées à la section précédente, nous avons pu constater que pour une trajectoire complexe, des variations importantes de la hauteur du dépôt apparaissaient dans certaines zones. Outre l'agglomération de grains de poudre partiellement fondus en surface du dépôt, nous avons, en effet, constaté que la variation de hauteur était due aux points d'entrée/sortie, aux points de discontinuité, et aux faibles rayons de courbure. Ainsi, nous proposons, pour minimiser les variations brusques de la hauteur du dépôt au cours de la fabrication, trois nouvelles règles à appliquer pour définir les trajectoires :

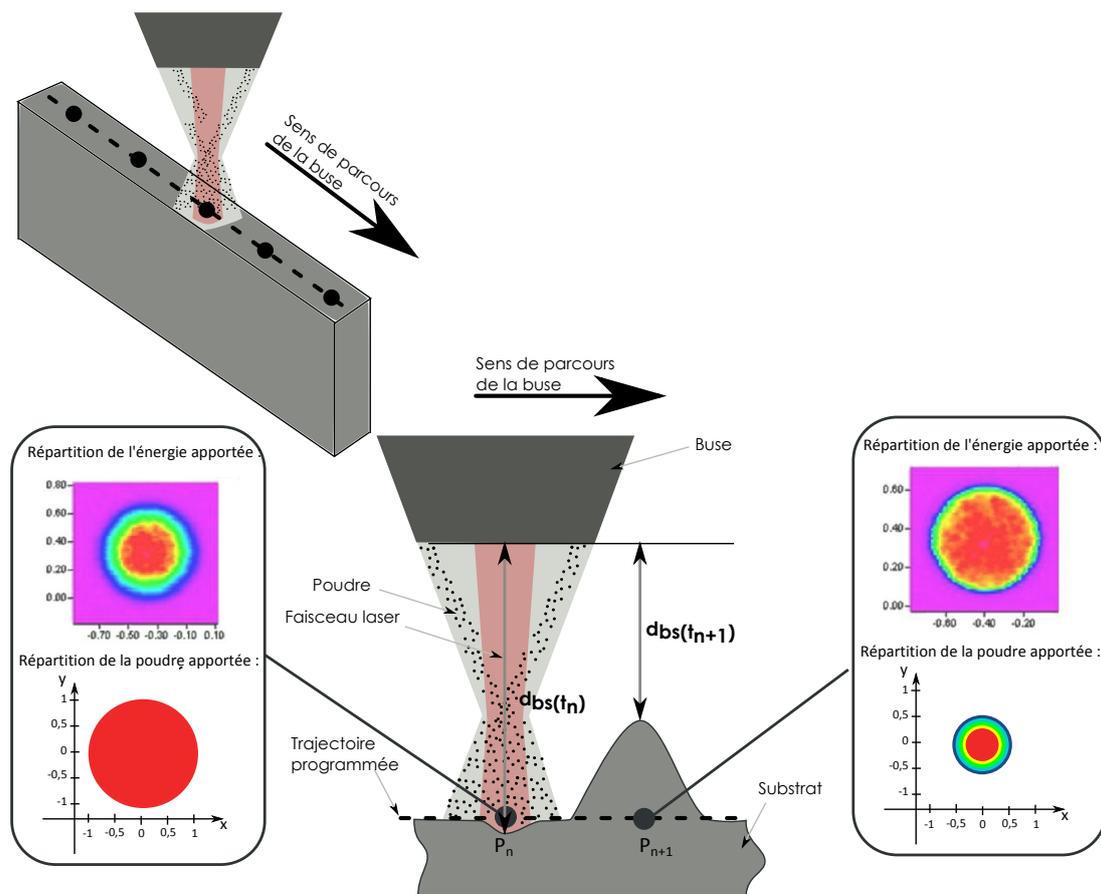


FIGURE 4.25 – Schématisation de l'impact de la variation de d_{bs} sur les conditions de fabrication.

- **Règle 2** : Minimiser le nombre de points d'entrée/sortie dans la trajectoire.
- **Règle 3** : Minimiser le nombre de points de discontinuité.
- **Règle 4** : Maximiser les rayons de courbure.

Il est intéressant de noter que ces règles ne sont pas du même ordre. En effet, les règles 1 et 2 sont globales et peuvent impacter sur la topologie de la trajectoire. En revanche, les règles 3 et 4 ne portent que sur la géométrie locale de la trajectoire. Ces deux aspects seront évidemment pris en compte dans la méthode proposée.

3.2.2 Proposition d'une nouvelle méthode de génération de trajectoire (verrou 2)

Comme expliqué au chapitre 3, quel que soit le procédé additif utilisé et pour un problème de conception donné, une stratégie de trajectoire doit être définie pour chaque groupe G_j identifié lors de la définition du domaine de conception (étape 2 de la méthodologie). La trajectoire complète permettant de fabriquer l'ensemble de la pièce est alors définie par l'ensemble de ces trajectoires. Chacune d'elle est déterminée de la même manière à partir de (Fig. 3.15) :

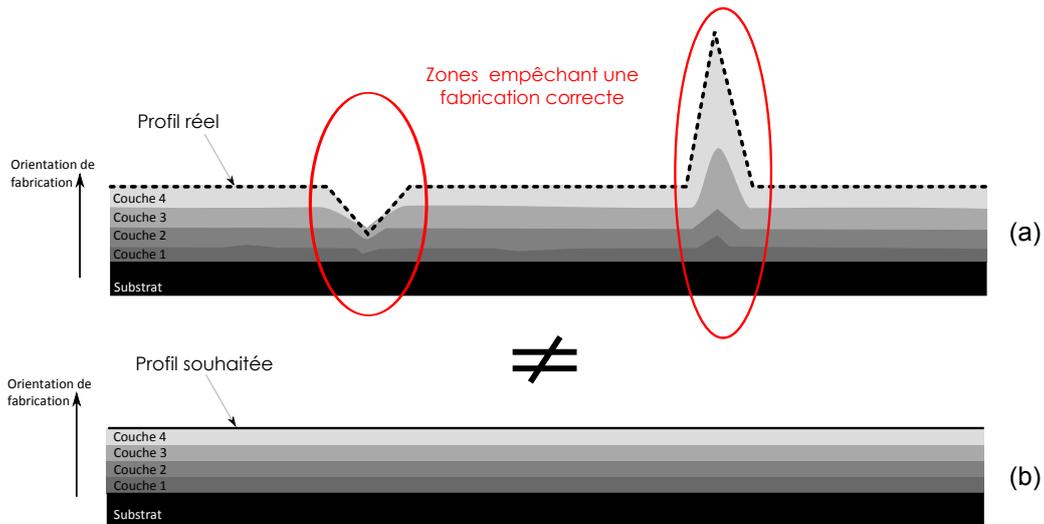


FIGURE 4.26 – Schématisation des problèmes que peut engendrer une variation brusque du paramètre d_{bs} .

- L’orientation de fabrication associée à G_j .
- La géométrie théorique incluse dans le volume accessible associé ($Vt_{brut} \cap Va_j$).
- Le domaine de conception inclus dans le volume accessible associé ($\mathcal{D}_{fonctionnel} \cap Va_j$).

La méthode générale de détermination des trajectoires est décrite sous forme d’algorithme à la figure 4.27, elle se décompose en quatre principales étapes :

1. **Le tranchage** des volumes inclus dans le groupe G_j étudié. Ce tranchage est de type plan, il est défini par l’orientation de fabrication définie précédemment. L’objectif n’est pas directement de définir les couches de matière à apporter, mais d’étudier la géométrie de la pièce dans chaque tranche pour, par la suite, définir la topologie de la trajectoire associée. Cette topologie servira alors de guide pour définir la trajectoire. Celle-ci pouvant passer d’une tranche à l’autre de manière continue.
2. **La détermination du type de structure** correspondant à la géométrie théorique. La géométrie peut en effet être de type massive ou de type fine. Comme il a été expliqué précédemment, l’optimisation de la trajectoire n’a pas le même impact sur la géométrie selon le cas étudié. Les outils à mettre en place seront donc différents.
3. **La définition topologique de la trajectoire.** L’idée est de faire en sorte que la topologie générale de la trajectoire soit dictée par les règles métier générales issues du procédé et que la géométrie théorique des pièces ne soit qu’un guide pour l’établir. L’objectif est de s’inspirer de cette géométrie pour déterminer une trajectoire de fabrication sans pour autant la borner. Cette approche nécessite une modélisation des trajectoires d’un niveau d’abstraction plus élevé que la représentation géométrique. Cette modélisation dépend du procédé de fabrication choisi et du type de structure correspondant à la géométrie théorique.
4. **La définition géométrique de la trajectoire.** Cette étape est purement géométrique et consiste à appliquer les règles métiers locales pour définir finement la géométrie de la trajectoire, une fois que sa topologie ait été déterminée.

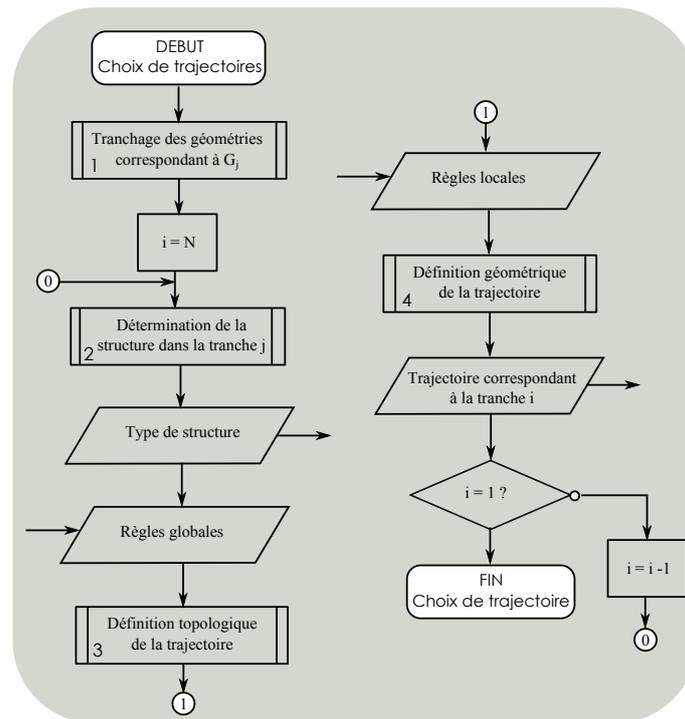


FIGURE 4.27 – Algorithme décrivant la définition des trajectoires de fabrication à partir de la géométrie théorique des pièces.

Nous avons vu précédemment que l’obtention de pièces à parois minces est la principale application des procédés de fabrication par projection de poudres. Nous allons donc par la suite nous concentrer sur ce type de structure pour appliquer notre méthodologie. Cette dernière est basée sur une décomposition de l’espace de travail de la machine de fabrication en voxel, un voxel étant l’équivalent d’un pixel en trois dimensions. Pour un problème de conception donné, à chaque voxel est associé une information colorimétrique :

- vert pour indiquer que le voxel appartient au domaine de conception.
- bleu pour indiquer que le voxel appartient à la géométrie théorique.
- blanc pour indiquer que le voxel appartient à une zone non admissible
- noir pour indiquer que le voxel est à la frontière de deux zones distinctes

Pour illustrer nos propos, nous nous appuyerons sur l’exemple d’une portion de pale présentée à la figure 4.28 dont le volume correspond à une extrusion linéaire de la section présentée. L’objectif est de déterminer les trajectoires de fabrication à utiliser pour la fabriquer à l’aide de la machine CLAD présentée à la section précédente. Nous considérerons que le domaine de conception est l’ensemble du volume interne de la pale (en vert). La géométrie théorique de la pale (en bleu) correspond à une épaisseur minimale associée à la surface fonctionnelle et à deux renforts internes. L’ensemble appartient au même groupe G_1 associé à l’orientation de fabrication \vec{T}_1 .

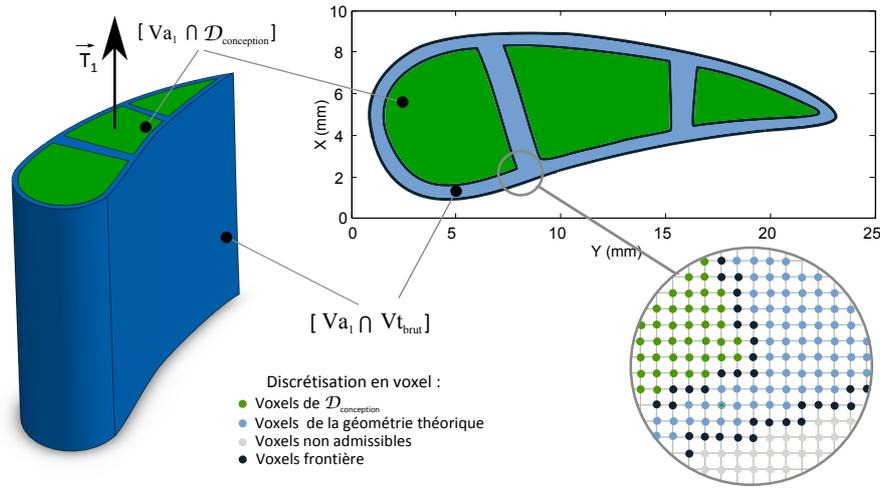


FIGURE 4.28 – Pièce exemple.

3.3 Détail de l'approche proposée

3.3.1 Tranchage

Principe

Pour chaque groupe G_j , l'idée est de trancher les volumes correspondant à la géométrie théorique de la pièce et à son domaine de conception. Cette étape consiste à déterminer l'intersection de ces volumes avec des plans dont la normale est définie par l'orientation de fabrication associée au groupe. Par la suite, les tranches seront étudiées les unes à la suite des autres en commençant par la plus "haute" du point de vue de l'orientation de fabrication.

Pour rappel, la géométrie finale des couches de dépôt n'est pas directement liée à cette opération de tranchage. Cette dernière permet juste de discrétiser la géométrie théorique de la pièce pour définir les courbes guides de la trajectoire.

Illustration

Dans le cas de notre exemple, la géométrie de la pièce ainsi que les limites du domaine de conception sont les mêmes dans toutes les tranches (Fig. 4.29).

3.3.2 Détermination du type de structure

Principe

Selon que la géométrie théorique de la pièce soit de type fine ou bien massive, la méthode de détermination des trajectoires n'est pas la même. Pour un problème de conception donné, il est donc nécessaire de déterminer le type de structure correspondant à la géométrie théorique de la pièce pour en déduire, à chaque fois, la méthode à appliquer. La trajectoire complète nécessaire à la fabrication de la pièce finale correspond alors à l'ensemble des trajectoires choisies pour fabriquer les différents groupes.

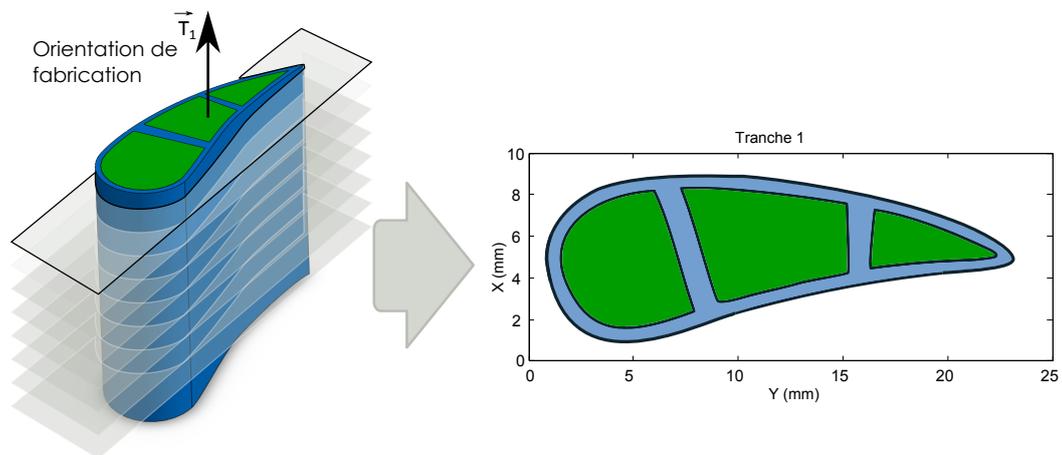


FIGURE 4.29 – Description de la géométrie d'une tranche.

Pour chaque tranche, le type de structure de la géométrie théorique est déterminé en la squelettisant. Le squelette topologique ou axe médian de la géométrie théorique est défini comme étant l'ensemble des centres des sphères maximales locales, ces dernières touchant la frontière de la géométrie théorique en au moins deux points distincts [Blum, 1967]. Le type de structure est alors déduit en comparant le diamètre de ces sphères inscrites à la largeur minimale d'un dépôt.

Illustration

Dans le cas de notre exemple, la structure de la géométrie théorique est considérée comme de type à parois minces. En effet, l'épaisseur des parois est comprise entre 0,52 et 0,75 mm (Fig. 4.30) alors que la dimension minimale fabricable avec la machine CLAD est, d'après nos expériences, théoriquement de 0,52 mm. La section de la pale étant invariante suivant l'orientation de fabrication choisie, la structure est la même dans l'ensemble des tranches.

3.3.3 Définition topologique de la trajectoire

Principe

L'objectif est de définir une topologie de trajectoire à partir des règles métier générales associées au procédé qui soit guidée par la géométrie théorique de la pièce et contrainte par son domaine de conception.

Dans le cas d'une géométrie théorique à parois minces, la topologie de la trajectoire est directement donnée par le squelette topologique de la pièce. Ce dernier est cependant figé et ne permet pas directement d'appliquer les règles métier globales à la topologie de la trajectoire ni de s'écarter de la géométrie théorique. Ainsi, nous proposons à partir du squelette topologique, de définir le modèle graphe de la trajectoire. Ce dernier est un

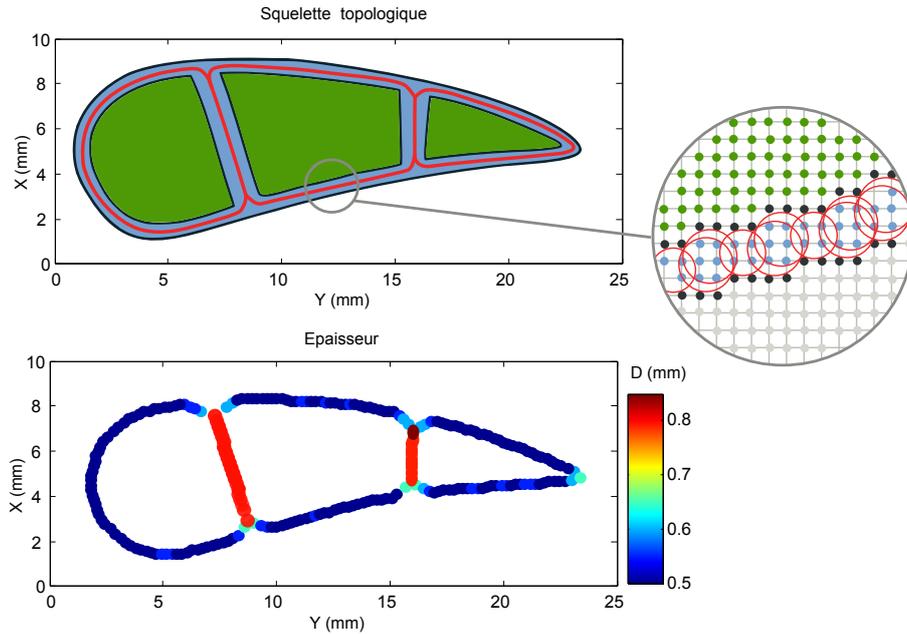


FIGURE 4.30 – Détermination du squelette topologique d'une tranche de la pale étudiée.

modèle conceptuel paramétrique de la topologie des trajectoires auquel peut être appliqué les règles métier globales issues du procédé.

