



HAL
open science

Optimisation du processus d'ingénierie et de fabrication additive d'un matériau structuré avancé

Julien Gardan

► **To cite this version:**

Julien Gardan. Optimisation du processus d'ingénierie et de fabrication additive d'un matériau structuré avancé. Génie des procédés. Université de lorraine, 2021. tel-03191802

HAL Id: tel-03191802

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-03191802>

Submitted on 7 Apr 2021

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.

N° d'ordre attribué par la bibliothèque : L L L L L L L L L L L L L L L L

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme d'
HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES
Délivrée par l'Université de Lorraine

Spécialité : Sciences de matériaux
École Doctorale C2MP

Présentée et soutenue par

JULIEN GARDAN

Le 23 février 2021

**OPTIMISATION DU PROCESSUS D'INGÉNIERIE ET DE
FABRICATION ADDITIVE D'UN MATÉRIAU
STRUCTURÉ AVANCÉ**

Devant le jury composé de :

Parrain Scientifique : M. Arnaud DELAMÉZIÈRE, Professeur des universités

| | | |
|--|--|------------|
| M^{me} Hélène CHANAL | Maitre de conférences, SIGMA Clermont, Université Clermont Auvergne | Rapporteur |
| M. Benoit EYNARD | Professeur, Laboratoire Roberval, Université de Technologie de Compiègne | Rapporteur |
| M. Henri PARIS | Professeur, G-SCOP, Institut National Polytechnique de Grenoble | Rapporteur |
| M^{me} Nadège TROUSSIER | Professeure, CREIDD, Université de Technologie de Troyes | Examineur |
| M. Pascal LAFON | Professeur, LASMIS, Université de Technologie de Troyes | Examineur |
| M. Arnaud DELAMÉZIÈRE | Professeur, LEM3, GIP-InSIC, Université de Lorraine | Examineur |

Remerciements

Les travaux exposés dans ce manuscrit ont été réalisés au sein de l'EPF école d'ingénieur-e-s et de l'Université de Technologie de Troyes (UTT) au sein du Laboratoire des Systèmes Mécanique et d'Ingénierie Simultanée (LASMIS).

Mes premiers remerciements iront bien évidemment à mon parrain scientifique, Monsieur le Professeur Arnaud DELAMÉZIÈRE, et Monsieur le Professeur Pascal LAFON. J'exprime également de très chaleureux remerciements à Monsieur Naman RECHO et Monsieur Ali MAKKE sans lesquels un grand nombre de ces projets n'auraient pas été possibles.

Je remercie très respectueusement Madame la Maitre de conférences Hélène CHANAL, Messieurs les Professeurs Henri PARIS et Benoit EYNARD qui m'ont fait l'honneur d'accepter la tâche de rapporteur.

Je suis également reconnaissant auprès de Monsieur Jean-Michel NICOLLE, Directeur Général de l'EPF, Monsieur Eric SAVATERRO, Directeur des formations de l'EPF, Monsieur Olivier HORNER, Directeur de la recherche de l'EPF, et Monsieur Arnaud D'ABOVILLE, Directeur du campus de Troyes pour leur confiance et leur accompagnement. Je tiens à remercier Monsieur Xiao-Lu GONG pour son ouverture à d'autres compétences.

Merci à Monsieur Abdelatif MERABTINE pour le travail accompli ensemble et nos nombreuses discussions toujours enrichissantes.

Je tiens par ailleurs à remercier à nouveau tous les membres du jury qui m'ont fait l'honneur de se déplacer et de se libérer d'autres engagements pour assister à ma présentation.

La rédaction de ce manuscrit a été un travail passionnant mais également de longue haleine et sa finalité permet de remercier naturellement mon entourage qui a contribué à l'aboutissement de ce travail. Je remercie mes collègues de travail de m'avoir laissé rédiger ce mémoire quand les périodes charnières sont apparues. Je crois que notre camaraderie a été pendant un temps un atout dans le développement de ce parcours. Je pense à Marc, Anne, Elisabeth, Marion, Abdelatif, Nicolas, Cathel, Mahdi et bien évidemment Ali.

Je termine ces remerciements pour ma famille qui a participé à la construction de ce parcours.