Ainsi pour une tranche donnée, le squelette topologique de la géométrie théorique permet de définir un graphe noté \mathcal{G}_i caractérisé par :

- des nœuds, notés V_p , qui représentent les croisements de parcours,
- des arêtes, notées E_k , qui représentent les portions de parcours entre ces croisements.

À chaque arête est associé un poids (noté w_k) correspondant au nombre de dépôts parallèles à réaliser le long de la portion de parcours correspondante. w_k est calculé à partir de la valeur du diamètre des sphères maximales inscrites calculées précédemment et de la largeur théorique du dépôt. Par ailleurs, à chaque nœud est associé un degré (noté d_p) représentant le nombre de dépôts qu'il connecte. Le graphe \mathcal{G}_i est alors modélisé de deux manières :

- géométriquement : chaque nœud et chaque arête correspondant, en effet, à une série de voxels,
- mathématiquement par sa matrice d'incidence (notée M_i) qui permet de savoir quel nœud est relié avec quelle arête.

La topologie de la trajectoire ainsi paramétrée peut être adaptée en fonction des règles métier globales. En effet, sans avoir une idée précise de la géométrie de la trajectoire, sa topologie est caractérisée et peut être aisément modifiée. Ainsi, pour garantir le support à tout point de la trajectoire, la topologie de la tranche i doit contenir la topologie de la tranche $i-1$ ce qui revient à ce que le graphe \mathcal{G}_i contienne le graphe \mathcal{G}_{i-1} . De même, minimiser les points d'entrée/sortie de la trajectoire nécessite de pouvoir générer une trajectoire 3D continue, ce qui implique au niveau des graphes définis dans chaque tranche de trouver un chemin passant une seule fois par l'ensemble des nœuds. Ceci nécessite que

les graphes soient Eulerien ou semi-Eulerien. Dans le premier cas, les points d'entrée/sortie du chemin sont disjoints et dans le second ils sont superposés.

Une fois analysé, le graphe initial peut, si nécessaire, être modifié pour satisfaire ces exigences tout en respectant les limites du domaine de conception de la pièce. Ainsi, pour adapter \mathcal{G}_i , des arêtes peuvent être ajoutées dans les espaces correspondant à ce domaine uniquement.

Lors de la définition topologique de la trajectoire, il existe plusieurs solutions permettant de respecter les règles métier générales. L'idée est alors d'en sélectionner une pour proposer une trajectoire de fabrication complète et par la suite, estimer l'ensemble de la géométrie de la pièce correspondante. Les différentes solutions peuvent ainsi être séparément étudiées pour finalement être comparées les unes aux autres d'un point de vue global (étape 4 de notre méthodologie donnée figure 3.1).

Illustration

La figure 4.31 présente l'application de la démarche à la pièce exemple. La géométrie de la pale est tout d'abord tranchée puis la géométrie théorique appartenant à la première tranche est squelettisée et le graphe correspondant est déterminé, il comporte quatre nœuds et six arêtes. Parce que les parois de la pale théorique ont une épaisseur comprise entre $0,6\text{ mm}$ et $0,75\text{ mm}$ et que la largeur théorique du dépôt est de $0,52\text{ mm}$ le poids w_k de chaque arête est égal à 1. Chaque nœud étant, ainsi, connecté à 3 arêtes, leur degré est égal à 3.

Les quatre nœuds du graphe étant de degré impair, ce dernier n'est ni Eulerien ni semi-Eulerien. Pour satisfaire la règle 2 que nous nous sommes fixée, il est donc nécessaire, dans les limites du domaine de conception, de le modifier. Pour cela, plusieurs solutions sont possibles (Fig. 4.32). Une seule est pour le moment sélectionnée, elle correspond à l'une des topologies possibles pour la trajectoire. Le graphe ainsi que la matrice d'incidence sont donc mis à jour.

3.3.4 Définition géométrique de la portion de trajectoire associée à une tranche

Principe

L'objectif de cette étape est de générer la portion de trajectoire correspondant à la tranche étudiée, en se basant sur la topologie sélectionnée précédemment.

Dans un premier temps, il est nécessaire définir un sens de parcours pour la trajectoire. Cela consiste à orienter le graphe, le sens du parcours est alors décrit par la matrice d'incidence du graphe orienté et la série chronologique des nœuds rencontrés.

Le choix du sens de parcours est contraint par la règle 2 proposée. Pour minimiser les points d'entrée sortie de la trajectoire, il est, en effet, nécessaire de s'assurer la continuité de la trajectoire ce qui revient à :

- minimiser le nombre de cycles indépendants nécessaires pour parcourir le graphe.
- faire correspondre le point de fin de parcours du graphe avec le point de début de parcours du graphe de la tranche supérieure.

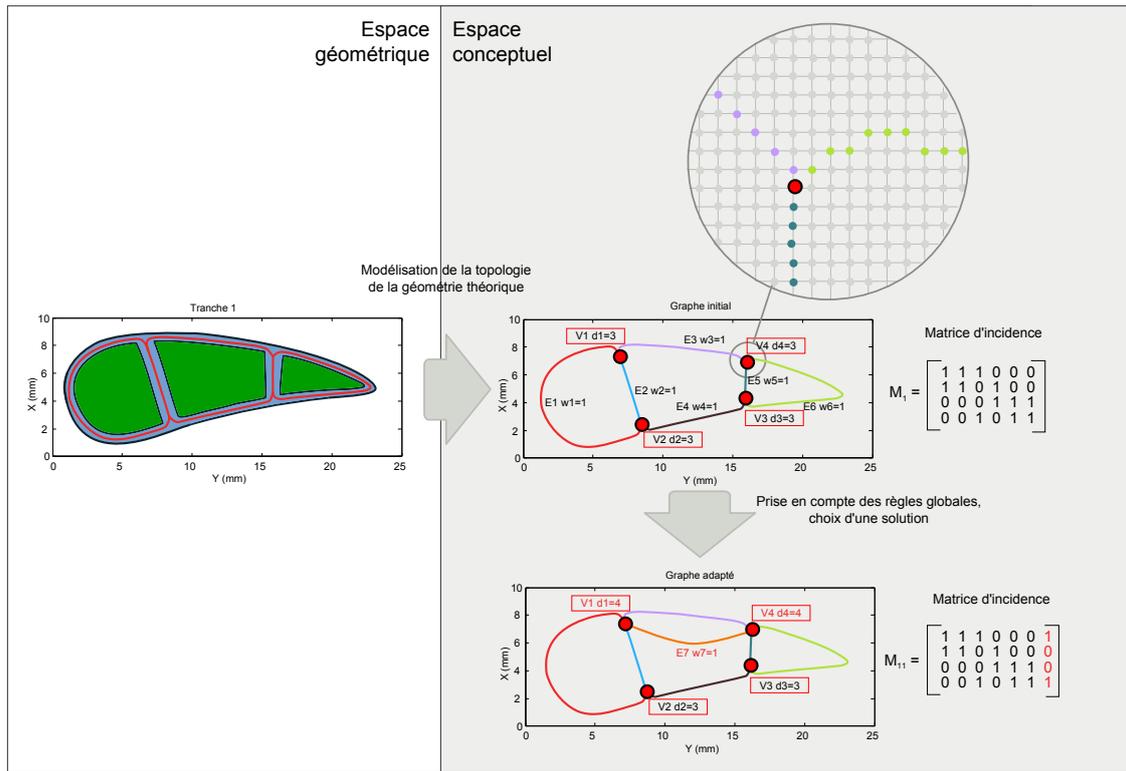


FIGURE 4.31 – Détermination et adaptation du modèle graphe de la trajectoire pour répondre aux règles métier 1 et 2.

Encore une fois, plusieurs solutions de parcours peuvent être envisageables, l'une d'entre elles est donc aléatoirement choisie. La simulation du processus de fabrication permettra, par la suite, de l'évaluer pour la comparer aux autres.

Une fois l'orientation du graphe effectuée, la géométrie de la portion de trajectoire correspondante est finalement décrite sous forme d'une C-spline. Les coordonnées des points de contrôle de cette dernière sont déterminées en deux temps :

- Pour s'assurer de générer correctement les surfaces extérieures de la pièce, les coordonnées x, y , dans le repère lié à la tranche sont, tout d'abord, calculées. Ce calcul se fait à partir du graphe orienté modélisant la topologie de la trajectoire et de la frontière des espaces non admissibles à laquelle peut être associé un intervalle de tolérance.
- Pour garantir, le plus possible, la continuité de la trajectoire, la coordonnée z des points de contrôle (suivant l'orientation de fabrication) est définie pour que la transition entre les tranches se fasse de manière continue.

Le recours aux splines cubiques permet de répondre aux règles métier locales en maîtrisant les courbures et en minimisant les points de discontinuité au niveau de la trajectoire. Cela permet également de définir finement les espaces entre les différentes portions de trajectoire dont la valeur, initialement fixée, correspond à un taux de recouvrement souhaité entre les dépôts.

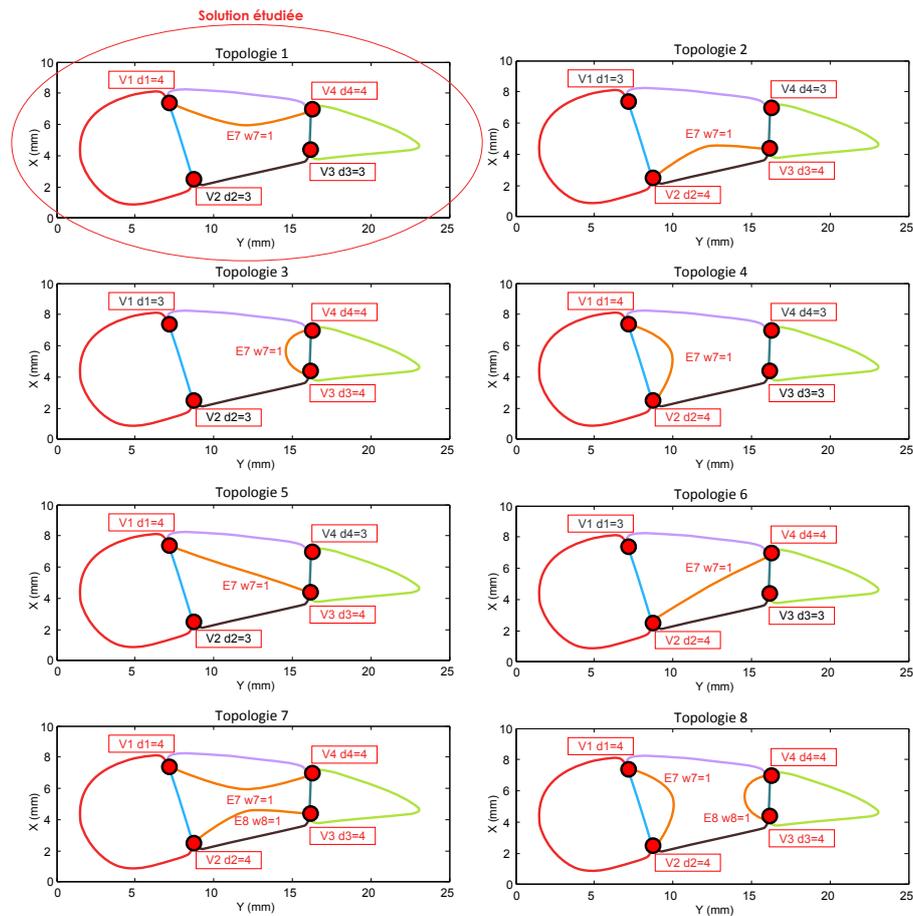


FIGURE 4.32 – Ensemble exhaustif des possibilités de graphes compatibles avec le domaine de conception et répondant aux règles procédé (Eulerien ou semi-Eulerien).

Illustration

La figure 4.33 présente l'application de la démarche dans le cas de la première tranche. La trajectoire est générée pour suivre au mieux la surface extérieure de la pale, pour cela, les points de contrôle sont définis à une distance constante de la frontière de la pièce, cette distance correspondant à la moitié de la largeur théorique d'un dépôt.

3.3.5 La trajectoire complète

L'ensemble des tranches sont étudiées les unes après les autres. La trajectoire complète est alors l'ensemble des portions de trajectoire mises bout à bout.

Illustration

Dans le cas de l'exemple de la pale, la figure 4.34 présente l'application du raisonnement pour définir la portion de trajectoire correspondant à la seconde tranche. Les contraintes définies précédemment ont évidemment été prises en compte, ainsi :

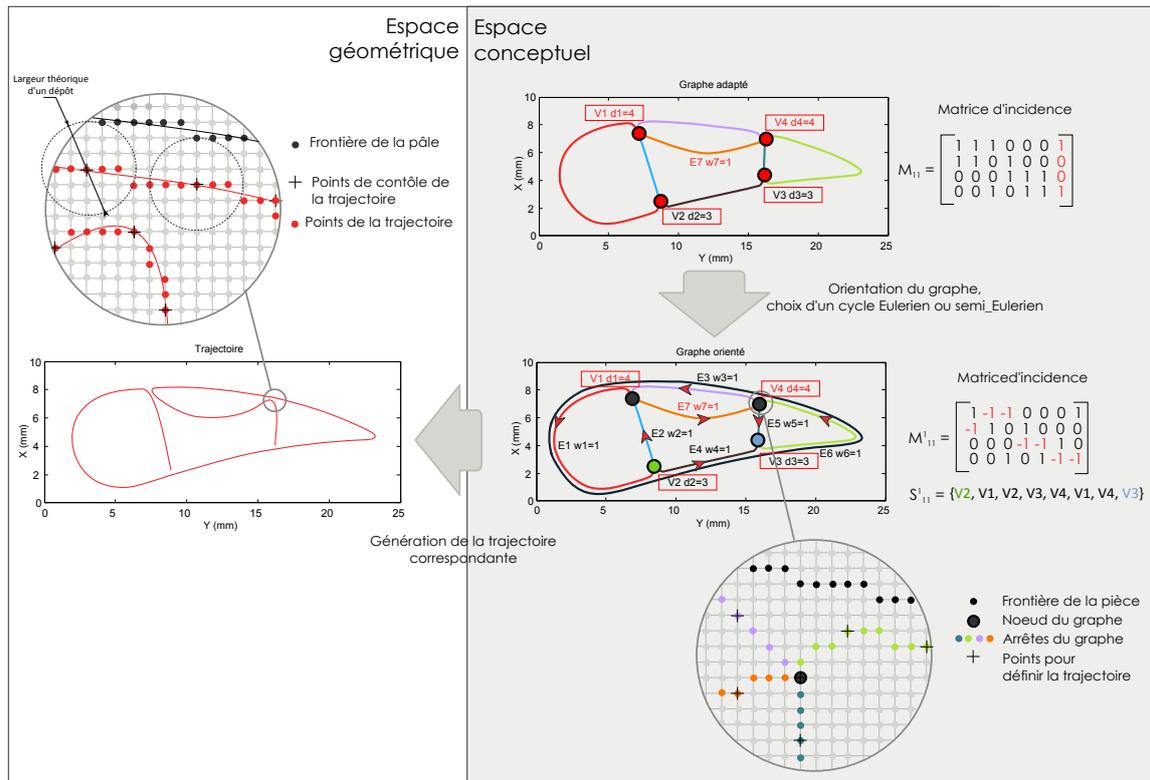


FIGURE 4.33 – Génération de la portion de trajectoire correspondant au choix de topologie effectué pour la première tranche étudiée.

- le graphe proposé contient le graphe établi pour la tranche précédente,
- les points d'entrée/sortie de la trajectoire sont en concordance avec ceux définis précédemment.

Le même raisonnement étant fait tranche après tranche, le résultat final est la définition d'une trajectoire en trois dimensions continue permettant de fabriquer la pièce étudiée (Fig. 4.35).

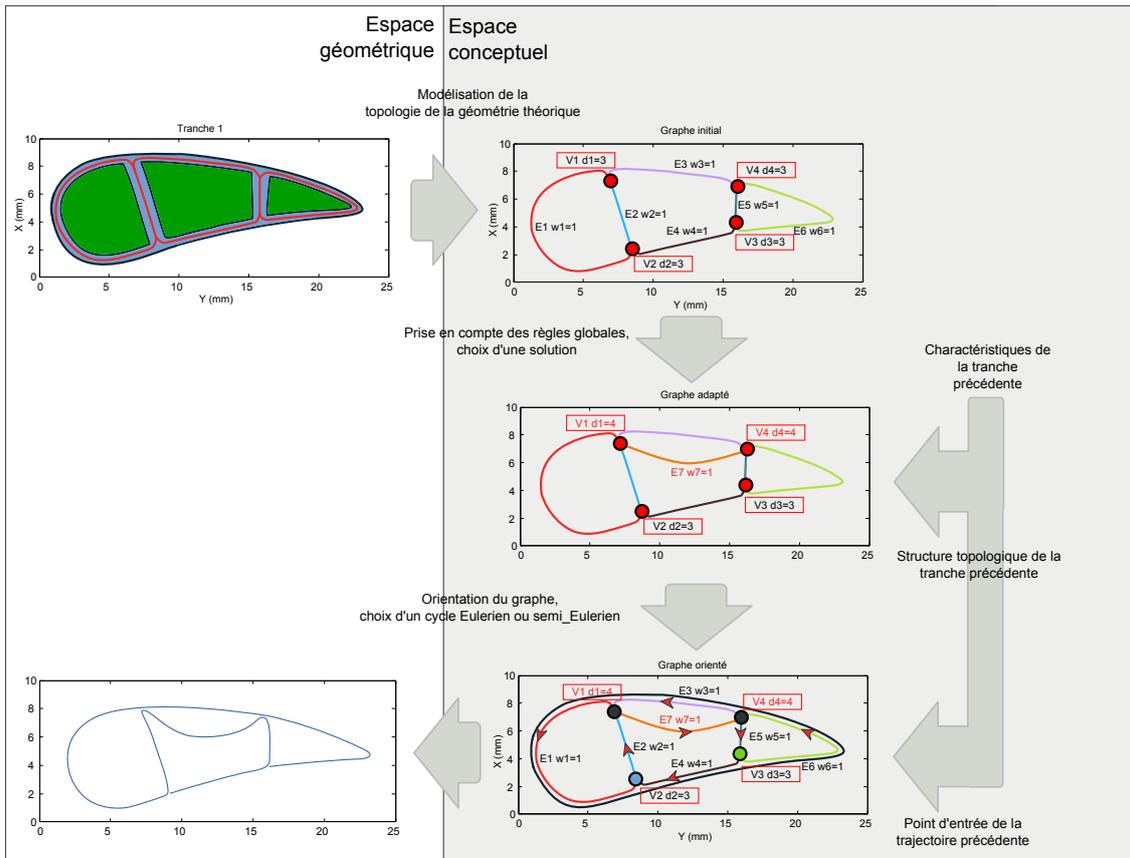


FIGURE 4.34 – Géométrie de la portion de trajectoire adapté correspondant à la seconde tranche étudiée permettant une continuité avec la première.

Cette trajectoire permet de respecter l'ensemble des règles métier définies précédemment, en effet :

- Vis à vis de la règle 1 : mis à part ceux correspondant à la dernière tranche étudiée, chaque point de la trajectoire admet un autre point lui servant de support. Ce dernier appartient à la portion de trajectoire inférieure à celle du point étudié du point de vue de l'orientation de fabrication. Ainsi, en chaque point, de la matière sera localement ajoutée à la pièce et non pas projetée dans le vide. La fabrication de la dernière tranche étudiée s'appuiera sur un substrat extérieur à la pièce qui devra ensuite être détaché.
- Vis à vis de la règle 2 : le nombre de points d'entrée/sortie de la trajectoire est minimisé. La génération d'une trajectoire continue permet, en effet, de n'en avoir que deux au total pour l'ensemble de la pale.
- Vis à vis de la règle 3 : il n'y a pas de point de discontinuité, ce résultat est obtenu grâce à l'utilisation de C-splines pour définir la trajectoire.
- Vis à vis de la règle 4 : le contrôle de la courbure, en tout point de la trajectoire, se fait également au travers de sa définition par C-splines.

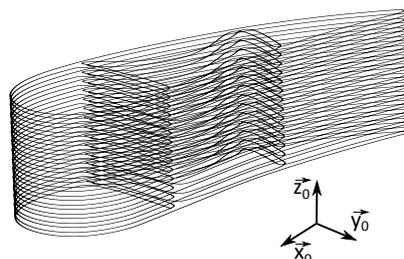


FIGURE 4.35 – Ensemble de la trajectoire continue correspondant aux choix de topologie et de sens de parcours effectués.

Ainsi, la fabricabilité de la pièce est garantie. La géométrie correspondante peut alors être simulée et par la suite évaluée d'un point de vue global.

3.3.6 Évaluation de la trajectoire sélectionnée

Le modèle de la machine CLAD mis en place à la section 2 du présent chapitre peut, une fois un choix de stratégie de trajectoire effectué, être appliqué pour estimer la géométrie correspondante de la pièce.

Dans le cas de notre exemple, la figure 4.36 présente l'estimation de la géométrie réelle de la pale lorsque la trajectoire précédemment définie est utilisée. Les valeurs données correspondent à la hauteur simulée de la pièce après un dépôt de dix couches. La géométrie obtenue permet d'estimer la trajectoire sélectionnée en termes de fabricabilité et de fonctionnalité.

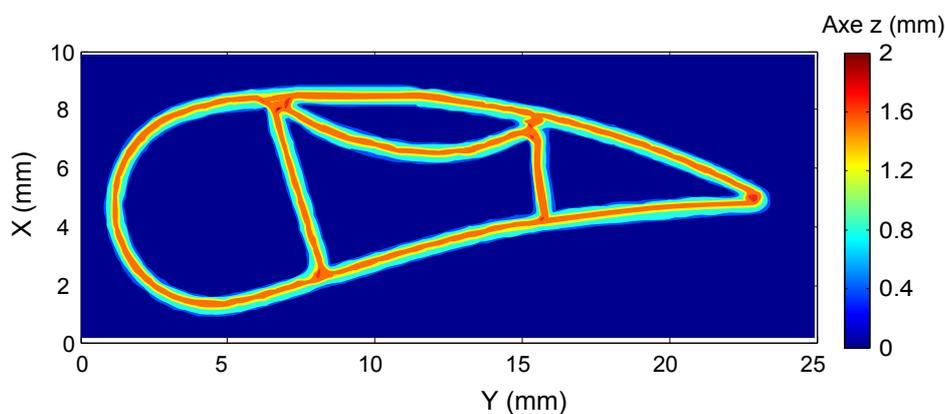


FIGURE 4.36 – Estimation de la géométrie réelle de la pale dans le cas où trajectoire présentée figure 4.35 est utilisée pour la fabriquer.

D'un point de vue purement fabricabilité, les indices de performance sont définis à partir des objectifs dictés par les règles métier utilisées. Ici, l'indice doit donc être lié à la variation de la hauteur du dépôt, nous prendrons comme indice la variation maximale dont la valeur reflète le nombre d'opérations de surfacage intermédiaires nécessaires pour réellement fabriquer la pièce.

Dans le cas de la trajectoire sélectionnée, cette dernière est de $0,22 \text{ mm}$ pour dix couches déposées. Nous considérons qu'une opération de surfacage est nécessaire à partir du moment où la distance buse-support varie, au cours de la fabrication, de plus de $1,5 \text{ mm}$. En effet, nous avons vu que cette distance correspondait à une forte variation de la puissance apportée à la pièce. Ainsi, avec la trajectoire choisie précédemment, une opération de surfacage serait nécessaire toutes les 68 couches. En comparaison, sans modification de la topologie de la trajectoire, celle-ci n'aurait pas pu être continue. En effet, les points d'entrée/sortie dans chaque couche auraient impliqué une variation maximale de hauteur de $0,51 \text{ mm}$ pour dix couches déposées, ce qui nécessite une opération de surfacage toutes les 29 couches.

La géométrie de la pièce ayant été simulée, il est aussi possible de l'évaluer d'un point de vue fonctionnel. Ainsi, à titre d'exemple, le profil de la pale, sa masse et sa résistance mécanique peuvent être analysés. Pour cela, la géométrie obtenue par simulation peut être exportée dans un logiciel CAO classique. La figure 4.37 présente le modèle CAO, après surfacage, de la géométrie de la pale correspondante à trajectoire définie.

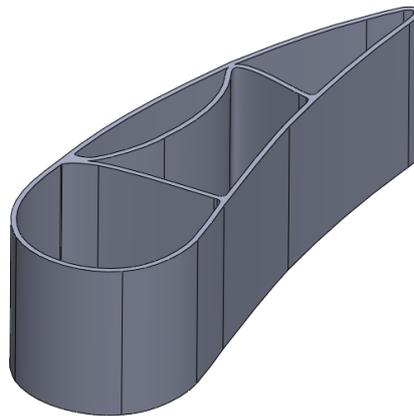


FIGURE 4.37 – Modèle CAO de la pale correspondant à trajectoire définie après surfacage.

C'est à partir de ces estimations que la trajectoire définie pourra finalement être comparée aux autres également possibles. En effet, nous avons vu que la solution proposée est le résultat de plusieurs choix que ce soit en termes de topologie ou de sens de parcours. Ainsi, chaque possibilité doit être étudiée pour, à la fin, déterminer, d'un point de vue global, la meilleure vis-à-vis du problème de conception initial.

Dans le cas de notre exemple, nous avons vu que huit topologies différentes étaient possibles. L'idée est, pour chacune de ces possibilités, d'étudier l'ensemble des trajectoires associées, de les évaluer et de sélectionner la meilleure. La figure 4.38 présente les résultats obtenus dans le cas d'une comparaison en termes de fabricabilité, avec la variation de hauteur et en termes de fonctionnalité, avec la masse de la pièce pour une hauteur de pièce de 10 mm .

Les indices de performance sont calculés pour l'ensemble des trajectoires possibles associées à chacune des topologies. Il apparaît rapidement que la masse finale de la pièce ne varie que très peu entre les différentes trajectoires possibles ainsi, seul l'indice lié à la fabricabilité nous servira pour identifier la meilleure trajectoire.

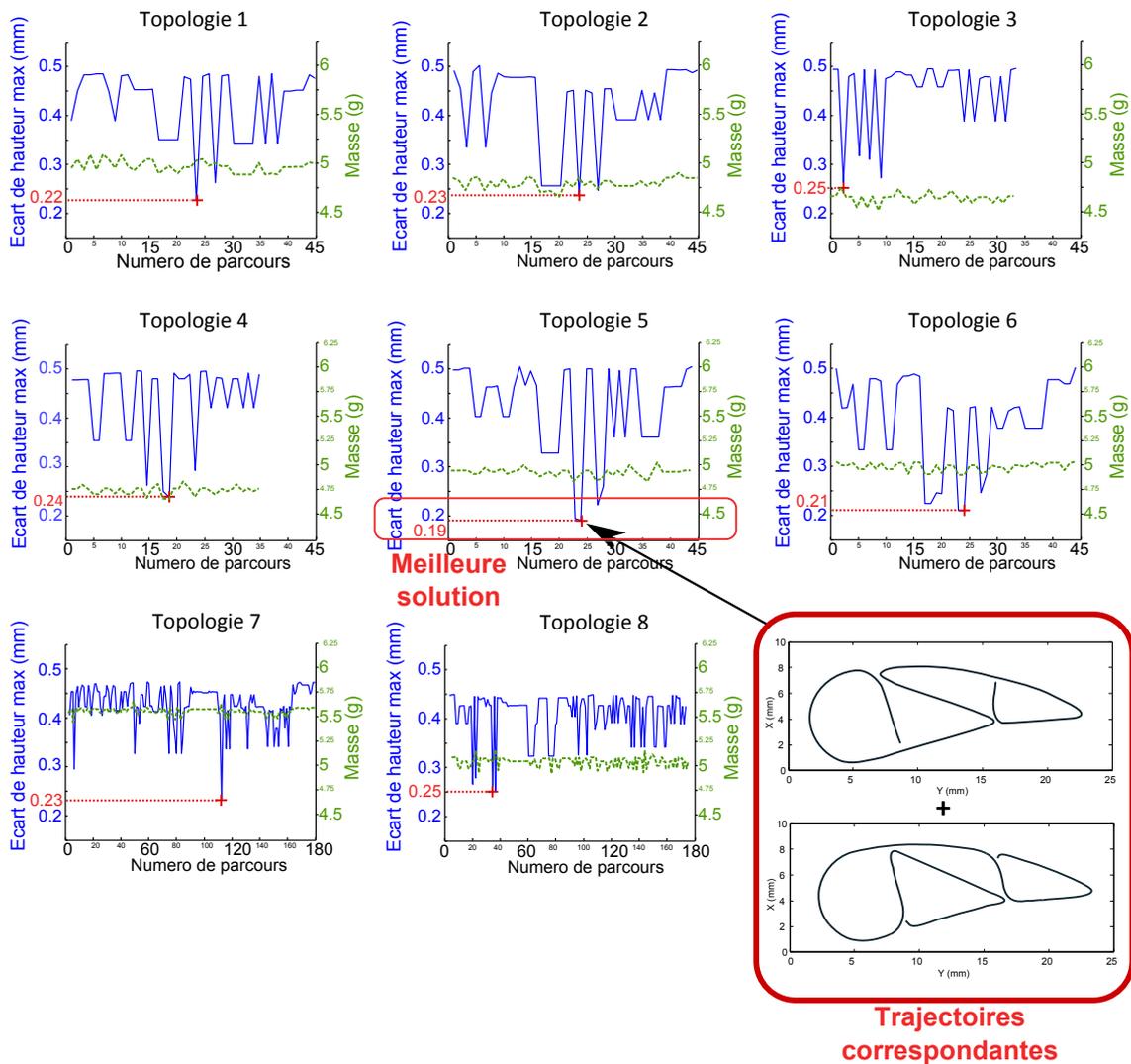


FIGURE 4.38 – Comparaison, en termes de fabricabilité, des différentes trajectoires possibles et identification de la meilleure.

La trajectoire correspondant à l'indice de fabricabilité le plus faible, pour chaque topologie, est identifiée (en rouge sur la figure 4.38), ce qui permet de déterminer, finalement, la meilleure trajectoire parmi l'ensemble des solutions possibles. Elle correspond, ici, à une variation maximale de la hauteur du dépôt de 0,19 mm pour dix couches et à une masse de 4,97 g pour 10 mm de hauteur de pièce. Le besoin d'une opération de surfacage est alors divisé par 2,7 par rapport à une trajectoire discontinue. Le modèle CAO correspondant de la pale ainsi optimisée d'un point de vue fabricabilité est présentée figure 4.39.

Finalement, notre méthodologie de génération de trajectoire associée au modèle du procédé que nous avons établi précédemment permet :

- d'obtenir un modèle géométrique final proche de la géométrie théorique, mais réaliste vis-à-vis du procédé de fabrication. Ainsi, dans le cas de l'exemple de la pale, la géométrie théorique comportait des parois dont les épaisseurs n'étaient pas compatibles

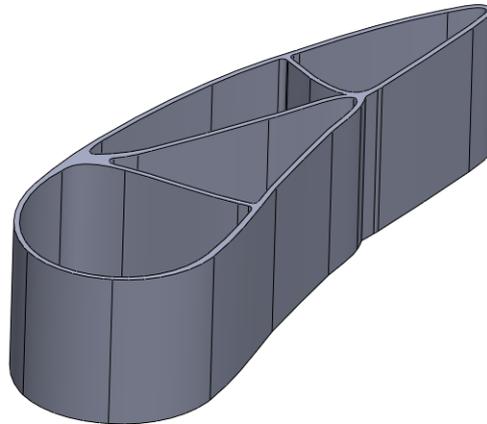


FIGURE 4.39 – Modèle CAO correspondant à la trajectoire optimale d'un point de vue fabricabilité.

avec le procédé CLAD à l'inverse de la géométrie finalement proposée.

- d'optimiser la trajectoire de fabrication et donc la géométrie finale d'un point de vue global. Dans le cas de la pale, pour le cahier des charges donné, la géométrie finalement proposée est la plus rapidement et la plus simplement fabricable avec la machine CLAD.

Bien qu'il soit encore possible de la compléter (par exemple en définissant de nouvelles règles métier), notre approche nous permet donc d'atteindre les objectifs que nous nous étions fixés.

3.4 Synthèse sur la méthode de choix des stratégies de trajectoire

Notre problématique était de pouvoir générer des trajectoires de fabrication en s'inspirant de la géométrie théorique des pièces tout en pouvant s'en écarter pour maximiser leur fabricabilité. L'analyse de l'état de l'art a permis d'identifier deux principaux verrous à cela :

- L'inexistence de méthode de génération de trajectoire permettant de s'affranchir d'un modèle géométrique initialement fixé. Les travaux existants se situant tous en aval du processus de conception, les générations de trajectoires proposées sont, en effet, toutes bornées par la géométrie des pièces déterminée en amont.
- L'inexistence de règles métier pour la génération de trajectoire dans le cas de pièces à parois minces. Il a pourtant été vu que ce type de pièces était l'une des principales applications de la fabrication par projection de poudres.

Nous avons donc proposé de lever ces verrous, en traitant le cas de la conception et de la fabrication de pièces à parois minces.

Concernant les règles métier, l'idée n'était pas de toutes les établir, mais d'en proposer suffisamment pour répondre à notre problématique. Il était, en particulier, nécessaire d'avoir des règles portant sur la topologie générale des trajectoires et d'autres portant

sur leur géométrie locale. Nos propositions portent essentiellement sur la variation de la hauteur du dépôt qui influence la distance entre la buse et la pièce au cours de la fabrication. Cette distance est, en effet, un paramètre influent dans le cas de la fabrication par projection de poudres.

Concernant la méthode de génération de trajectoire, notre proposition permet d'aborder le problème tout d'abord d'un point de vue conceptuel puis géométrique. Cela permet d'optimiser les trajectoires, non seulement en termes de géométrie, en modifiant classiquement par exemple les rayons de courbure ou la position relative entre les parcours, mais également en termes de topologie. De cette manière les trajectoires obtenues ne sont pas bornées par la géométrie théorique des pièces, mais seulement guidées. Dans le cas des pièces à parois minces, le modèle graphe de la trajectoire est en effet initialement défini à partir de cette géométrie théorique, pour être progressivement modifié en fonction des règles métier liées au procédé. Cette idée de trajectoire "sortant" de la géométrie théorique des pièces est centrale dans le cadre d'une approche DFAM, notre proposition méthodologique est donc une contribution innovante dans ce domaine.

4 Synthèse générale

4.1 Bilan

Dans notre méthodologie, la géométrie théorique d'une pièce est issue d'une optimisation globale de la répartition de la matière à l'intérieur du domaine de conception qui lui est associé. Cette géométrie n'est pas nécessairement fabricable en l'état. Nous avons vu qu'il est donc indispensable de déterminer une géométrie réaliste qui soit proche de cette géométrie théorique, et en même temps optimale d'un point de vue fabricabilité.

En ce qui concerne la fabrication additive, garantir et optimiser la fabricabilité d'une pièce nécessite la simulation complète de sa fabrication. Cela nécessite la mise en place :

- **d'un modèle multi-physique du procédé permettant de prédire de manière réaliste la géométrie des pièces à concevoir dans un délai compatible avec le processus de conception**
- **d'une méthode permettant, pour un problème de conception donné, de faire un choix de stratégie de trajectoire, à partir de règles métier associées au procédé, qui ne soit pas contraint, mais seulement guidé par la géométrie théorique correspondante.**

Dans ce chapitre, ces deux points ont été traités dans le **cas particulier de la fabrication par projection de poudres**. En effet, bien que l'approche développée soit applicable à l'ensemble des procédés additifs, chacun a ses propres caractéristiques qui nécessitent de développer des modèles et des règles métier spécifiques. La technologie de fabrication par projection de poudres, de par sa relative jeunesse et son fort potentiel en termes d'application industrielle, nous a semblé particulièrement adaptée pour faire l'objet d'une étude plus poussée.

Concernant la proposition du modèle du procédé, les phénomènes mis en jeu étant complexes et couplés, il existe aujourd'hui une très forte dualité entre la qualité des résultats et le temps de calcul nécessaire à leur obtention. Dans ce contexte, **le modèle que nous proposons**, bien que fortement simplifié, **permet d'avoir un premier outil pour estimer le choix d'une stratégie de trajectoire parmi plusieurs**. Il permet, entre autres, d'estimer la variation de la hauteur du dépôt et donc celle de la distance entre la pièce et la buse de la machine au cours de la fabrication, paramètre ayant une forte influence sur la qualité des pièces fabriquées.