« Il n'y a pas d'évolution sans liberté d'essayer »
François Dalle



À Marthe, Luc et Samuel
À mes parents

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| Table des figures | 9 |
| Liste des tableaux | 11 |
| Sigles et acronymes | 13 |
| Introduction | 15 |
| 1. Initiatives portées par l’ascension de la Fabrication Additive | 17 |
| 2. Démarche personnelle à travers ce mémoire | 19 |
| 3. Organisation du mémoire | 19 |
| | |
| Chapitre I. Contexte général | 21 |
| 1. La Fabrication Additive | 23 |
| 1.1. Principe de fabrication | 23 |
| 1.2. Processus d’ingénierie et de fabrication | 24 |
| 1.3. Technologies de Fabrication Additive | 26 |
| 1.4. Matériaux intelligents par fabrication additive | 29 |
| 1.5. Évolution de la Fabrication Additive | 30 |
| 1.6. Opportunités et verrous | 34 |
| 2. Parcours personnel | 40 |
| 2.1. Historique | 40 |
| 2.2. Situation actuelle | 41 |
| 3. Bilan | 43 |
| | |
| Chapitre II. Développement des activités liées à la Fabrication Additive | 45 |
| 1. Introduction | 47 |
| 2. Activités pédagogiques et de recherche | 47 |
| 2.1. Plateforme de Fabrication Additive | 47 |
| 2.2. Activités pédagogiques | 48 |
| 2.3. Activités de recherche | 51 |
| 3. Encadrements | 54 |
| 3.1. Encadrements de thèses et de stages | 54 |
| 3.2. Participation à des jurys de thèse | 55 |
| 3.3. Animations et responsabilités..... | 55 |
| 3.4. Collaboration avec des chercheurs étrangers | 56 |
| 3.5. Collaborations industrielles | 62 |
| 3.6. Projets régionaux et internationaux | 62 |
| 4. Bilan | 63 |
| | |
| Chapitre III. De l’ingénierie intégrée aux solutions d’optimisation d’un matériau structuré par impression 3D | 65 |
| 1. Introduction | 67 |
| 2. Conception intégrée pour la fabrication additive à travers une approche « peau et squelette » et une optimisation multi-objectifs | 67 |
| 2.1. Définition du Design For Manufacturing (DFM)..... | 68 |
| 2.2. Design For Additive Manufacturing - DFAM | 69 |
| 2.3. Approche DFM-peau et squelette pour la fabrication additive | 70 |
| 2.4. Optimisation bi-objectif et application..... | 74 |
| 2.5. Bilan | 86 |

| | |
|--|------------|
| 3. Développement et étude d'un matériau structuré par impression 3D afin d'améliorer la résistance à la rupture | 87 |
| 3.1. Impression 3D des échantillons..... | 88 |
| 3.2. Simulation numérique | 88 |
| 3.3. Essais de traction avec des échantillons C-T | 91 |
| 3.4. Résultats et discussion..... | 92 |
| 3.5. Conditions de mesures par corrélation d'images | 94 |
| 3.6. Étude du champ de déformation..... | 95 |
| 3.7. Facteur d'intensité de contrainte (SIF) | 98 |
| 3.8. Bilan | 100 |
| 4. Bilan général | 102 |
| | |
| Chapitre IV. Discussion | 103 |
| 1. Introduction | 105 |
| 2. Technique, connaissance et savoir-faire..... | 105 |
| 3. La place de l'humain dans un processus 4.0..... | 108 |
| 4. Généralisation de la démarche..... | 109 |
| | |
| Conclusion et perspectives..... | 111 |
| | |
| Bibliographie: | 121 |
| Curriculum Vitae détaillé..... | 135 |

Table des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1. Processus d'ingénierie et de Fabrication Additive (Gardan, 2016)..... | 26 |
| Figure 2. Technologies de Fabrication Additive (Asadollahi-Yazdi et al., 2018) | 27 |
| Figure 3. Types d'orientation pour des éprouvettes en FDM pour des essais de traction (Cantrell et al., 2017) | 28 |
| Figure 4. Matériaux intelligents : (a) Réseaux spécifiques, (b) Métamatériaux et cellule auxétique, (c) Optimisation topologique multi-matériaux, (d) Matériau à mémoire de forme (SMM, Shape Memory Material) 1D et (e) 3D avec autoassemblage, (f) Polymère électro (Gardan, 2019) | 29 |
| Figure 5. Les moteurs de nouveaux paradigmes sont le marché et les besoins de la société «La révolution mondiale de la fabrication» (Koren, 2010)..... | 31 |
| Figure 6. Évolution du nombre de machines industrielles de fabrication additive vendues (Wohlers et al., 2016)..... | 32 |
| Figure 7. Examen du marché de la fabrication additive de 2014 à 2027 (SmarTech Markets, 2019) | 33 |
| Figure 8. Exemples de pièces industrielles pour l'aéronautique, le spatial et le naval (Édito, Région Occitanie / Pyrénées-Méditerranée). | 34 |
| Figure 9. Courbe des attentes pour les technologies d'impression 3D - Hype Cycle Chart réalisé par le cabinet Gartner ("Hype Cycle for 3D Printing", 2018)..... | 36 |
| Figure 10. Formation de billes fondues et délamination de couches par EBM avec un acier inoxydable (Sames et al., 2016) | 39 |
| Figure 11. Parcours professionnel de 2015 à 2019 | 41 |
| Figure 12. Plateforme Fabrication Additive à Troyes, TechLab | 48 |
| Figure 13. Exemples de réalisations en projet pédagogique | 49 |
| Figure 14. Schéma de principe du moulage de la mousse à cellules ouvertes. Moule en plâtre par impression 3D et procédé de fabrication utilisant le moulage par infiltration.. | 53 |
| Figure 15. Activités à l'international avec le BCIT de Vancouver et l'université de Shanghai | 57 |
| Figure 16. Phononic Crystal Artifact | 58 |
| Figure 17. Appareil de mesure par ultrason | 58 |
| Figure 18. Spécifications d'impression 3D, caractéristiques microscopiques spécifiées et mesurées, données de masse et de densité apparente, durées de propagation, la vitesse des ondes de pression et le module apparent de Young pour les artefacts..... | 59 |
| Figure 19. Topologies des ondes ou les formes d'ondes de T185 à T210 | 60 |
| Figure 20. Méthode d'analyse par Éléments Finis pour un PCA prédéfini | 61 |
| Figure 21. Principaux centres de recherche actifs sur le sujet de la fabrication additive en France (Futur de La Fabrication Additive PIPAME, 2017)..... | 64 |
| Figure 22. Relations procédé / matériau / géométrie (Ashby et al., 2004) | 69 |
| Figure 23. Approche Peau et Squelette (Skander et al., 2008) | 72 |
| Figure 24. Structure générale de l'approche peau et squelette pour le DFAM (Asadollahi-Yazdi et al., 2018) | 73 |

| | |
|--|-----|
| Figure 25. FBS du crochet | 76 |
| Figure 26. (a) Structure obtenue par optimisation topologique comme peau d'usage (b) Utilisation du squelette comme flux de matière..... | 77 |
| Figure 27. Processus de détermination de l'ébauche 3D..... | 78 |
| Figure 28. Peau et squelette de fabrication | 79 |
| Figure 29. Caractéristiques de l'impression 3D du crochet..... | 80 |
| Figure 30. Paramètres utilisés pour définir la rugosité pour des pièces fabriquées par FDM (Pandey et al., 2003)..... | 81 |
| Figure 31. Solution optimale obtenue par NSGA-II pour un problème d'optimisation à deux objectifs | 84 |
| Figure 32. Crochet imprimé en 3D selon une solution optimale | 85 |
| Figure 33. Trajectoire classique par dépôt FDM | 88 |
| Figure 34. Trajectoire de dépôt selon les directions principales..... | 90 |
| Figure 35. Extension de fissure : échantillons classiques (non optimisés) (a) et échantillons optimisés (b) | 91 |
| Figure 36. Résultats des essais de fracturation, comparaison entre les résultats d'impression non optimisés (à gauche) et les résultats d'impression optimisés (à droite). | 92 |
| Figure 37. Résultats du test de fracturation d'un échantillon optimisé : (a) Courbe de la charge par rapport au déplacement. Le champ de déformation avec des photos instantanées a été analysé par DIC. Les résultats sont montrés en (b)..... | 95 |
| Figure 38. Résultats du test de fracturation d'un échantillon classique : (a) Courbe de déplacement de charge. Le champ de déformation avec des photos instantanées a été analysé par DIC. Les résultats sont montrés en (b)..... | 96 |
| Figure 39. Champ de contrainte dans les échantillons fissurés (a) pour l'échantillon classique et (b) pour l'échantillon optimisé. Les encarts montrent le champ de déformation proche de la fissure. Pour l'échantillon optimisé, on peut distinguer les déformations plastiques résiduelles le long des lèvres de la fissure. | 97 |
| Figure 40. Comparaison de la longueur de fissuration d'une éprouvette optimisées et d'une éprouvette classique | 98 |
| Figure 41. Éprouvettes de flexion en mode mixte I/II | 101 |
| Figure 42. Positionnement des projets développés dans le domaine de la fabrication additive..... | 109 |