Concernant la méthode de génération de trajectoire, **notre proposition permet d'aborder le problème tout d'abord d'un point de vue conceptuel puis géométrique**. Cela permet d'optimiser les trajectoires, non seulement en termes de géométrie, mais également en termes de topologie. Pour cela des règles métier associées à la fabrication par projection de poudres pour la génération de trajectoire dans le cas de pièce à parois minces ont également été proposées.

L'ensemble permet de proposer une géométrie de pièce réaliste, à la fois proche de la géométrie théorique, garantie d'être fabricable et optimale vis-à-vis du problème initialement

fixé. L'approche que nous avons mise en place permet, en effet, de proposer des trajectoires de fabrication innovantes qui peuvent "sortir", si nécessaire, de la géométrie théorique des pièces pour respecter au mieux les règles métier liées au procédé. Grâce au modèle du procédé proposé, la performance, aussi bien en termes de fabricabilité que de fonctionnalité, de chacune de ces trajectoires est ensuite estimée. Ce qui permet, finalement, de proposer la géométrie de la pièce correspondant à la trajectoire optimale.

Chapitre 5

Exemples applicatifs

Afin de valider dans des cas concrets l'utilisation de notre méthodologie de conception pour la fabrication additive, nous l'avons appliquée à deux exemples issus de l'industrie.

Dans la première partie, nous étudierons la définition géométrique d'une turbine. L'étude se place après la définition des surfaces fonctionnelles et permet de proposer une géométrie optimisée pour la fabrication par projection de poudres. Cette exemple permettra en particulier d'illustrer nos travaux portant sur l'optimisation des trajectoires de fabrication pour ce procédé.

La seconde partie, portera sur la reconception d'une pièce initialement conçue par la société Airbus pour la fixation de câblage dans des avions. L'idée est d'illustrer le caractère générique de notre approche méthodologique en l'appliquant à un autre procédé que la projection de poudres (ici le dépôt de fil fondu).

En plus d'illustrer notre méthodologie, ces exemples permettront de montrer les intérêts que peut apporter l'utilisation de la fabrication additive pour l'industrie aéronautique.

1 Conception d'une turbine

1.1 Problème initiale

Le cahier des charges fonctionnel

Le problème de conception concerne ici une turbine en acier inoxydable 316L dont les surfaces fonctionnelles, les spécifications associées ainsi que les espaces admissibles ont été préétablis (Fig. 5.1).

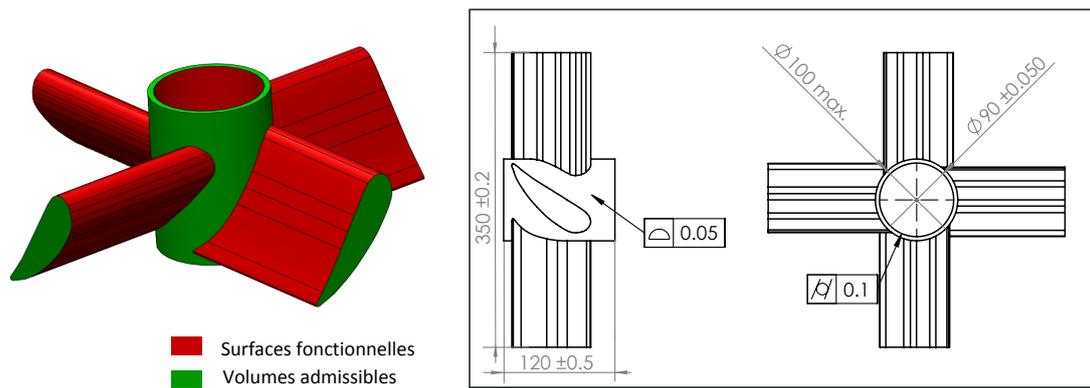


FIGURE 5.1 – Spécification locales issues du cahier des charges fonctionnel de la turbine étudiée.

Outre la contrainte liée aux spécifications fonctionnelles, la géométrie finale doit garantir la tenue mécanique de la pièce sous chargement. Cette contrainte est caractérisée par la résistance élastique Re du matériau. Le contexte aéronautique de l'étude implique, de plus, la nécessité de minimiser la masse de la turbine.

La machine de production

Le procédé choisi pour fabriquer la turbine est la machine CLAD, utilisant la technologie de projection de poudres et dont les caractéristiques principales sont :

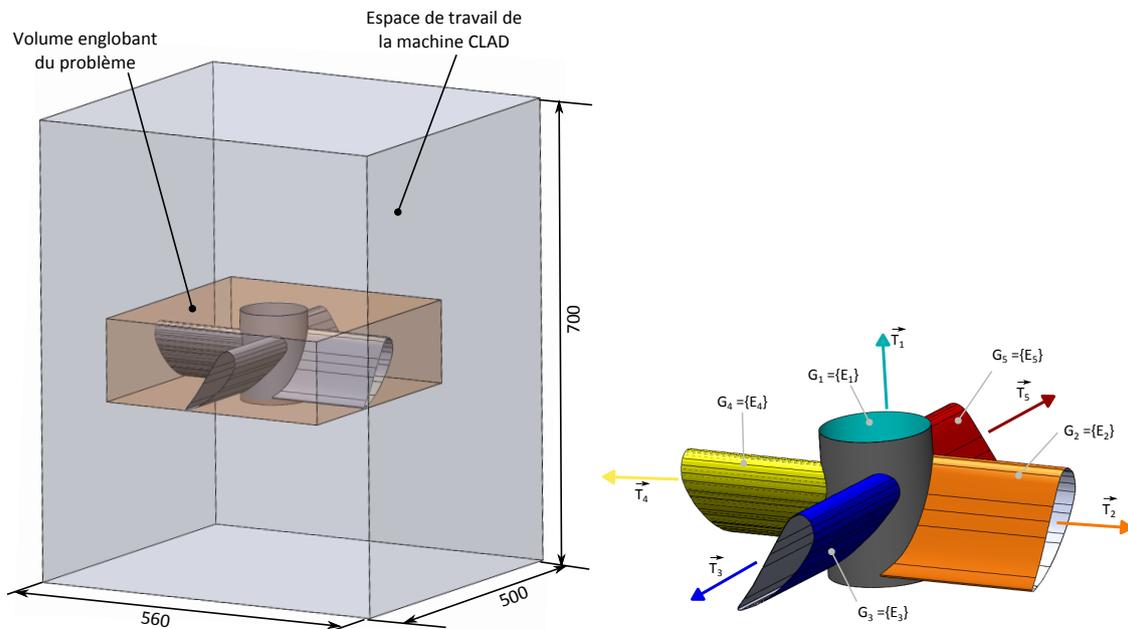
- Une cinématique 5 axes.
- Un espace de travail de $500 \times 560 \times 700 \text{ mm}^3$.
- Une contrainte d'accessibilité pour la tête de projection, assimilable à un cylindre de diamètre 60 mm .
- Une tolérance théorique de fabrication de $\pm 0,1 \text{ mm}$ dans l'ensemble des direction.

La machine CLAD contient également une broche d'usinage, ce qui permet d'effectuer l'opération de parachèvement directement après l'opération d'ajout de matière. Nous considérerons que cette opération nécessite une surépaisseur minimale s_{mini} de $0,2 \text{ mm}$.

1.2 Définition du domaine de conception

Le problème comporte cinq surfaces fonctionnelles. C'est à partir de ces surfaces que le volume englobant du problème est déterminé. Ce dernier peut être contenu dans l'espace de travail de la machine CLAD, ce qui garantit que la turbine peut être réalisée en une seule pièce (Fig.5.2(a)). De plus, de part ses dimensions, son positionnement dans la machine, lors de sa fabrication, n'est pas contraint.

À partir de ce constat, les orientations de fabrication à privilégier pour chaque surface fonctionnelle sont déterminées. Les orientations ont été déterminées pour minimiser le besoin de support et ainsi minimiser les contraintes procédés qui impactent sur la masse finale de la pièce. Le résultat est cinq orientations de fabrication différentes, il n'est donc pas possible de regrouper les surfaces fonctionnelles. À chacune d'elles, correspond donc un groupe G_i différent. Finalement, le problème comporte cinq groupes d'entités fonctionnelles comportant chacun une seule surface fonctionnelle (Fig. 5.2(b)). La contrainte d'accessibilité de la machine CLAD impose que le groupe G_1 soit réalisé en premier et serve de support pour la fabrication des autres groupes.



(a) Comparaison du volume englobant du problème avec l'espace de travail de la machine CLAD. (b) Orientations de fabrication sélectionnées.

FIGURE 5.2 – Analyse des orientations de fabrications possibles.

Pour chaque groupe, le domaine de conception associé est déterminé. Quelle que soit la surface fonctionnelle, les spécifications associées ne sont pas compatibles avec la tolérance de fabrication annoncée de la machine CLAD, une opération de parachèvement est donc nécessaire. De plus, pour garantir une rigidité minimale à la pièce pendant et après le parachèvement, son épaisseur finale minimale est fixée à $0,5 \text{ mm}$ ($e_{\text{mini}} \geq 0,5$). Ainsi un volume obligatoire est associé à chaque surface fonctionnelle du problème. Leur épaisseur est la même et correspond à deux dépôts parallèles avec $ep_i = 0,3 \text{ mm}$ et $em_i = 0,74 \text{ mm}$.

Les volumes admissibles, englobant les volumes obligatoires de chaque groupe sont alors déterminés. L'ensemble forme finalement le domaine de conception du problème présenté figure 5.3.

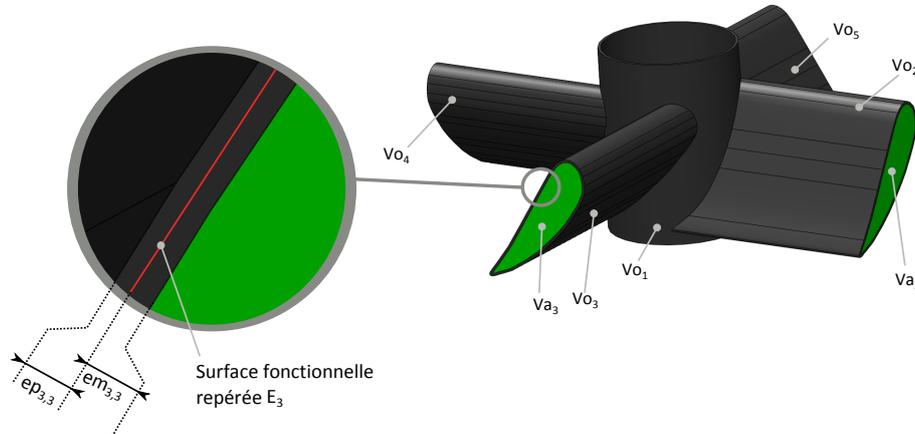


FIGURE 5.3 – Volume de conception associé au problème étudié.

1.3 Définition de la géométrie théorique

Concernant l'optimisation géométrique de la pièce, seuls les volumes internes des pales de la turbines sont optimisables car autorisées. Le problème étant symétrique, l'analyse d'une seule pale est nécessaire. De plus, dans un souci de simplification des calculs, seule la section de la pale fera l'objet d'une optimisation 2D. Cette simplification sous entend que l'on néglige l'effet des moments de flexion et de torsion qui s'exercent sur la pale pour n'étudier que celui des efforts. Cette hypothèse étant relativement grossière, il sera nécessaire de vérifier la tenue mécanique des géométries finalement proposées. Le chargement appliquée à la pale est présentée figure 5.4(a), il correspond à une pression homogène axiale de $0,5 \text{ MPa}$ en entrée de la turbine. En ce qui concerne le volume obligatoire, pour dimensionner correctement la pale, la partie correspondant à la surépaisseur d'usinage (ep_i) n'est pas prise en compte.

De la même manière que pour l'exemple du chapitre 2 de ce manuscrit, l'optimisation est réalisée de manière séquentielle en fixant un ratio de volume objectif qui est augmenté tant que la tenue mécanique de la pale n'est pas respectée. En partant de 5 % et en ne considérant que les zones dont la densité est supérieure à 50%, le ratio ainsi déterminé est 8%, la géométrie correspondante est présentée figure 5.4(b). Elle correspond à une structure interne complexe dont les parois ont une épaisseur comprise entre $0,23 \text{ mm}$ et $0,8 \text{ mm}$. La dimension minimale fabricable par la machine CLAD étant de $0,52 \text{ mm}$, la géométrie théorique obtenue est considérée comme une géométrie à épaisseurs fines. Nous allons donc pouvoir utiliser la méthode de génération de trajectoire mis en place dans le chapitre 4 de ce manuscrit pour déterminer les différentes géométries réalistes correspondantes et par la suite choisir la plus adaptée vis à vis du problème.

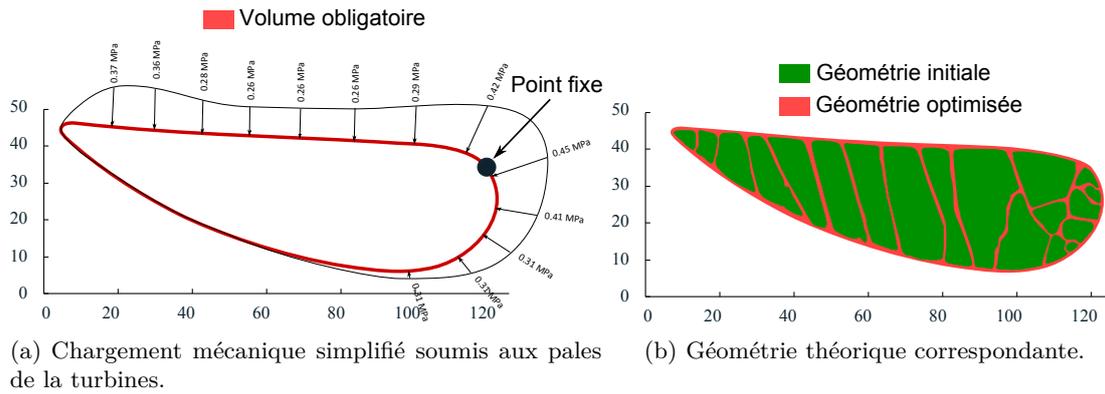


FIGURE 5.4 – Données et résultats correspondant à la définition de la géométrie théorique des pâles.

1.4 Définition de la géométrie réaliste

Pour cette étape, il est nécessaire de déterminer les trajectoires de fabrication à utiliser pour fabriquer l'ensemble de la turbine, c'est-à-dire, la portée cylindrique et les quatre pales. Pour chaque groupe G_i , la méthode de génération de trajectoire est appliquée. La figure 5.5 présente les différentes étapes de la génération pour la portée cylindrique d'un côté et les pales de l'autre.

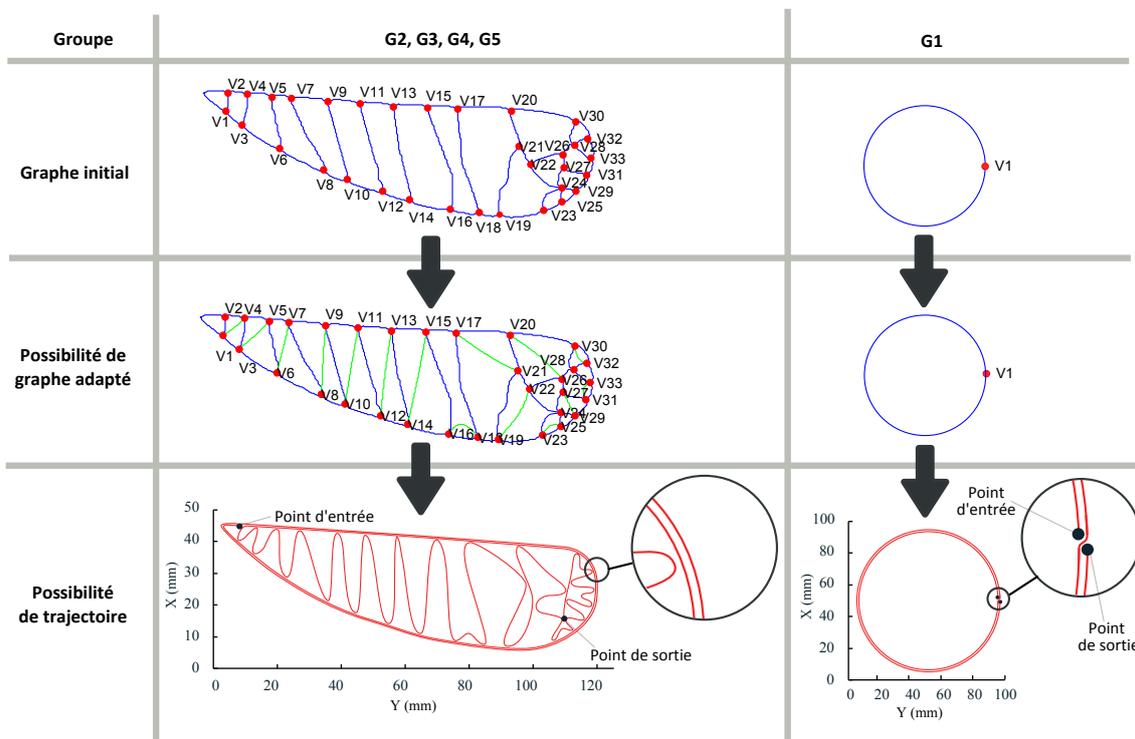


FIGURE 5.5 – Détermination d'une série possible de trajectoires de fabrication pour réaliser la turbine.

Le modèle graphe initial de la trajectoire est tout d'abord déterminé. Dans le cas des

pales, le graphe doit être modifié; une solution est donc proposée. À partir du graphe adapté, une trajectoire est générée et la simulation du processus de fabrication peut être réalisée.

La simulation permet d'évaluer la géométrie correspondant aux choix de trajectoire effectués vis-à-vis des objectifs du problème initial. Il s'agit donc, ici, d'évaluer la masse finale de la turbine, estimer sa fabricabilité et vérifier sa tenue mécanique.

Concernant la fabricabilité, il s'agit d'estimer, pour chaque groupe G_i , la variation de hauteur de dépôt apparaissant au cours de la fabrication. La figure 5.6 montre le résultat de cette simulation pour la fabrication des pales (valeurs données pour 10 couches). La variation maximale est ici de $0,09 \text{ mm}$ ce qui correspond à un besoin d'une opération de surfaçage toutes les 166 couches, soit tous les 273 mm . Ainsi les pales peuvent théoriquement être fabriquées sans aucune opération intermédiaire de surfaçage.

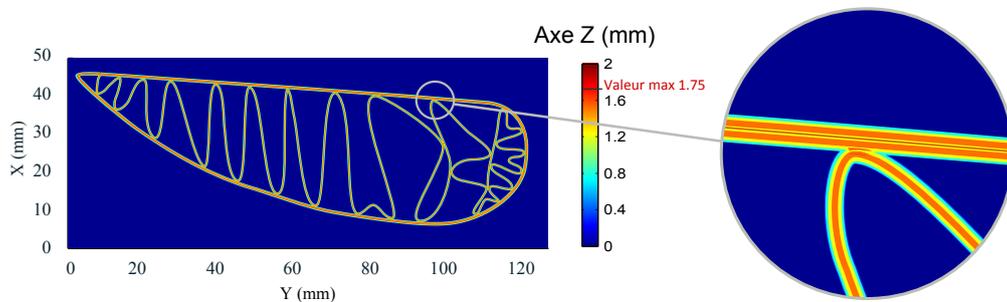


FIGURE 5.6 – Simulation de la géométrie d'une pale correspondant à un dépôt de dix couches de matière.

Dans le cas des trajectoires sélectionnées, la masse finale de la turbine est $4,21 \text{ kg}$ (à comparer avec la masse de la turbine pleine qui est $13,82 \text{ kg}$). Sa tenue mécanique est vérifiée grâce à une simulation par éléments finis.

1.5 Résultat

La géométrie de turbine ainsi obtenue, semble donc non seulement adaptée d'un point de vue de la fabrication, mais également intéressante d'un point de vue de la masse. La comparaison de cette géométrie avec celles correspondantes aux autres possibilités de trajectoire a cependant permis de déterminer LA meilleure trajectoire vis-à-vis de nos critères. En effet, la géométrie présentée figure 5.7, en plus de tenir mécaniquement et de ne pas nécessiter d'opérations intermédiaires de surfaçage, permet de réduire la masse de la turbine parachevée à $3,64 \text{ kg}$ soit une réduction de $73,6 \%$ par rapport à une turbine "pleine" qui aurait été fabriquée par usinage. Une portion de la trajectoire correspondante pour la fabrication des pales est également présentée sur cette figure.

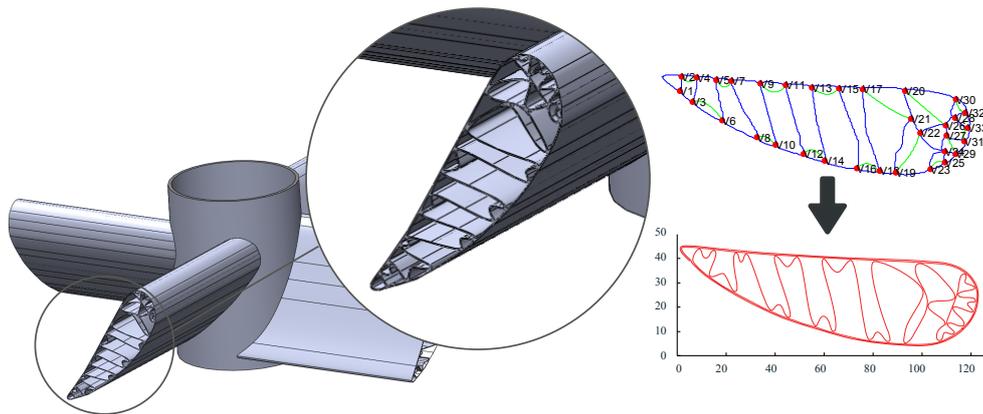


FIGURE 5.7 – Géométrie optimale de la turbine vis-à-vis des objectifs fixés.

1.6 Conclusion

Finalement, dans le cas de la turbine étudiée, notre méthodologie permet de proposer une géométrie de pièce répondant au double objectif que nous nous étions fixé. Elle permet, en effet, de maximiser sa fabricabilité (en supprimant le besoin d'opérations intermédiaires de surfacage) tout en répondant à l'objectif fonctionnel qui était de minimiser la masse. Ainsi, les contraintes et les opportunités offertes par la fabrication par projection de poudres sont prises en compte. En particulier, grâce aux possibilités géométriques offertes, la conception finalement retenue permet un gain de masse de plus de 70 % par rapport à une conception qui aurait été adaptée aux procédés de fabrication par enlèvement de matière, et ce tout en garantissant sa tenue mécanique.

2 Système de fixation de câblage de chez Airbus

2.1 Présentation du problème

L'assemblage étudié est actuellement conçu et réalisé par Airbus. Sa fonction est le maintien du câblage dans le cockpit de l'avion. Il est présenté figure 5.8(a). Initialement composé de pièces en aluminium extrudé, il est maintenant constitué de pièces fabriquées par ajout de matière en résine ULTEM avec la machine Fortus 900mc de chez Stratasys (Fig. 5.8(b)) qui exploite la technologie de dépôt de fil (FDM). Malgré le passage à une fabrication par ajout de matière, la conception du système étudiée n'a pas évolué. Nous allons, dans cette section, appliquer notre méthodologie de conception pour proposer une nouvelle géométrie plus adaptée au procédé nouvellement utilisé. Nous verrons en particulier comment notre méthodologie permet de proposer une nouvelle géométrie du produit, peu intuitive, mais néanmoins optimisée vis à vis du problème posé.

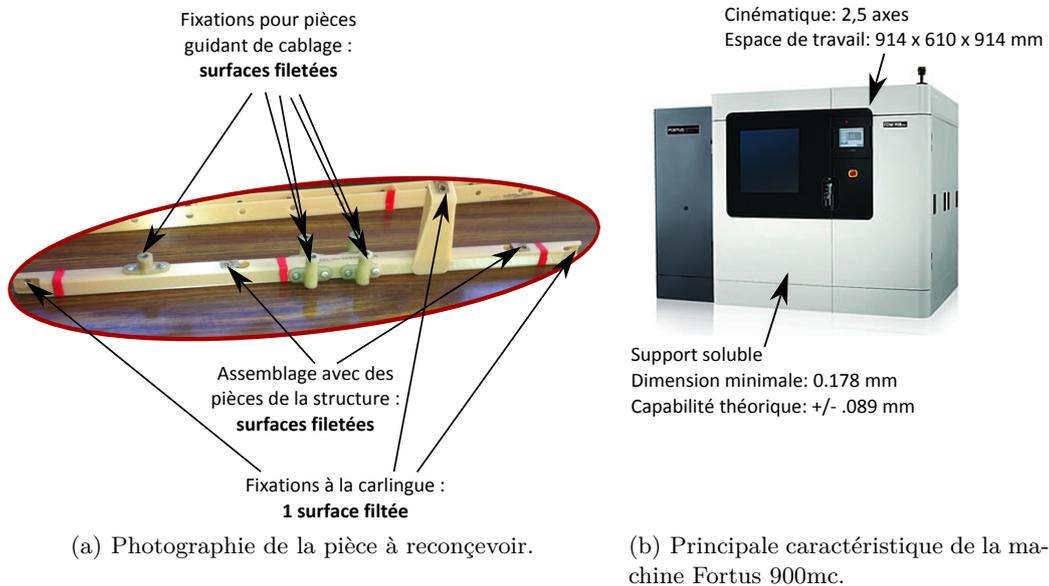


FIGURE 5.8 – Les données initiales du problème.

2.2 Définition du domaine de conception

2.2.1 Les entités fonctionnelles

Les entités fonctionnelles sont ici limitées à des surfaces fonctionnelles directement déduites du produit étudié. Elles sont représentées figure 5.9 et se composent de 8 surfaces filetées (de diamètre 5 mm) et 12 surfaces planes.

Une première analyse géométrique permet de constater que l'ensemble de ces surfaces fonctionnelles peuvent appartenir à une même pièce directement fabriquée sans assemblage, ce qui n'est aujourd'hui pas le cas malgré un espace de travail de la machine suffisant.

Par la suite, à partir de ces surfaces fonctionnelles, un choix d'orientation de fabrication est fait. La machine ayant une cinématique 2,5 axes, une seule orientation de fabrication

peut être sélectionnée, elle correspond à l'orientation de posage de la pièce dans la machine. Elle est ici choisie parallèle aux filetages. Le but est double :

- Maximiser leur qualité géométrique pour éviter le recours à des inserts à assembler après la fabrication de la pièce (visibles sur la figure 5.8(a)).
- Minimiser le temps de parachèvement. En effet, le support nécessaire à l'obtention de surfaces en porte-à-faux vis-à-vis de l'orientation de fabrication est dissout, après la fabrication de la pièce, dans un solvant. Le temps nécessaire pour cette opération est fortement dépend de la surface du support en contact avec le solvant. Ainsi dissoudre du support dans un cylindre étroit n'est pas conseillé.

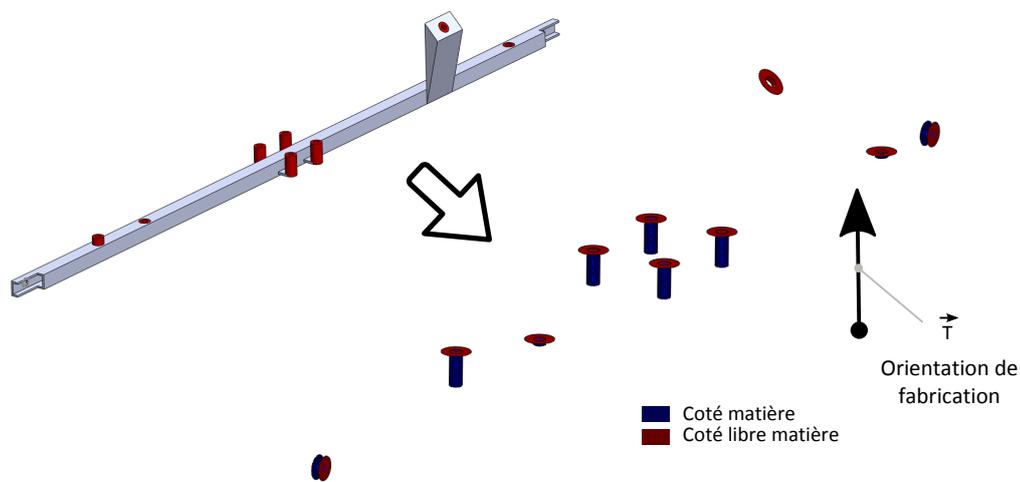


FIGURE 5.9 – Surfaces fonctionnelles du problème.

2.2.2 Définition des volumes obligatoires

Les volumes obligatoires sont définis pour s'assurer d'atteindre les spécifications fonctionnelles locales attendues du produit. Représentés figure 5.10, ils correspondent aux espaces du domaine de conception où il devra nécessairement y avoir de la matière.

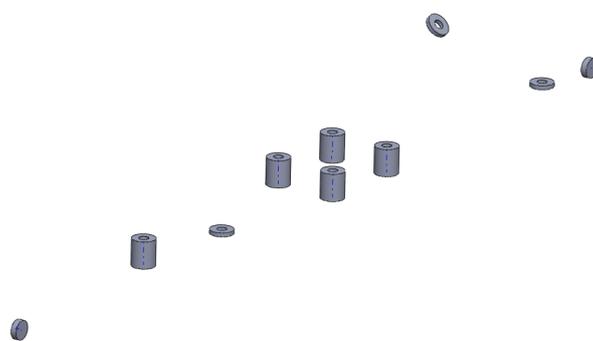


FIGURE 5.10 – Définition des volumes obligatoires.

2.2.3 Définition du volume admissible

Les volumes admissibles correspondent à l'intersection des espaces autorisés par le cahier des charges avec les espaces accessibles par la machine suivant l'orientation de fabrication choisie. La figure 5.11 présente le volume admissible dans le cas présent, il est défini à partir :

- Des zones de passage des câbles.
- Des contraintes d'assemblage avec la carlingue.
- Des contraintes d'assemblage les autres pièces du système de fixation du câblage.

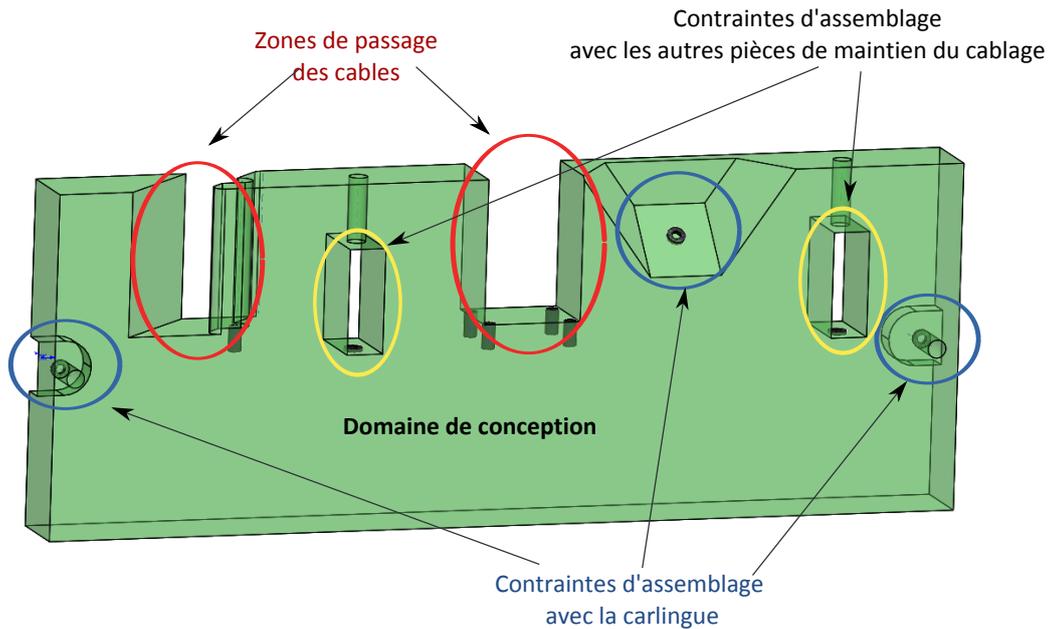


FIGURE 5.11 – Définition du volume admissible.

2.3 Optimisation fonctionnelle

Dans le cas présent, les objectifs fonctionnels sont de minimiser la déformation et la masse de la pièce tout en garantissant sa tenue mécanique. L'optimisation est effectuée avec le logiciel *Optistruct* via l'interface *Inspire* en utilisant les caractéristiques mécaniques de l'ULTEM 9085 données au tableau 5.1.

Propriété	Valeur
Résistance élastique Re (kPa)	21,9
Coefficient de poisson	0,36
Module d'Young (MPa)	3,2
Masse volumique ($kg.m^{-3}$)	1500

TABLEAU 5.1 – Propriétés mécaniques du l'ULTEM 9085.

La rigidité de la pièce est fixée comme objectif, elle est définie à partir de la compliance

de chaque élément de discrétisation du domaine de conception qui est calculée en fonction de sa densité grâce à l'équation suivante :

$$c(d_i) = U^T K U = \sum_{i=1}^N u^T k_i u \quad (5.1)$$

Avec :

$$k_i = d_i^p * E, \quad p \geq 1, \quad 0 > d_i \geq 1$$

Où U est le déplacement global, K la matrice de raideur globale, u est le déplacement élémentaire, k_i la matrice de raideur élémentaire d_i la densité du $i^{\text{ème}}$ élément, E le module d'Young du matériau, N le nombre d'éléments et p le coefficient de pénalisation permettant favoriser les densités proches de 0 ou de 1.

La masse de la pièce est minimisée en fixant un paramètre a représentant le rapport du volume de la pièce optimisée par rapport à celui du domaine de conception. a est initialement choisi égale à 5%, une première optimisation topologique est alors effectuée, la tenue mécanique de la géométrie obtenue est vérifiée, si celle-ci n'est pas respectée, a est augmenté et une nouvelle optimisation topologique est effectuée et ainsi de suite jusqu'à ce que ce soit le cas. Le volume de la pièce optimisée est calculé à partir de la relation suivante :

$$V = \sum_{i=1}^N d_i * v \quad (5.2)$$

Où v est le volume d'un élément. La masse de la pièce est alors calculée à partir de la masse volumique de l'ULTEM 9085. Le résultat est présenté figure 5.12. Il correspond à une masse de 228 g.

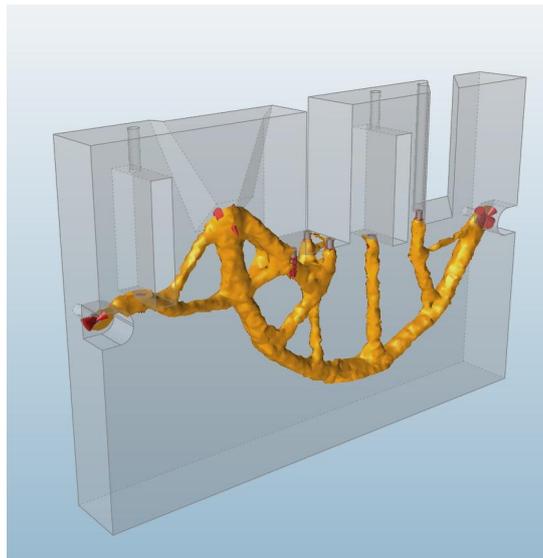
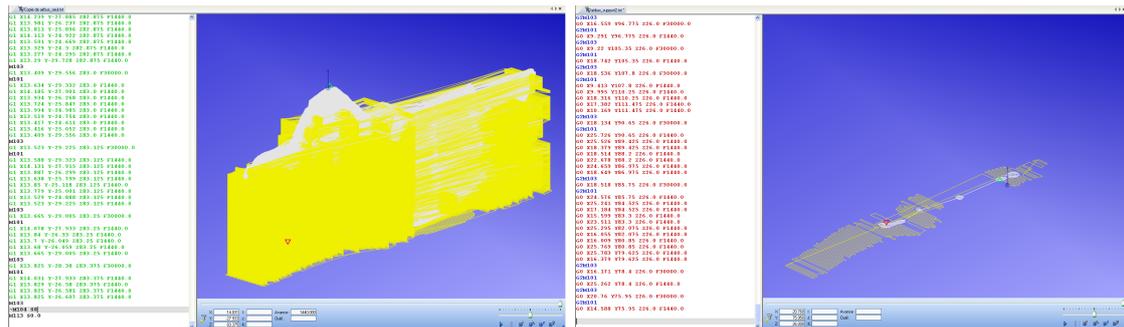


FIGURE 5.12 – Géométrie théorique de la pièce résultant de l'optimisation topologique.

2.4 Génération de trajectoire

Cette étape nécessite normalement la prise en compte de règles métier portant sur la génération de trajectoire et l'établissement d'un modèle multi-physique du processus de fabrication. N'ayant pas particulièrement travaillé sur la technologie de dépôt de fil fondu, nous nous limiterons ici aux trajectoires usuellement utilisées, la géométrie de la pièce sera alors estimée en considérant la section du fil constante. La figure 5.13 présente la trajectoire choisie (balayage avec offset) ainsi que le programme de fabrication associé.



(a) Trajectoire complète.

(b) Extrait de la trajectoire correspondant à la 152^{ème} couche.