Liste des tableaux

| | |
|---|-----|
| Tableau 1. Financements locaux, régionaux et internationaux pour la recherche et la pédagogie..... | 63 |
| Tableau 2. Types d'orientations et données de résistance à la traction pour différentes épaisseurs de couches et orientations collectées dans la littérature..... | 83 |
| Tableau 3. Paramètres du problème d'optimisation bi-objectif..... | 83 |
| Tableau 4. Solutions optimales pour un problème continu d'optimisation à deux objectifs | 84 |
| Tableau 5. Solutions optimales pour un problème d'optimisation discret à deux objectifs | 85 |
| Tableau 6. Résultats mécaniques d'échantillons classiques..... | 92 |
| Tableau 7. Résultats mécaniques des échantillons optimisés..... | 93 |
| Tableau 8. Liste des variables utilisées pour le calcul du SIF..... | 99 |
| Tableau 9. Résultats pour les échantillons C-T classiques..... | 100 |
| Tableau 10. Résultats pour les échantillons C-T optimisés..... | 100 |

Sigles et acronymes

ABS : *Acrylonitrile Butadiène Styène*

Afnor : *Association française de normalisation.*

AMF : *Additive Manufacturing Format*

AFPR : *Association Française de Prototypage Rapide.*

CAO : *Conception Assistée par Ordinateur (CAD, Computer-Aided Design).*

FA : *Fabrication Additive*

FAO : *Fabrication Assistée par Ordinateur (CAM, Computer-Aided Manufacturing).*

CSG : *Constructive Solid Geometry.*

DED : *Direct Energy Deposition*

DFA : *Design For Assembly.*

DFAM : *Design For Additive Manufacturing*

DFM : *Design For Manufacturing.*

DFMA : *Design For Manufacture and Assembly.*

DFX : *Design For "X" – Conception orientée ou guidée.*

DIC : *Digital Image Correlation*

DRX : *Diffraction de Rayons X*

EBM : *Electron Beam Melting*

EPF : *ex-École Polytechnique Féminine*

ETP : *Equivalent Temps Plein*

FA : *Fabrication Additive*

FDM : *Fused Deposition Modelling.*

FFF : *Fused Filament Fabrication*

GUI : *Graphical User Interface.*

HP : *Hewlett-Packard.*

IDEFØ : *Integration DEfinition for Function mOdeling ou SADT.*

ISO : *International Organization for Standardization.*

LOM : *Laminating Object Manufacturing.*

MIM : *Metal Injection Molding*

MIT : *Massachusetts Institute of Technology.*

MJM : *Multi-Jet Modeling.*

MUP : *Micro-Usine Personnalisée.*

NTIC : *Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication.*

NURBS : *Non-Uniform Rational B-splines – B-splines rationnelles non-uniformes.*

PEEK : *PolyEther Ether Ketone*

PEI (ULTEM) : *Polyetherimide*

PHP : *Hypertext Preprocessor.*

PIM : *Powder Injection Molding*

PLA : *Acide PolyLactique*

PLM : *Product Lifecycle Management – gestion du cycle de vie du produit.*

PLY : *Polygon File Format*

REPRAP : *REplicating RAPid prototyper.*

ROI : *Region Of Interest*

SADT : *Structured Analysis and Design Technique ou IDEFØ.*

SFF : *Solid Freeform Fabrication.*

SGDT : *Système de Gestion de Données Technique.*

SIF : *Stress Intensity Factor*

SLA : *StereoLithogrAphy.*

SLM : *Selective Laser Melting*

SLS : *Selective Laser Sintering – Frittage de poudre.*

SMAT : *Surface Mechanical Attrition Treatment*

STL : *Standard Tessellation Language*

UTBM : *Université de Technologie de Belfort Montbéliard*

UTC : *Université de Technologie de Compiègne*

UTT : *Université de Technologie de Troyes*

UTBM : *Université de Technologie de Belfort Montbéliard*

UTSEUS : *Université de technologie sino-européenne de l'université de Shanghai*

UTS : *Ultimate Tensile Stress*

3DP : *3D Printing*



Introduction

Les activités présentées dans ce mémoire s'inscrivent dans le domaine de la Fabrication Additive, et, plus précisément, dans le champ de l'ingénierie intégrée et des matériaux structurés (ou architecturés).

1. Initiatives portées par l'ascension de la Fabrication Additive

La Fabrication Additive, également appelée impression 3D, repose sur la possibilité de transformer des fichiers numériques en objets physiques grâce à une technologie de fabrication couche par couche qui s'oppose aux solutions soustractives par retrait de matière. Du premier brevet dans les années 80 à aujourd'hui, le domaine de la fabrication additive a traversé de nombreuses phases pour aboutir à un niveau d'attente très fort pour les avantages qu'il propose dans la fabrication de géométries complexes et la réduction du cycle de conception et de fabrication du produit. J'ai eu accès lors de ma formation entre 2000 et 2005 à des technologies de frittage de poudres par laser (Direct Metal Laser Sintering (DMLS)), de dépôt de fil chaud (Fused Filament Fabrication (FFF) ou Fused Depositing Modeling (FDM) – Dimension), d'impression 3D couleur sur plâtre (ZCorporation devenu 3D System), de dépôt par projection de cire et un peu plus tard à une technologie de projection de résine photosensible (Objet Eden 260v). Le principe de fabrication était alors connu par des experts mais très peu démocratisé au sein du grand public et essentiellement utilisé par les industriels en prototypage rapide. À partir de 2005, des chercheurs comme [Gershenfeld N, 2005] du MIT, ont étudié les conditions de production domestique d'objets grâce à des machines personnalisables avec le concept de « Fab Lab » (*Fabrication Laboratory*). Nous voyons apparaître simultanément des systèmes d'impression 3D en kit comme la Fab@Home (www.fabathome.org) développée par l'université de Cornell aux États-Unis ou la RepRap (Replicating Rapid prototyper, www.reprap.org) créée par l'université de Bath en Angleterre qui ouvrent de nouvelles voies dans la démocratisation de la production d'objets. En effet, d'après [De Rosnay J, 2006] nous verrons arriver sur le marché des imprimantes 3D portables, qui trouveront leurs applications dans les foyers, les garages, les petits ateliers. De Rosnay introduit cette technologie sous le nom de micro-usine personnalisée (MUP) et il prévoit une démocratisation des MUPs aux alentours de 2020. La démarche des MUPs consisterait à utiliser un logiciel de modélisation, concevoir ou télécharger sur Internet un prototype, puis le modifier, ajouter des couleurs, des graphiques ou des textes, pour enfin cliquer sur la touche *Print* afin de lancer son imprimante 3D. Les difficultés techniques et les

compétences nécessaires sont occultées dans ce principe, mais la démarche est décrite ainsi dans la littérature. Les ordinateurs personnels ont fourni la possibilité d'être producteur et publieur, puis Internet a permis la diffusion et la distribution à grande échelle (Anderson, 2004), et aujourd'hui, les imprimantes 3D personnelles ont ouvert la voie à la fabrication démocratisée. Par ailleurs, certains auteurs prévoient des difficultés économiques et juridiques (propriété intellectuelle...) qui aboutiront à des conflits entre grands producteurs d'objets standardisés destinés à la consommation de masse, et micro-PME ou propriétaires (une nouvelle classe d'utilisateurs des réseaux numériques capables de produire, diffuser, vendre des contenus non-propriétaires) capables de fabriquer leurs propres objets. Après avoir commencé ma thèse en 2008, les brevets expirés ouvrent le marché à d'autres fabricants proposant de nouvelles solutions d'impression 3D de type dépôt de filaments FDM à des prix abordables. Ainsi, de nombreux fabricants et investisseurs ont commencé à s'intéresser à la commercialisation de nouvelles machines. Depuis février 2011, un brevet majeur relatif au SLA (Stéréolithographie) a expiré (Hull, 1986). Les nouvelles technologies résultant de l'expiration des brevets apparaissent avec les solutions proposées par les sociétés DWS Systems (Italie) ou Formlabs (USA). Ainsi, l'expansion de nouvelles solutions dans le domaine de l'ingénierie numérique et l'accessibilité aux technologies d'impression 3D plus abordables ont ouvert de nombreuses voies de développement en recherche avec de nouvelles perspectives de fabrication directe dans l'industrie. La maîtrise du comportement des matériaux et la qualification des pièces conçues et produites par fabrication additive sont ainsi devenues un enjeu majeur. Dans cette dynamique, j'ai proposé différents projets qui ont abouti à une meilleure accessibilité à ces technologies afin de développer des activités d'enseignement et de recherche à travers des projets originaux portés par l'intégration des connaissances métiers dès la définition du produit ou dès la définition du dépôt de matière. Les secteurs de pointes, comme le médical, l'aéronautique et l'automobile, ont observé une mutation au niveau de leur pratique de conception, de fabrication ou de distribution pour évoluer vers une industrie 4.0 ou vers l'usine du futur. De plus, il est primordial de proposer des méthodologies de conception et de fabrication capables d'accompagner le concepteur et également d'optimiser les possibilités de structuration des matériaux pour étendre leurs usages.