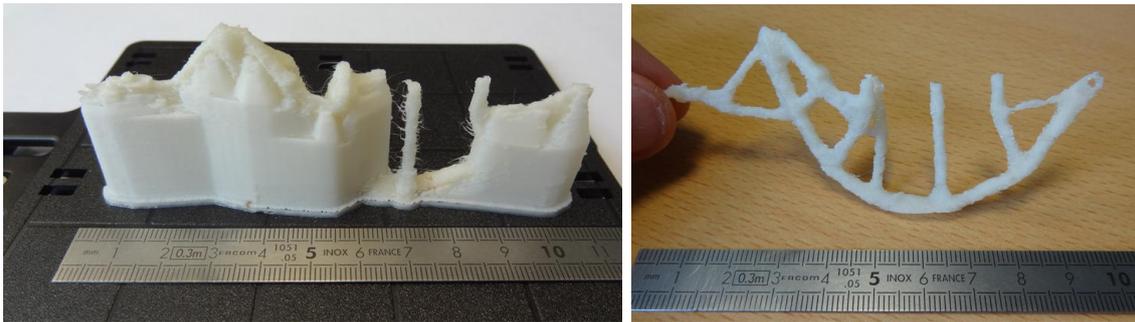
FIGURE 5.13 – Trajectoire sélectionnée pour la fabrication de la pièce étudiée : en blanc la partie correspondant à la pièce et en jaune la partie correspondant au support.

2.5 Résultats et conclusion

La méthodologie mise en place permet d'obtenir, pour le cahier des charges donné, une géométrie de pièce optimisée vis-à-vis des besoins fonctionnels et du procédé. Ainsi, la géométrie déterminée ici n'aurait certainement pas été intuitivement proposée, c'est pourtant elle qui répond le mieux aux exigences initialement fixées. Son optimisation est encadrée par un choix adapté d'orientation de fabrication et sa géométrie est finalement précisément définie à partir d'un choix de trajectoire. En plus de minimiser le nombre de pièces dans les assemblages, la méthodologie permet ainsi d'assurer la fabricabilité de la géométrie proposée en intégrant les stratégies de fabrication en amont dans le processus de conception. La pièce traitée a d'ailleurs été fabriquée à l'échelle 1/5 avec la machine MOJO qui se diffère principalement de la Fortus 900mc par un espace de travail plus faible ($120*120*120 \text{ mm}^3$) (Fig. 5.14).

Les travaux portant sur la re-conception de ce produit sont à poursuivre. Nous avons voulu démontrer, à travers cet exemple, le caractère générique de l'approche que nous proposons, il reste maintenant à travailler sur le procédé de dépôt de fil pour déterminer des règles métiers et un modèle plus réaliste permettant de garantir toujours plus la fabricabilité des pièces conçues.

D'autre part, l'étude présentée se limite aux frontières de l'assemblage existante. Or il est assemblée avec un certain nombre d'autres pièces pour réaliser complètement la fonction "maintenir le câblage dans le cockpit". La méthodologie pourrait donc être appliquée à l'ensemble du cahier des charges lié à cette fonction, l'optimisation serait alors globale et permettrait certainement de minimiser encore le nombre de pièces nécessaires.



(a) La pièce avec son support.

(b) La pièce finale après parachèvement.

FIGURE 5.14 – Pièce fabriquée à l'échelle 1/5 avec la machine MOJO de chez Stratasys.

Chapitre 6

Synthèse générale et perspectives

L'objectif de nos travaux est de proposer une méthodologie d'aide à la conception orientée fabrication additive qui permette à la fois de tirer profit des opportunités offertes par cette famille de procédés et de maximiser la fabricabilité des pièces proposées. Les chapitres précédents ont permis d'exposer le contexte associé, d'identifier les verrous scientifiques et techniques et de détailler les propositions faites pour y répondre. Nous avons ainsi défini et décrit la méthodologie générale de conception, le modèle du processus de fabrication permettant sa simulation et notre approche originale pour la génération de trajectoires de fabrication. Ce dernier chapitre a pour rôle de **synthétiser le travail effectué** et d'en **dégager les apports et les perspectives** en découlant.

La première partie est **une reprise synthétique des travaux réalisés**. Il s'agit de résumer les concepts apportés au cours des différents chapitres de ce manuscrit, ainsi que les principaux résultats.

La seconde partie présente **les conclusions** qui peuvent être dégagées de nos travaux, en mettant en avant leurs apports.

Enfin, un certain nombre de **perspectives** découlant de ces conclusions sont présentées dans la troisième partie. Le but est de donner des pistes d'amélioration et d'évolution de la méthodologie proposée.

1 Synthèse des travaux effectués

Premier point abordé dans ce manuscrit : le contexte général de l'étude qui montre l'évolution des industries de produits manufacturés et explique l'émergence de la fabrication additive dans une production toujours plus contrainte en termes de temps et de coût de production (chapitre 1). En effet, il a été vu que les procédés additifs arrivent, aujourd'hui, à une certaine maturité et apportent de nouvelles perspectives concernant la conception de produits.

La viabilité de ces procédés pour la fabrication de pièces fonctionnelles est aujourd'hui démontrée, leur démocratisation souffre cependant d'un manque de connaissances de la part des industriels. Cela concerne aussi bien les opportunités offertes par ces procédés que les contraintes et spécificités liées aux phénomènes physiques qu'ils mettent en jeu. Ainsi, la nécessité de mettre en place une méthodologie d'aide à la conception orientée fabrication additive a été démontrée, cette dernière devant nécessairement répondre à deux objectifs qui sont :

- Aider le concepteur à tirer profit des opportunités offertes par fabrication additive, dans le but de répondre au mieux aux besoins fonctionnels.
- Lui permettre de prendre en compte au plus tôt, dans la démarche de conception, les spécificités de fabrication, dans le but de maximiser la fabricabilité des pièces proposées.

Suite à ce constat, une analyse générale des outils et méthodes existants portant sur l'intégration des connaissances liées au procédé de fabrication, non limité à la fabrication additive, dans le processus de conception, a été menée (chapitre 2). Comprise dans le concept d'ingénierie intégrée, l'idée de conception pour la fabrication n'est pas nouvelle. Il n'existe cependant pas, actuellement, de méthode DFM portant sur la fabrication additive qui permette de répondre, de manière satisfaisante, aux deux objectifs fixés. Chacun d'entre eux fait en effet l'objet de quelques travaux séparés, mais aucune proposition globale n'existe.

D'autre part, il a été montré que les caractéristiques des pièces obtenues par fabrication additive dépendent fortement des choix concernant les stratégies de fabrication ainsi que des phénomènes physiques qu'ils induisent. L'estimation de la fabricabilité d'une pièce passe donc nécessairement par la sélection d'une stratégie de fabrication puis la simulation du processus de fabrication correspondant.

À partir de notre analyse de l'état de l'art, nous avons donc proposé une méthodologie globale permettant de répondre au double objectif fixé (chapitre 3). Organisée en quatre étapes, elle permet, à partir du cahier des charges fonctionnel et des caractéristiques du procédé de fabrication utilisé, de définir une géométrie de pièce optimisée, à la fois, vis-à-vis des objectifs fonctionnels et des contraintes de fabricabilité.

La première étape consiste à définir le domaine de conception qui est l'intersection entre l'espace autorisé par le cahier des charges fonctionnel et l'espace accessible pour le procédé choisi. Ce dernier nécessite d'associer aux entités fonctionnelles une orientation de fabrication, ce qui constitue la première partie du choix de stratégie de fabrication pour la pièce.

La seconde étape consiste à définir, à l'intérieur du domaine de conception, la géométrie

optimale vis-à-vis des objectifs globaux du problème de conception. Nous avons, pour ce faire, choisi d'employer l'optimisation topologique qui permet de s'affranchir de toute idée préconçue du résultat. La géométrie obtenue est alors considérée comme théorique, car elle n'est pas garantie, en l'état, d'être fabricable.

La troisième étape permet de passer de la géométrie théorique à une géométrie réaliste de la pièce. Cela passe par la définition complète de la stratégie de fabrication et donc par un choix de trajectoires de fabrication. La simulation complète du processus de conception permet, dans un second temps, d'estimer la géométrie réaliste correspondante. Cette étape a fait l'objet d'une étude plus poussée dans le cas de l'emploi du procédé de fabrication par projection de poudres (chapitre 4). Cette étude peut être décomposée en deux parties : l'une traitant de la méthode de génération de trajectoires et l'autre du modèle multi-physique du procédé à utiliser pour estimer la géométrie réaliste des pièces.

La quatrième et dernière étape de la méthodologie consiste à déterminer la meilleure stratégie de fabrication pour répondre au problème DFM dans son ensemble. Cela passe par l'estimation et la comparaison des géométries correspondant à l'ensemble des possibilités de stratégie de fabrication.

Bien que la méthodologie proposée soit générique, les contraintes de fabrication sont spécifiques à chaque procédé, car liées aux phénomènes physiques mis en jeu au cours des processus de fabrication. Dans le cadre de nos travaux de thèse, nous nous sommes particulièrement intéressés à la technologie de fabrication par projection de poudres qui de par sa relative jeunesse et son fort potentiel en termes d'application industrielle, nous a semblé particulièrement adaptée pour faire l'objet d'une étude plus poussée. Ainsi, un modèle du processus de fabrication a été mis en place pour évaluer la géométrie finale des pièces et ainsi alimenter la méthode de génération et d'optimisation de trajectoires, par ailleurs proposée, pour la fabrication de pièces à parois minces.

Concernant la proposition du modèle du procédé, les phénomènes mis en jeu étant complexes et couplés, il existe aujourd'hui une très forte dualité entre la précision des résultats et le temps de calcul nécessaire à leur obtention. Dans ce contexte, le modèle que nous proposons, bien que fortement simplifié, permet d'avoir un premier outil pour estimer le choix d'une stratégie de trajectoire parmi plusieurs. Tout d'abord appliqué à un dépôt linéaire simple, ce modèle a été également validé sur une géométrie plus complexe pour une couche de matière puis pour dix. À partir de nos expérimentations, des règles métier associées à la fabrication par projection de poudres pour la génération de trajectoires dans le cas de pièces à parois minces ont été proposées.

Concernant la méthode de génération de trajectoires, notre proposition permet d'aborder le problème avec deux niveaux d'abstraction. La topologie des trajectoires est tout d'abord adaptée grâce à une modélisation en graphes qui permet, si nécessaire, de s'écarter de la géométrie théorique des pièces. La géométrie précise des trajectoires est, dans un second temps, établie à partir du squelette topologique des pièces.

L'ensemble permet de proposer une géométrie de pièce réaliste, à la fois proche de la géométrie théorique, garantie d'être fabricable et optimale vis-à-vis du problème initialement fixé.

Finalement, en plus de plusieurs exemples illustrant différentes parties de la méthodologie, deux exemples industriels ont été traités. Le double objectif de ces exemples était, en

plus d'illustrer les concepts introduits précédemment, d'expliciter dans des cas concrets les potentiels apports de la fabrication additive que permet d'exploiter notre méthodologie.

2 Les apports de nos travaux

Le principal apport de nos travaux est notre **proposition méthodologique**. Notre **vision transversale** de la conception pour la fabrication additive permet, pour la première fois, de prendre en compte à la fois **les opportunités et les contraintes** de cette famille de procédé. En effet, notre approche originale relie l'optimisation fonctionnelle à la simulation du processus de fabrication. De plus, bien que principalement appliquée au procédé de projection de poudres dans le présent manuscrit, **notre méthodologie est générique** et applicable à l'ensemble des procédés de fabrication directe. La démarche proposée est une contribution innovante sur deux principaux points.

Tout d'abord, la **définition d'un domaine de conception** à partir, d'un côté, des exigences fonctionnelles et des caractéristiques globales du procédé utilisé et, de l'autre, d'un choix d'orientation de fabrication. Nous avons en effet vu que de nombreux travaux consistaient à déterminer l'orientation de fabrication (ou de posage) une fois la géométrie de la pièce fixée, ce qui ne permet pas de différencier les zones fonctionnelles du reste de la géométrie. Le concept du domaine de conception, que nous proposons, permet, à l'inverse, de privilégier les zones fonctionnelles. Le choix d'orientation de fabrication est en effet effectué exclusivement à partir des entités fonctionnelles de la pièce, contraignant par la suite le reste de sa géométrie.

Le domaine de conception constitue le volume initial de la pièce avant son optimisation, nous utilisons pour réaliser cette dernière l'outil d'optimisation topologique. Notre approche est originale, car elle permet de guider, dès le départ, la géométrie optimale obtenue, par rapport aux choix de fabrication.

Le second point fort de notre approche est la possibilité d'aborder le problème clé qu'est la **génération de trajectoire**, avec un **haut niveau d'abstraction**. Ceci permet de proposer des trajectoires qui, pour maximiser la fabricabilité de la pièce, peuvent s'écarter de sa géométrie initiale, dans la limite du domaine de conception associé. La simulation du processus de fabrication permet, par la suite, d'estimer de manière réaliste la géométrie des pièces correspondante et surtout de les classer les unes par rapport aux autres vis à vis des objectifs du problème initial. Différents essais ont, en effet, permis de le montrer.

Concernant cette partie simulation, notre apport concerne la possibilité de l'intégrer dans la démarche de conception. Pour la fabrication par projection de poudre, le modèle que nous avons proposé est en effet, à la fois, réaliste et compatible en termes de temps de calcul avec le processus de conception.

Enfin, les exemples que nous avons traités permettent de montrer que nos travaux sont utilisables dans des cas industriels. Ils mettent également en évidence les gains fonctionnels importants que peut apporter la fabrication directe si notre approche DFAM transversale est utilisée.

Finalement notre **approche transversale** de la conception pour la fabrication additive nous permet d'aborder et de prendre en compte l'ensemble des problématiques liées à cette famille de procédés. Tous les verrous n'ont cependant pas encore été levés et les perspectives déroulant de ce travail sont multiples et de différents ordres.

3 Perspectives

La problématique de DFAM est très large et nous nous sommes rapidement rendu compte que les travaux existants étaient d'une part rares et de plus cloisonnés. En nous concentrant sur la transversalité du problème, certains points n'ont pas pu être traités entièrement, ils pourront faire l'objet de futurs travaux. Nous avons identifié ces différentes perspectives dont la liste est donnée ci-dessous.

Les connaissances métier : au-delà de la structure de la méthodologie, plusieurs règles et critères de choix liés aux procédés additifs ont été proposés. Il est cependant évident qu'un travail important peut encore être réalisé sur cette partie. Cela concerne, en particulier trois points :

1. **Les modèles multi-physique des procédés**, qui doivent être enrichis et améliorés pour pouvoir estimer, le plus réalistement possible, la qualité des pièces avant fabrication et intégrer cette estimation dans le processus d'optimisation global tel qu'il a été proposé. Par rapport à nos travaux sur la fabrication par projection de poudre, il serait intéressant de pouvoir simuler des phénomènes thermomécaniques pour être capable d'estimer les déplacements des pièces au cours de leur fabrication.
2. **Les critères de choix d'orientation de fabrication** qui, comme nous l'avons montré, doivent permettre d'aider le concepteur à établir le domaine de conception des produits. Il serait en particulier intéressant de pouvoir proposer des orientations optimales dans le cas d'entités fonctionnelles à géométrie nécessitant une fabrication multi-axes (autre que des géométries extrudées ou symétriques).
3. **Les règles portant sur la génération de trajectoires**, en particulier pour les pièces massives non traitées dans ce manuscrit. Cette génération doit être basée, non plus uniquement sur la géométrie des pièces, mais comme nous l'avons expliqué, sur la connaissance des phénomènes multi-physiques induits.

La notion d'entités fonctionnelles : les exemples traités dans ce manuscrit partent tous de surfaces fonctionnelles ce qui suppose une étape antérieure nécessaire pour la définition de celles-ci. Or, notre méthodologie, dans sa structure, permet d'intégrer également cette étape. En effet, la notion d'entité fonctionnelles permet de partir de géométrie moins contraignantes que des surfaces. Par exemple pour réaliser un appui plan, au lieu de définir un plan, trois points distincts suffisent. Cette idée n'est pas développée dans nos travaux, mais semble, pour autant, intéressante pour proposer des géométries de pièces toujours plus optimisées vis-à-vis des procédés et du besoin fonctionnel.

La réflexion multi-procédés : dans nos travaux, pour concevoir et fabriquer une pièce donnée, la vision multi-procédés est limitée à un moyen de fabrication plus un moyen de parachèvement. Notre méthodologie est pourtant compatible avec une approche multi-procédés plus large qui pourrait se traduire par :

1. Une intégration de la méthodologie dans une boucle d'optimisation plus générale. Cela permettra ainsi de déterminer, parmi différents procédés, lequel permet de fabriquer le produit répondant le mieux au problème de conception donné.

2. La fabrication du brut des pièces à l'aide de plusieurs procédés. Le choix peut, en effet, se faire à partir de l'analyse géométrique des entités fonctionnelles. L'approche est alors exactement la même en considérant pour chaque groupe d'entités les contraintes liées aux procédés choisis.

Concernant la prise en compte du moyen de parachèvement, notre proposition de définition de surépaisseur peut également être complétée. L'étude de l'accessibilité et du comportement mécanique de la pièce pendant le parachèvement pourraient, par exemple, être pris en compte.

L'optimisation multi-matériaux : seules les opportunités géométriques des procédés additifs ont été traitées dans ce manuscrit. Or nous avons également mentionné la possibilité de fabriquer des pièces multi-matériaux, cette nouvelle perspective semble également intéressante à prendre en compte dans la démarche de conception des produits. Cela nécessite d'optimiser non plus seulement la géométrie des pièces, mais également la répartition des matériaux la composant. Cette partie a déjà été abordée dans l'équipe MO2P au travers des travaux de thèse de Pierre Muller.

Prise en compte des impacts environnementaux : Pour un problème de conception donné, nos travaux permettent de proposer une géométrie optimisée vis-à-vis, actuellement, de deux critères : sa fonctionnalité et sa fabricabilité. Il est cependant envisageable de prendre en compte d'autres critères tels que son impact environnemental. Cela nécessite de pouvoir l'estimer à partir d'un choix de stratégie de trajectoire. De tels travaux sont actuellement mis en œuvre au sein de l'équipe MO2P dans le cadre des travaux de thèse de Florent Le Bourhis.

Annexe A

Propriétés matériau

Température (K)	293	373	473	573	673	773	873	973	1073	1173	1273
Résistance mécanique (Mpa)	340										
Résistance élastique 0.2% (MPa)	235	210	200	180	168		88				
Élongation (%)	26										
Dureté Brinell (HB)	335										
Densité (kg/m ³)	7800	7849	7816	7785	7749	7714	7674				
Module d'élasticité (Gpa)	212	206	199	191	183	174	163				
Expansion thermique ($\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$)	12.6	12.6	13.2	13.8	14.2	14.7	15				
Conductivité thermique (W/m.K)	54	53	51	47	44	39	36				
Capacité thermique (J/kg.K)	440	470	500	540	580	650	720	810	510	540	570
Module d'écroutissage	2.00E+05										
Température de fusion (K)	1490										
Coefficient de poisson	0.28	0.29			0.3	0.31					

TABLEAU A.1 – Propriétés de l'acier S235 [Construiracier, 2013].

Température (K)	293	373	473	573	673	773	873	973	1073	1173	1273
Résistance mécanique (Mpa)	340										
Résistance élastique 0.2% (MPa)	260	206	173	155	140	130	123	112			
Élongation (%)	55										
Dureté Brinell (HB)	175										
Densité (kg/m ³)	8000	7940	7910	7906	7835	7800	7755	7702	7617	7590	7550
Module d'élasticité (Gpa)	192	185	177	169	161	153	145	137	130	108	81
Expansion thermique ($\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$)	15.9	16.4	17	17.5	17.9	18.3	18.7	19	19.4	19.6	19.8
Conductivité thermique (W/m.K)	13	15	17	17.5	18.5	19.7	20.8	21.9	23.1	24.8	25.15
Capacité thermique (J/kg.K)	445	490	520	552	565	581	592	602	617	656	680
Module d'écroutissage	2.00E+05										
Température de fusion (K)	1500										
Coefficient de poisson	0.31										

TABLEAU A.2 – Propriétés de l'acier inoxydable 316L [Valiorgue, 2008, Depradeux, 2004].

Bibliographie

- [Abdalla, 1999] Abdalla, H. S. (1999). Concurrent engineering for global manufacturing. *International Journal of Production Economics*, 60-61 :251–260. 17
- [Alexander, 1998] Alexander, P. (1998). Part orientation and build cost determination in layered manufacturing. *Computed-Aided Design*, 30(5) :343–356. 36
- [Alimardani et al., 2009] Alimardani, M., Toyserkani, E., Huissoon, J. P., and Paul, C. P. (2009). On the delamination and crack formation in a thin wall fabricated using laser solid freeform fabrication process : An experimental-numerical investigation. *Optics and Lasers in Engineering*, 47(11) :1160–1168. 75
- [Allaire, 2006] Allaire, G. (2006). *Conception optimale de structures*, volume 58. Springer. 23
- [Armillotta, 2008] Armillotta, A. (2008). Selection of layered manufacturing techniques by an adaptive AHP decision model. *Robotics and computer integrated manufacturing*, 24 :450–461. 35
- [Arni and Gupta, 2001] Arni, R. and Gupta, S. (2001). Manufacturability Analysis of Flatness Tolerances in Solid Freeform Fabrication. *Journal of Mechanical Design*, 123(1) :148. 30
- [Atzeni and Salmi, 2012] Atzeni, E. and Salmi, A. (2012). Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62 :1147–1155. ix, 10, 26, 27, 35
- [Bandera et al., 2004] Bandera, C., Cristofolini, I., Filippi, S., and Toneatto, G. (2004). The definition of the geometrical characteristics of products in a knowledge based system for industrial design (DGL-Design GuideLines)-exploring the possibility of introducing ISO GPS (Geometrical Specification of Products) concepts. *Convegno Nazionale XIV ADM XXXIII AIAS*. 36
- [Bartolo, 2011] Bartolo, P. J. (2011). *Stereolithography : Materials, Processes and Applications*. Springer. 8
- [Bendsoe, 1989] Bendsoe, M. P. (1989). Structural Optimization. 202 :193–202. 59
- [Bendsoe and Sigmund, 2003] Bendsoe, M. P. and Sigmund, O. (2003). *Topology optimization : theory, methods, and applications*. Springer Verlag. 23, 24
- [Bi et al., 2007] Bi, G., Schurmann, B., Gasser, A., Wissenbach, K., and Poprawe, R. (2007). Development and qualification of a novel laser-cladding head with integrated sensors. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(3-4) :555–561. 72
- [Bian et al., 2008] Bian, H., Liu, W., and Li, L. (2008). Research on a New Kind of Adaptive Parallel Scan Method in Laser Metal Deposition Shaping. In *International Conference on Computer Science and Software Engineering*, pages 1012–1015. 96

- [Blanther, 1892] Blanther, J. E. (1892). Manufacture of contour relief-maps, US Patent 473,901. 8
- [Blum, 1967] Blum, H. (1967). A transformation for extracting new descriptors of shape. *Models for the perception of speech and visual form*, 19(5) :362–380. 103
- [Bo et al., 2012] Bo, Q., Yu-sheng, S., Qing-song, W., and Hai-bo, W. (2012). The helix scan strategy applied to the selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 63(5-8) :631–640. x, 32, 33
- [Bonnard et al., 2010] Bonnard, R., Mognol, P., and Hascoët, J.-Y. (2010). A new digital chain for additive manufacturing processes. *Virtual and Physical Prototyping journal*, 5(2) :75–88. 10
- [Bonnet and Frangi, 2006] Bonnet, d. M. and Frangi, A. (2006). Analyse des solides déformables par la méthode des éléments finis. *European Journal of Computational Mechanics/Revue Européenne de Mécanique Numérique*, 16(5). 79
- [Boothroyd and Dewhurst, 1983] Boothroyd, G. and Dewhurst, P. (1983). *Design for Assembly : a designer's handbook*. University of Massachusetts. 17
- [Boothroyd et al., 2010] Boothroyd, G., Dewhurst, P., and Knight, W. A. (2010). *Product design for manufacture and assembly*, volume 74. 17
- [Bouaziz, 2004] Bouaziz, Z. (2004). Methodology of machining costs evaluation for die and mould manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 152(2) :237–245. 20
- [Bourell et al., 2009] Bourell, D. L., Leu, M. C., Rosen, D. W., and Beaman, J. J. (2009). Roadmap for Additive Manufacturing : Identifying the Future of Freeform Processing. 3, 10, 11
- [Brissaud and Tichkiewitch, 2000] Brissaud, D. and Tichkiewitch, S. (2000). Innovation and manufacturability analysis in an integrated design context. *Computers in Industry*, 43(2) :111–121. 20
- [Byun and Lee, 2006] Byun, H. and Lee, K. (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. 28, 36
- [Byun and Lee, 2004] Byun, H. S. and 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) :1338–1347. 35
- [Canellidis et al., 2009] Canellidis, V., Giannatsis, J., and 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. ix, 30, 36
- [Caperaa, 2005] Caperaa, M. M. S. (2005). *Contribution à la maîtrise des phénomènes vibratoires en usinage de parois minces : Application à l'usinage de pales aéronautiques*. PhD thesis, Institut national polytechnique de Toulouse. 69
- [Case, 2000] Case, K. (2000). Feature modelling : a validation methodology and its evaluation. *Journal of Materials Processing Technology*, 107(1-3) :15–23. 20
- [Caulfield et al., 2007] Caulfield, B., McHugh, P., and Lohfeld, S. (2007). Dependence of mechanical properties of polyamide components on build parameters in the SLS process. *Journal of Materials Processing Technology*, 182(1-3) :477–488. 27, 31

- [Chang, 2001] Chang, K. (2001). Integration of design and manufacturing for structural shape optimization. *Advances in Engineering Software*, 32(7) :555–567. 23
- [Chaves-Jacob et al., 2011] Chaves-Jacob, J., Poulachon, G., Duc, E., and Geffroy, C. (2011). Design for manufacturing applied to turbomachine components. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 57(5) :453–463. 19
- [Cho et al., 2004] Cho, C., Zhao, G., Kwak, S.-Y., and Kim, C. B. (2004). Computational mechanics of laser cladding process. *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154 :494–500. 74
- [Choi and Chang, 2005] Choi, J. and Chang, Y. (2005). Characteristics of laser aided direct metal/material deposition process for tool steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(4-5) :597607. 71
- [Choset and Pignon, 1997] Choset, H. and Pignon, P. (1997). Coverage path planning : The boustrophedon cellular decomposition. In *International Conference on Field and Service Robotics*. 96
- [Ciurana et al., 2008] Ciurana, J., Garcia-Romeu, M., Ferrer, I., and Casadesús, M. (2008). A model for integrating process planning and production planning and control in machining processes. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24(4) :532–544. 19
- [Construiracier, 2013] Construiracier (2013). Office technique pour l’utilisation de l’acier. xiii, 140
- [Dana and Gupta, 1994] Dana, S. N. and Gupta, S. (1994). Systematic Approach for Analyzing the Manufacturability of Machined Parts. *Computer Aided Design*, 27(5) :323–342. 19
- [Deckard, 1989] Deckard, C. R. (1989). Method and apparatus for producing parts by selective sintering,US patentent 4,863,538. 8
- [Delgado et al., 2012] Delgado, J., Ciurana, J., and Rodríguez, C. a. (2012). Influence of process parameters on part quality and mechanical properties for DMLS and SLM with iron-based materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60(5-8) :601–610. 31
- [Depradeux, 2004] Depradeux, L. (2004). *Simulation numérique du soudage - acier 316L validation sur cas tests de complexité croissante*. PhD thesis, INSA de Lyon. xiii, 141
- [Dowlatsahi, 1999] Dowlatsahi, S. (1999). A modeling approach to logistics in concurrent engineering. *European Journal of Operational Research*, 115(1) :59–76. 17
- [Dubourg and Archambeault, 2008] Dubourg, L. and Archambeault, J. (2008). Technological and scientific landscape of laser cladding process in 2007. *Surface and Coatings Technology*, 202(24) :5863–5869. x, 68
- [Duc et al., 1999] Duc, E., Lartigue, C., Tournier, C., and Bourdet, P. (1999). New Concept for the Design and the Manufacturing of Free-Form Surfaces : The Machining Surface. *Annals of the CIRP conference*, 48(1) :103–106. 21
- [El Cheikh et al., 2012] El Cheikh, H., Courant, B., Branchu, S., Hascoët, J.-Y., and Guillén, R. (2012). Analysis and prediction of single laser tracks geometrical characteristics in coaxial laser cladding process. *Optics and Lasers in Engineering*, 50(3) :413–422. 72

- [Ettlie, 1997] Ettlie, J. E. (1997). Integrated design and new product success. *Journal of Operations Management*, 15(1) :33–55. 16
- [Eversheim and Baumann, 1991] Eversheim, W. and Baumann, M. (1991). Assembly-oriented design process. *Computers in Industry*, 17(2) :287–300. 18
- [Fallah et al., 2011] Fallah, V., Alimardani, M., Corbin, S. F., and Khajepour, A. (2011). Temporal development of melt-pool morphology and clad geometry in laser powder deposition. *Computational Materials Science*, 50(7) :2124–2134. 75
- [Feng et al., 1996] Feng, C., Kusiak, A., and Huang, C. (1996). Cost evaluation in design with form features. *Computer Aided Design*, 28(11) :879–885. 20
- [Fenn et al., 2009] Fenn, J., Raskino, M., and Gammage, B. (2009). Gartner ' s Hype Cycle Special Report for 2009. ix, 9
- [Filippi and Cristofolini, 2007] Filippi, S. and Cristofolini, I. (2007). The Design Guidelines (DGLs), a knowledge-based system for industrial design developed accordingly to ISO-GPS (Geometrical Product Specifications) concepts. *Research in Engineering Design*, 18(1) :1–19. 36
- [Foroozmehr and Kovacevic, 2010] Foroozmehr, E. and Kovacevic, R. (2010). Effect of path planning on the laser powder deposition process : thermal and structural evaluation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51(5-8) :659–669. 32, 74
- [Ghosh and Choi, 2005] Ghosh, S. and Choi, J. (2005). Three-dimensional transient finite element analysis for residual stresses in the laser aided direct metal/material deposition process. *Journal of Laser Applications*, 17(3) :144–158. 74
- [Gibson et al., 2009] Gibson, I., Rosen, D. W., and Stucker, B. (2009). Design for Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing Technologies*, pages 283–316. 8
- [Grzesiak, 2012] Grzesiak, A. (2012). La fabrication additive débridera les bureaux d'étude. *Usine nouvelle* 26 mars. 11
- [Gupta, 1994] Gupta, S. (1994). *Automated manufacturability analysis of machined parts*. PhD thesis, University of Maryland. 18
- [Gupta et al., 1997] Gupta, S., Regli, W. C., Das, D., and Nau, D. (1997). Automated manufacturability analysis : a survey. *Research in Engineering Design*, 9(3) :168–190. 19
- [Hague, 2006] Hague, R. (2006). Unlocking the Design Potential of Rapid Manufacturing. In *Rapid Manufacturing*, pages 5–18. John Wiley & Sons, Ltd. 10, 11
- [Harzheim and Graf, 2005] Harzheim, L. and Graf, G. (2005). A review of optimization of cast parts using topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 31(5) :388–399. 21
- [Hascoet et al., 2011] Hascoet, J. Y., Ponche, R., Kerbrat, O., and Mognol, P. (2011). From functional specifications to optimized CAD model : proposition of a new DFAM methodology. In *the fifth international conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, pages 467–472. 55
- [Herrmann et al., 2004] Herrmann, J., Cooper, J., Gupta, S., and CC (2004). New directions in design for manufacturing. ix, 17, 18

- [Hmida et al., 2006] Hmida, F., Martin, P., and Vernadat, F. (2006). Cost estimation in mechanical production : The Cost Entity approach applied to integrated product engineering. *International Journal of Production Economics*, 103(1) :17–35. 20
- [Hopkinson et al., 2006] Hopkinson, N., Hague, R. J. M., and Dickens, P. M. (2006). *Rapid manufacturing : An Industrial Revolution for the Digital Age*. Wiley Online Library. 7, 11
- [Horii et al., 2009] Horii, T., Kirihara, S., and Miyamoto, Y. (2009). Freeform fabrication of superalloy objects by 3D micro welding. *Materials and Design*, 30(4) :1093–1097. 8
- [Howard and Lewis, 2003] Howard, L. and Lewis, H. (2003). The development of a database system to optimise manufacturing processes during design. *Journal of Materials Processing Technology*, 134(3) :374–382. 16
- [Hu et al., 2011] Hu, S. J., Ko, J., Weyand, L., Elmaraghy, H. A., Lien, T. K., Koren, Y., Bley, H., Chryssolouris, G., Nasr, N., and Shpitalni, M. (2011). Assembly system design and operations for product variety. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60 :715–733. 3
- [Huang, 1996] Huang, G. Q. (1996). *Design for X : concurrent engineering imperatives*. Springer. 17
- [Huang et al., 2013] Huang, S. H., Liu, P., and Mokasdar, A. (2013). Additive manufacturing and its societal impact : a literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5-8) :1191–1203. 6
- [Hull, 1986] Hull, C. W. (1986). Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography, US Patent 4,575,330 . 8
- [Jin et al., 2011] Jin, G., Li, W., Tsai, C., and Wang, L. (2011). Adaptive tool-path generation of rapid prototyping for complex product models. *Journal of Manufacturing Systems*, 30(3) :154–164. 96
- [Kanakanala et al., 2010] Kanakanala, D., Routhu, S., Ruan, J., Liu, X. F., and Liou, F. (2010). A multi-axis slicing method for direct laser deposition process. In *Proceedings of Design Engineering Technical Conferences*, pages 1–8. 96
- [Kao and Prinz, 1998] Kao, J. and Prinz, F. B. (1998). Optimal motion planning for deposition in layered manufacturing. *Proceedings of Design Engineering Technical Conferences*, pages 13–16. 32, 96
- [Kerbrat, 2009] Kerbrat, O. (2009). *Méthodologie de conception d'outillages modulaires hybrides basée sur l'évaluation quantitative de la complexité de fabrication*. PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes. 36
- [Kerbrat et al., 2011] Kerbrat, O., Mognol, P., and Hascoet, J. (2011). A new DFM approach to combine machining and additive manufacturing. *Computers in Industry*, 62(7) :684–692. 69
- [Kerbrat et al., 2009] Kerbrat, O., Mognol, P., and Hascoët, J.-Y. (2009). Manufacturing complexity evaluation at the design stage for both machining and layered manufacturing. In *42nd CIRP Conference on Manufacturing Systems*, Grenoble (France). 20
- [Kerbrat et al., 2010] Kerbrat, O., Mognol, P., and Hascoet, J.-Y. (2010). Manufacturing complexity evaluation at the design stage for both machining and layered manufacturing. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2 :208–215. 19

- [Kerninon, 2010] Kerninon, J. (2010). *Intégration des spécificités de la fabrication additive dans une méthode de conception de pièces*. PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes. 37
- [Kim et al., 2002] Kim, H., Querin, O. M., and Steven, G. P. (2002). On the development of structural optimisation and its relevance in engineering design. *Design studies*, 23 :85–102. 23
- [Koren, 2010] Koren, Y. (2010). *The Global Manufacturing Revolution : Product-Process-Business Integration and Reconfigurable Systems*, volume 75. Wiley. ix, 2
- [Korosec, 2005] Korosec, M. (2005). Neural network based manufacturability evaluation of free form machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(1) :13–20. 19
- [Kulkarni et al., 2000] Kulkarni, P., Marsan, A., and Dutta, D. (2000). A review of process planning techniques in layered manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 6(1) :18–35. 31
- [Kumar and Roy, 2009] Kumar, A. and Roy, S. (2009). Effect of three-dimensional melt pool convection on process characteristics during laser cladding. *Computational Materials Science*, 46(2) :495506. 33
- [Kuo, 2001] Kuo, T. (2001). Design for manufacture and design for 'X' : concepts, applications, and perspectives. *Computers & Industrial Engineering*, 41(3) :241–260. 17
- [Kvan, 2000] Kvan, T. (2000). Collaborative design : what is it? *Automation in Construction*, 9(4) :409–415. 16
- [Larson, 1998] Larson, R. (1998). Method and device for producing three-dimensional bodies, international patent WO/1994/026446 . 8
- [Levy et al., 2003] Levy, G., Schindel, R., and Kruth, J. (2003). Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 52(2) :589–609. 9
- [Liao et al., 2008] Liao, S.-h., Fei, W.-c., and Liu, C.-T. (2008). Relationships between knowledge inertia, organizational learning and organization innovation. *Technovation*, 28(4) :183–195. 38
- [Liou et al., 2007] Liou, F. F., Slattery, K., Kinsella, M., Newkirk, J., Chou, H.-N., and Landers, R. (2007). Applications of a hybrid manufacturing process for fabrication of metallic structures. *Rapid Prototyping Journal*, 13(4) :236–244. 30
- [Liu and Li, 2005] Liu, J. and Li, L. (2005). Effects of powder concentration distribution on fabrication of thin-wall parts in coaxial laser cladding. *Optics & Laser Technology*, 37(4) :287–292. 98
- [Liu and Liou, 2010] Liu, X. F. and Liou, F. (2010). 2D path planning for direct laser deposition process. In *Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conference*, pages 1–9. 96
- [Lu et al., 2007] Lu, S.-Y., Elmaraghy, W., Schuh, G., and Wilhelm, R. (2007). a Scientific Foundation of Collaborative Engineering. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56(2) :605–634. 16
- [Lu et al., 2010] Lu, Z. L., Li, D., Lu, B. H., Zhang, A. F., Zhu, G. X., and Pi, G. (2010). The prediction of the building precision in the Laser Engineered Net Shaping process using advanced networks. *Optics and Lasers in Engineering*, 48(5) :519–525. 72