2. Démarche personnelle à travers ce mémoire

Il est parfois nécessaire de faire un bilan de ses activités pour une meilleure compréhension de sa trajectoire professionnelle ou pour une recherche de sens avec une prise de recul sur son parcours professionnel. La société évolue à une vitesse effrénée, comme d'ailleurs la fabrication additive, les nouvelles technologies liées à Internet, les objets connectés (ex. Internet of Things (IoT)), etc. Nos méthodes d'enseignement sont également en perpétuelle évolution. Mon parcours a toujours gardé une cohérence dans le domaine de la fabrication additive mais au sein d'un environnement complexe entre l'évolution du monde de la recherche et de l'enseignement, confrontés tous deux à une réalité économique et politique. Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé en confrontation étroite avec des terrains d'étude et d'expérimentation. Ainsi, ce mémoire propose une rétrospective de mes activités menées jusqu'à aujourd'hui afin de définir les bases d'une réflexion utile pour envisager de nouvelles pistes.

3. Organisation du mémoire

Ce mémoire est composé de quatre chapitres.

Chapitre I. Contexte général

Le premier chapitre présentera l'évolution de la fabrication additive ainsi que son impact sur le processus de conception et de fabrication des produits. Mon parcours et mes projets seront également identifiés et positionnés dans ce contexte général.

Chapitre II. Développement des activités liées à la Fabrication Additive

Le deuxième chapitre se concentrera sur les activités pédagogiques et de recherche au sein de l'EPF et de l'UTT mais également pour les établissements d'enseignement supérieur Troyens. Il détaillera mes responsabilités et la gestion mise en place.

Chapitre III. De l'ingénierie intégrée aux solutions d'optimisation d'un matériau structuré par impression 3D

Le Troisième chapitre présentera les deux principaux projets de recherche initiés à travers une méthodologie de type Design For Additive Manufacturing qui a pour objectif de prendre en compte de nombreux critères de conception et de fabrication additive afin

d'aider le concepteur dans ses choix de conception. Ce chapitre présente également le développement d'un matériau structuré avancé (dans le domaine des matériaux intelligents ou matériaux architecturés) reproduisant des lignes de force afin d'optimiser la résistance mécanique à la rupture de pièces réalisées par dépôt de filaments en impression 3D.

Chapitre IV. Discussion

Ce chapitre est dédié à une réflexion plus générale sur l'utilisation de la technologie de fabrication additive et des méthodes proposées. Quelques observations et plusieurs constats sont étudiés pour développer la plus-value que pourrait apporter l'impression 3D dans une société de consommation plus exigeante.

Nous finirons ce mémoire par une conclusion générale qui revient sur les principaux apports de mes travaux et les perspectives de recherche qu'ils ouvrent.



Contexte général

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| 1. La Fabrication Additive..... | 23 |
| 1.1. Principe de fabrication | 23 |
| 1.2. Processus d'ingénierie et de fabrication..... | 24 |
| 1.3. Technologies de Fabrication Additive | 26 |
| 1.4. Matériaux intelligents..... | 29 |
| 1.5. Évolution de la Fabrication Additive | 30 |
| 1.6. Opportunités et verrous | 34 |
| 2. Parcours personnel..... | 40 |
| 2.1. Historique | 40 |
| 2.2. Situation actuelle | 41 |
| 3. Bilan..... | 43 |

1. La Fabrication Additive

1.1. Principe de fabrication

Dans les années 80, une première méthode, appelée prototypage rapide, est apparue pour créer un objet en 3 dimensions couche par couche par ajout de matière à partir d'un modèle CAO et d'une imprimante 3D. Le prototypage rapide regroupe un ensemble d'outils qui, agencés entre eux, permettent d'aboutir à des projets de représentation intermédiaire de la conception de produit (Aoussat et al., 2000). Pour l'AFPR¹ (Association Française de Prototypage Rapide qui devient France Additive en 2020), la notion de "prototypage rapide" signifie littéralement "fabrication rapide de modèles et prototypes" et désigne différents procédés permettant de restituer physiquement des objets 3D, à partir du modèle CAO, dans un temps beaucoup plus court que par des techniques classiques. Il contribue à la validation de différentes fonctions que doit remplir le produit (fonction d'usage, ergonomie, esthétique...). Comme l'avait souligné (Bernard and Taillandier, 1998), le prototypage rapide a fait rapidement ses preuves pour la réalisation d'objets créés numériquement ou pour la reproduction d'objets existants, éventuellement à une échelle différente. Actuellement, le prototypage rapide est désigné par différents termes, comme la fabrication rapide, l'impression 3D ou la fabrication additive, et repose sur plusieurs technologies de fabrication couche par couche qui permettent d'aboutir à une représentation physique du produit défini numériquement, appelée aussi bien modèle, que maquette ou prototype. (Barlier, 2003) note que la Fabrication Additive peut se résumer par quatre caractéristiques fondamentales : l'obtention rapide de formes intérieures et extérieures en 3D, des données qui proviennent d'une modélisation CAO dès le stade initial de la conception, l'absence de rupture de la chaîne informatique, et la fabrication par couches.