- [Ma, 2004] Ma, W. (2004). NURBS-based adaptive slicing for efficient rapid prototyping. *Computer-Aided Design*, 36(13) :1309–1325. 30
- [Martin and Roucoules, 2009] Martin, L. and Roucoules, L. (2009). Identification produit-procédés pour une conception proactive : application à la fonderie. In *19ème Congrès Français de Mécanique*. 21
- [Marty and Linares, 1999] Marty, C. and Linares, J. M. (1999). *Industrialisation des produits mécaniques*. Number vol. 3 in Industrialisation des produits mécaniques. Hermès. 2
- [Masood, 2002] Masood, S. (2002). A rule based expert system for rapid prototyping system selection. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 18(3-4) :267–274. 46
- [Meier and Haberland, 2008] Meier, H. and Haberland, C. (2008). Experimental studies on selective laser melting of metallic parts. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 39(9) :665–670. 31
- [Mellor et al., 2012] Mellor, S., Hao, L., and Zhang, D. (2012). Additive manufacturing : a framework for implementation. *17th International Working Seminar on Production Economics*, pages 133–144. 10
- [Merçelis and Kruth, 2006] Merçelis, P. and Kruth, J.-P. (2006). Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 12(5) :254–265. 30
- [Mognol et al., 2006] Mognol, P., Lopicart, D., and Perry, N. (2006). Rapid prototyping : energy and environment in the spotlight. *Rapid Prototyping Journal*, 12(1) :26–34. 6
- [Morville et al., 2010] Morville, S., Carin, M., Muller, M., Gharbi, M., Peyre, P., Carron, D., and Le, P. (2010). 2D axial-symmetric model for fluid flow and heat transfer in the melting and resolidification of a vertical cylinder. In *COMSOL Conference, Paris*. 75
- [Moylan et al., 2012] Moylan, S., Cooke, A., Slotwinski, J., and Donmez, M. A. (2012). A Review of Test Artifacts for Additive Manufacturing. Technical report. ix, 26
- [Muller et al., 2013a] Muller, P., Hascoët, J., and Mognol, P. (2013a). A method for the manufacturing of functionally graded material parts. *Advanced Materials Research*, 698 :117–126. 68
- [Muller et al., 2013b] Muller, P., Mognol, P., and Hascoët, J. (2013b). Modeling and control of a direct laser powder deposition process for Functionally Graded Materials (FGM) parts manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(5) :685–692. 6, 82
- [Nachum and Fleck, 2011] Nachum, S. and Fleck, N. A. (2011). The microstructure and mechanical properties of ball-milled stainless steel powder : The effect of hot-pressing vs . laser sintering. *Acta Materialia*, 59(19) :7300–7310. 8
- [Nickels, 2009] Nickels, L. (2009). Channelling quality for moulded parts using fast manufacturing. *Metal Powder Report*, 64(8) :8–12. 5
- [O’Driscoll, 2002] O’Driscoll, M. (2002). Design for manufacture. *Journal of Materials Processing Technology*, 122(2-3) :318–321. 17
- [Perrin, 1999] Perrin, J. (1999). *Pilotage et évaluation des processus de conception*. Editions L’Harmattan. 16

- [Perrin, 2001] Perrin, J. (2001). *Concevoir l'innovation industrielle : Méthodologie de conception de l'innovation*. CNRS. 17
- [Pine and Davis, 1999] Pine, B. J. and Davis, S. (1999). *Mass customization : the new frontier in business competition*. Harvard Business Press. 2
- [Ponche et al., 2012] Ponche, R., Hascoet, J. Y., Kerbrat, O., and Mognol, P. (2012). A new global approach to design for additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping Journal*, 7(2) :93–105. 53
- [Prasad, 1996] Prasad, B. (1996). *Concurrent engineering fundamentals : Integrated product and process organization (Vol. 1)*. Prentice Hall : New Jersey. 16
- [Ranky, 1994] Ranky, P. G. (1994). Current/Simultaneous Engineering : Methods. *Tools & Case Studies, CIMware Limited, Guildford, Surrey, UK*. ix, 16
- [Ren et al., 2006] Ren, L., Padathu, A., Ruan, J., Sparks, T., and Liou, F. (2006). Three dimensional die repair using a hybrid manufacturing system. In *Solid freeform fabrication symposium Proceedings*, pages 51–59. 68
- [Ren et al., 2008] Ren, L., Sparks, T., Ruan, J., and Liou, F. (2008). Process planning strategies for solid freeform fabrication of metal parts. *Journal of Manufacturing Systems*, 27(4) :158–165. 32
- [Risacher, 1997] Risacher, P. (1997). *Choix de configurations de machines outils pour l'usinage de surfaces complexes*. PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes. 19
- [Risacher et al., 1997] Risacher, P., Hascoet, J. Y., and Bennis, F. (1997). Workpiece setup and machine-tool choice in milling. In *International Conference on Industrial Engineering and Production Management*. 29, 30
- [Rodrigue and Rivette, 2010] Rodrigue, H. and Rivette, M. (2010). An Assembly Level Design for Additive Manufacturing Methodology. In *IDMME Virtual concept*. 37
- [Rosen, 2007] Rosen, D. (2007). Computer-aided design for additive manufacturing of cellular Structures. *Computer-Aided Design & Applications*, 4(5) :585–594. x, 38, 39, 40
- [Rosen, 2009] Rosen, D. (2009). Thoughts on Hierarchical Modeling Methods for Complex Structures. *Computer-Aided Design and Applications*, 6(3) :419–430. 38
- [Rosenthal, 1946] Rosenthal, D. (1946). The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments. In *ASME*, pages 849–866. 74
- [Roucoules, 2007] Roucoules, L. (2007). *Contribution à l'intégration des activités collaboratives et métier en conception de produit*. Hdr, Université technologique de compïègne (UTC). 21
- [Roy et al., 2008] Roy, R., Hinduja, S., and Teti, R. (2008). Recent advances in engineering design optimisation : Challenges and future trends. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(2) :697–715. 23
- [Ruan et al., 2006] Ruan, J., Sparks, T., Fan, Z., Stroble, J., and Panackal, A. (2006). A Review of Layer Based Manufacturing Processes for Metals. In *Solid freeform fabrication symposium Proceedings*, pages 233–245. 8
- [Ruan et al., 2007] Ruan, J., Sparks, T. E., Panackal, A., Liou, F. W., Eiamsa-ard, K., Slattery, K., Chou, H.-N., and Kinsella, M. (2007). Automated Slicing for a Multi-axis Metal Deposition System. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 129(2) :303–310. 96

- [Ruffo and Hague, 2007] Ruffo, M. and Hague, R. (2007). Cost estimation for rapid manufacturing simultaneous production of mixed components using laser sintering. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 221(11) :1585–1591. 35
- [Sanusi et al., 2012] Sanusi, M., Aziz, A., Furumoto, T., Ueda, T., Abe, S., Hosokawa, A., and Tanaka, R. (2012). Study on thermal and strain behaviour in selective laser sintering process. *Key Engineering Materials*, 516 :203–208. 32
- [Senthilkumaran et al., 2012] Senthilkumaran, K., Pandey, P., and Rao, P. (2012). Statistical modeling and minimization of form error in SLS prototyping. *Rapid Prototyping Journal*, 18(1) :38–48. 26
- [Seo, 1998] Seo, T.-I. (1998). *Intégration des Effets de Déformation d’Outil en Génération de Trajectoire d’Usinage*. PhD thesis. 21
- [Serres et al., 2011] Serres, N., Tidu, D., Sankare, S., and Hlawka, F. (2011). Environmental comparison of MESO-CLAD process and conventional machining implementing life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 19 :1117–1124. 6
- [Shukor and Axinte, 2009] Shukor, S. A. and Axinte, D. A. (2009). Manufacturability analysis system : issues and future trends. *International Journal of Production Research*, 47(5) :1369–1390. 19, 20
- [Steen and Mazumder, 2010] Steen, W. M. and Mazumder, J. (2010). *Laser material processing*. Springer. 74
- [Swift and Booker, 2003] Swift, K. G. and Booker, J. D. (2003). *Process selection From Design to manufacture*. Butterworth-Heinemann. ix, 17
- [Tagore et al., 2007] Tagore, G., Anjekar, S., and Gopal, A. (2007). Multi objective optimisation of build orientation for rapid prototyping with fused deposition modeling(FDM). In *Solid Freeform Fabrication Symposium*, pages 246–255, Austin, Texas (USA). ix, 29
- [Tang and Landers, 2011] Tang, L. and Landers, R. G. (2011). Layer-to-layer height Control for laser metal deposition Process. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 133(2) :1–9. 72
- [Tapie and Mawussi, 2008] Tapie, L. and Mawussi, K. B. (2008). Analyses de difficultés d’usinage pour les pièces de formes complexes : concept de viewer. *Assises MUGV*. 20
- [Teitelbaum, 2009] 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. 36
- [Teti and Kumara, 1997] Teti, R. and Kumara, S. R. (1997). Intelligent Computing Methods for Manufacturing Systems. *Annals of the CIRP*, 46(2). 18
- [Tolosa et al., 2010] Tolosa, I., Garcíandía, F., Zubiri, F., Zapirain, F., and Esnaola, A. (2010). Study of mechanical properties of 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. xii, 27, 31
- [Tomlin and Meyer, 2011] Tomlin, M. and Meyer, J. (2011). Topology optimization of an additive layer manufactured (ALM) aerospace part. *Proceeding of the 7th Altair CAE technology conference*. x, 38
- [Toussaint, 2010] Toussaint, L. (2010). *Modèles et méthodes pour une conception hautement productive orientée vers la fabrication : application à l’ingénierie routinière*

- de pièces plastiques*. PhD thesis, Université de Technologie de Belfort-Montbeliard (UTBM). 21
- [Toussaint et al., 2010] Toussaint, L., Demoly, F., Lebaal, N., Gomes, S., Iv, M., and Motteurs, S. (2010). PLM-based Approach for Design Verification and Validation using Manufacturing Process Knowledge. *Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics*, 8(1) :1–7. 20, 21
- [Toyserkani et al., 2004] Toyserkani, E., Khajepour, A., and Corbin, S. (2004). 3-D finite element modeling of laser cladding by powder injection : effects of laser pulse shaping on the process. *Optics and Lasers in Engineering*, 41(6) :849–867. 74, 75, 81
- [Tuck et al., 2007] Tuck, C., Hague, R., and Burns, N. (2007). Rapid manufacturing : impact on supply chain methodologies and practice. *International Journal of Services and Operations Management*, 3(1) :1–22. 6
- [Valiorgue, 2008] Valiorgue, F. (2008). *Simulation des processus de génération de contraintes résiduelles en tournage du 316L Nouvelle approche numérique et expérimentale*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne. xiii, 141
- [Vasquez, 2009] Vasquez, M. (2009). *Economic and technological advantages of using high speed sintering as a rapid manufacturing alternative in footwear applications*. Master of science in mechanical engineering, Massachusetts Institute of Technology. 6
- [Wang and Felicelli, 2006] Wang, L. and Felicelli, S. (2006). Analysis of thermal phenomena in LENS deposition. *Materials Science and Engineering*, 435 :625–631. 84
- [Wang and Zuo, 2010] Wang, X. and Zuo, T. (2010). Limit of accuracy in laser fabrication with metal powder. *Frontiers of Optoelectronics in China*, 3(2) :190–193. 27
- [Weisheit et al., 2001] Weisheit, A., Backes, G., Lasertechnik, L., Gennany, R. A., and Stromeyer, R. (2001). Powder Injection : The Key to Reconditioning and Generating Components Using Laser Cladding. Technical report. 68
- [Winner et al., 1988] Winner, R. I., Pennell, J. P., Bertrand, H. E., and Slusarczyk, M. M. G. (1988). The role of concurrent engineering in weapons system acquisition. Technical report, DTIC Document. 16
- [Wohlers, 2002] Wohlers, T. (2002). *Wohlers report 2002 : Additive Manufacturing and 3D printing State of the Industrial Annual Worldwide Progress Report*. Wohlers Associates. ix, 5, 6
- [Wohlers, 2012] Wohlers, T. (2012). *Wohlers Report 2012 : Additive Manufacturing and 3D printing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report*. Wohlers Associates. ix, 4, 5, 6, 8
- [Xia and Wang, 2008] Xia, Q. and Wang, M. (2008). Simultaneous optimization of the material properties and the topology of functionally graded structures. *Computer-Aided Design*, 40(6) :660–675. 37
- [Xing et al., 2006] Xing, F., Liu, W., Zhang, K., Shang, X., and Wang, T. (2006). Intelligent Metal Powder Laser Forming System. In *Knowledge Enterprise : Intelligent Strategies In Product Design, Manufacturing, and Management*, volume 207, pages 525–535. Springer, Boston. 8

- [Yan et al., 2009] Yan, Y., Li, Y., Zhang, S., Lin, R., Wu, F., Lu, R., Xiong, Q., and Wang, Z. (2009). Rapid Prototyping and Manufacturing Technology : Principle , Representative Technics , Applications , and Development Trends *. *Tsinghua Science and Technology*, 14 :1–12. 8
- [Yang et al., 2002] Yang, Y., Loh, H., Fuh, J., and Wang, Y. (2002). Equidistant path generation for improving scanning efficiency in layered manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 8(1) :30–37. 96
- [Yim, 2007] Yim, S. (2007). *A retrieval method (DFM framework) for automated retrieval of design for additive manufacturing problems*. PhD thesis, Georgia Institute of Technology. 37
- [Zhang et al., 2008] Zhang, H., Jiang, J., Zou, H., and Wang, G. (2008). Multi-axis Path Planning for Hybrid Plasma Deposition and Milling Based on Slicing Characteristics. *Intelligent Robotics and Applications*, (2) :225–234. 96
- [Zhang et al., 2007] Zhang, K., Liu, W., and Shang, X. (2007). Research on the processing experiments of laser metal deposition shaping. *Optics & Laser Technology*, 39(3) :549–557. 71
- [Ziemke and Spann, 1993] Ziemke, M. C. and Spann, M. S. (1993). Concurrent engineering’s roots in the world war II era. *Concurrent Engineering, Contemporary Issues and Modern Design Tools*, pages 24–41. 18
- [Zuo et al., 2005] Zuo, K.-T., Chen, L.-P., Zhang, Y.-Q., and Yang, J. (2005). Manufacturing and machining-based topology optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 27(5-6) :531–536. 22

Résumé en français

Dans le contexte d'un marché saturé et d'une forte concurrence internationale, les industriels doivent proposer des produits manufacturés innovants, de qualité et respectant des contraintes de coûts et de délais de plus en plus exigeantes. La fabrication additive permet aujourd'hui l'obtention de pièces fonctionnelles, elle apparaît, dès lors, comme l'un des moyens de mise en œuvre d'une production personnalisée répondant aux problématiques actuelles.

Ne nécessitant pas d'outillage dédié ni de brut de matière, les procédés additifs apportent de nouvelles perspectives quant au triptyque Produit-Process-Matériau. D'un autre côté, comme tous les autres procédés, ils ont leurs propres spécificités et contraintes liées aux phénomènes physiques mis en jeu au cours du processus de fabrication. Tirer profit de la rupture technologique que représente la fabrication additive implique donc de concevoir les produits autrement.

Ce travail de thèse consiste en l'élaboration d'une méthodologie de conception orientée fabrication additive. Organisée en quatre étapes, la méthode permet, à partir du cahier des charges fonctionnel et des caractéristiques du procédé de fabrication utilisé, de définir une géométrie de pièce optimisée, à la fois, vis-à-vis des objectifs fonctionnels et des contraintes de fabricabilité.

Un domaine de conception est, dans un premier temps, établie à partir des entités fonctionnelles et d'un choix d'orientations de fabrication. La topologie générale du produit y est alors optimisée vis à vis des critères globaux issus des spécifications fonctionnelles et des règles métier globales. La géométrie locale est ensuite définie à partir d'un choix de trajectoires de fabrication et de la simulation du processus de fabrication. Enfin, chaque choix lié à la stratégie de fabrication débouchant sur une géométrie de pièce différente, la dernière étape consiste à identifier celle répondant le mieux aux spécifications attendues.

La méthodologie a l'avantage d'être générique dans sa structure et peut être utilisée pour les différents procédés employés pour la fabrication directe. Les contraintes de fabrications sont cependant spécifiques à chaque procédé car liés aux phénomènes physiques mis en jeu au cours des processus de fabrication.

Dans le cadre de nos travaux de thèse, nous nous sommes particulièrement intéressés à la technologie de fabrication par projection de poudres. Ainsi, un modèle du processus de fabrication a été mis en place. Il permet d'évaluer et d'optimiser les stratégies de fabrication vis-à-vis des besoins fonctionnels, en permettant de prédire la géométrie finale des pièces, et des contraintes procédés en permettant de prédire les variations de paramètres de fabrication. Ce modèle a été particulièrement mis à profit au cours de nos travaux pour alimenter la méthode d'optimisation de trajectoires, par ailleurs proposée, pour la fabrication de pièces à parois minces.

Mots-clés : méthode de conception, fabrication additive, projection de poudres, simulation de fabrication, optimisation, stratégie de fabrication.

Titre et résumé en anglais

Design for additive manufacturing methodology, applied to the laser cladding process

Manufacturers are constantly encountering tough international competition. In order to stay competitive they have to develop new products with time and cost constraints always more significant. In this context, as a „tool-less“ and digital approach to manufacture, additive manufacturing presents companies with a wide and expanding range of technical and economic benefits. However, the additive manufacturing processes, as the others, have also their own characteristics and limits. Finally, to take advantages of the technological breakthrough which is additive manufacturing, a new way of designing products is needed.

This work deals with the development of a new methodology of design for additive manufacturing. Subdivided in four main steps, the proposed method allows from functional specifications and manufacturing process characteristics to define an optimised part geometry regarding both the functional objectives and the manufacturing constraints.

In the first step, manufacturing orientations are chosen from the functional entities and allow to propose a design area. The general topology of the part is then optimised in this area regarding the functional specifications and the global manufacturing constraints. In the third step, the accurate part geometry is generated from a choice of manufacturing trajectories and then goes to the manufacturing process simulation. The fourth and last step is to determine and compare each other the different geometries corresponding to all the possible choices of manufacturing strategy. At the end, the best suitable is selected. The proposed method structure is generic and can be applied to all the additive manufacturing processes. However, the physical phenomena involved during the manufacturing processes are different for each one; the manufacturing constraints can be thus also different.

This work deals more specifically with the laser cladding technology. Indeed, a physical model of this process has been proposed. It allows to estimate and optimise the manufacturing strategies regarding the functional needs and the manufacturing constraints. This model has been particularly used in the optimisation method of manufacturing paths which has also been developed in this work to manufacture thin wall metal parts.

Keywords: Design methodology, additive manufacturing, laser cladding, manufacturing simulation, optimisation, manufacturing strategies.

Discipline : Sciences de l'Ingénieur