Georges Taillandier, président de l'AFPR en 2008, précise qu'il s'agit « *d'abord d'améliorer la réactivité de conception par rapport aux fluctuations du marché et à l'évolution des besoins. Mais aussi de favoriser la créativité et le développement de nouveaux concepts en design et en conception tout en simplifiant la communication entre client et fournisseur* » (Catherin, 2008).

La Fabrication Additive est largement utilisée pour la fabrication de prototypes mais aussi pour la production en petite série et des applications en outillage rapide (Stampfl and

¹ Site internet de l'association France Additive : www.franceadditive.tech

Hatzenbichler, 2014). Il devient primordial pour les entreprises de disposer d'outils permettant de matérialiser rapidement les produits en cours de développement, afin de détecter au plus tôt les erreurs de conception, de tester et de valider par l'ensemble des acteurs les différentes solutions techniques retenues.

La Fabrication Additive (FA) intègre trois notions fondamentales qui sont le temps, le coût et la complexité des formes (Aoussat et al., 2000) :

- **Complexité des formes** : L'impression 3D permet de réaliser des formes extrêmement complexes par rapport à d'autres procédés comme l'usinage qui dépendent d'un outillage (avec des angles parfois inatteignables).
- **Coût** : Cette technologie ne nécessite pas d'outillage et consomme un volume de matière quasi-égal au volume de la pièce. La facilité de reproduction d'une pièce permet d'explorer différentes variantes du produit.
- **Temps** : L'objectif de la FA est de diminuer le temps de développement d'un produit en fabriquant des modèles rapidement.

D'une technologie à une autre, la direction de fabrication, l'orientation du modèle et le comportement du matériau influencent la qualité du produit et nécessitent une maîtrise de ces technologies pour atteindre une production efficace (Beaman et al., 1997). Ainsi, ce principe de fabrication implique un comportement mécanique anisotrope. Par exemple, l'étude de l'anisotropie des pièces produites en Fused Depositing Modeling (Ahn et al., 2002) est une étape nécessaire pour bien anticiper la qualité de celles-ci.

1.2. Processus d'ingénierie et de fabrication

Les étapes de conception et de fabrication du produit montrent que le développement du cycle est spécifique à la FA. Les procédés de Fabrication Additive consistent à ajouter un matériau, telle que des résines, des cires, des poudres ou des stratifiés, qui servent de base à la construction de modèles ; ils font intervenir des équipements automatisés sophistiqués permettant de contrôler les techniques de traitement telles que le dépôt, le frittage, la fusion laser, etc (Dolenc, 1994). Il existe deux possibilités pour démarrer le processus d'ingénierie : commencer par un modèle virtuel ou un modèle physique. Le modèle virtuel créé en CAO peut être un modèle surfacique ou un solide et sera converti pour être utilisé en impression 3D. Le modèle physique quant à lui peut exister et il est alors nécessaire de le reproduire sous la forme d'un nuage de points et d'une triangulation via une méthode connue sous le nom de reverse engineering par numérisation 3D (Chua et al., 2010). Ainsi, le processus

commence par la définition d'un modèle 3D avant sa conversion au format STL (Standard Tessellation Language). Ce format a été créé par 3D Systems en 1987 et est devenu un standard pour la fabrication additive. Il offre l'avantage d'être facilement généré par tous les logiciels de CAO. Ce format est traité par un logiciel spécifique propre à la technologie d'impression 3D qui découpe le modèle en tranches pour obtenir un nouveau fichier contenant les informations de balayage et de fabrication couche par couche. Ce logiciel spécifique génère également des échafaudages pour maintenir automatiquement les géométries suspendues avec parfois la possibilité de contrôler certains paramètres de remplissage. Nous pouvons décomposer le cycle d'ingénierie et de fabrication en (Figure 1):

- Conception de la pièce en CAO ou ingénierie inverse par numérisation 3D ;
- Intégration des connaissances métiers pour adapter la pièce à la technologie de fabrication choisie ;
- Conversion de la géométrie au format d'échange (. STL, .PLY, .AMF...);
- Utilisation du fichier d'échange dans le logiciel spécifique à l'imprimante 3D ;
- Configuration et orientation de la pièce ;
- Tranchage de la pièce par le logiciel spécifique ;
- Fabrication des couches par ajout de matière ;
- Post-traitement.

Le dernier format d'échange est souvent la propriété du fabricant de la machine, mais il existe encore des solutions ouvertes qui permettent d'accéder au G-Code de fabrication (code qui traduit le parcours d'impression ou de balayage de la fabrication). Une machine de FA met en œuvre le dernier fichier pour réaliser la fabrication couche par couche. L'opérateur doit préparer la machine avec sa matière première (poudre, résine, bobine(s) de polymère...) et la source de fabrication (laser, tête(s) d'impression, cartouche(s) de liant...). Dans la plupart des cas, la matière non utilisée est nettoyée lors de la finition (ex. Technologie MJM) ou recyclée lors du post-traitement (ex. SLS, SLM, Technologies 3DP ; §1.3). Cette étape dépend de la forme fabriquée et de la nécessité éventuelle d'un maintien supplémentaire des géométries suspendues entraînant une perte de matière. L'étape de post-traitement comprend parfois un traitement thermique (ex. gradient thermique en SLM et relâchement des contraintes résiduelles) ou une infiltration d'un matériau afin d'obtenir la pièce finale (ex. 3DP ou SLS ; §1.3).

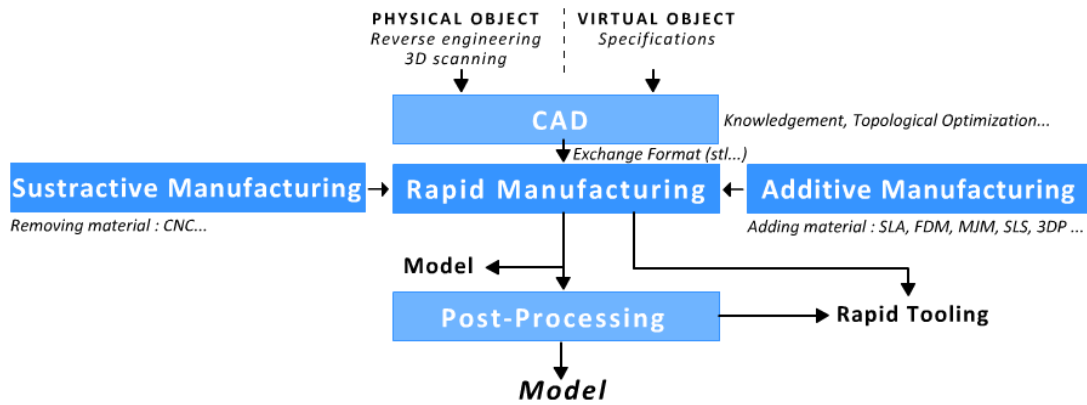


Figure 1. Processus d'ingénierie et de Fabrication Additive (Gardan, 2016)

À travers ce premier paragraphe, nous avons pu nous rendre compte que la relation entre le modèle numérique et les technologies d'impression 3D est complexe car la continuité de la chaîne numérique avec l'influence des contraintes de fabrication est encore peu maîtrisée. Il est nécessaire de connaître les différentes technologies de Fabrication Additive pour en déduire les contraintes d'usage et de fabrication nécessaires à la bonne conception du produit.

1.3. Technologies de Fabrication Additive

Il existe de nombreuses technologies de FA et le nombre de fabricants s'est multiplié en conséquence de l'intérêt qu'elles suscitent auprès des industriels. Cette section présente succinctement les principales technologies pour la bonne compréhension de la suite du mémoire (Figure 2).

L'extrusion de matière se concentre principalement sur un procédé d'extrusion d'un filament thermoplastique. Le Fused Depositing Modeling (FDM) est une marque déposée par Stratasys Inc à la fin des années 80. Le terme équivalent est Fused Filament Fabrication (FFF). Le filament est extrudé à travers une buse pour imprimer une couche en balayant la section à fabriquer, puis la buse se déplace verticalement pour répéter le processus vers la couche suivante. Les matériaux les plus utilisés en FDM sont l'ABS, le PLA et le PC (polycarbonate), mais il est possible de trouver de nouveaux filaments chargés en farine de bois, en fibres courtes et d'autres polymères (PEI (ou ULTEM©) ou PEEK avec des propriétés mécaniques, chimiques et thermiques à hautes performances). La technologie FDM est la plus répandue et la plus accessible sur le marché des imprimantes 3D. Elle a été inventée dans les années 1980 par Scott Crump (Crump, 1992, 1994).

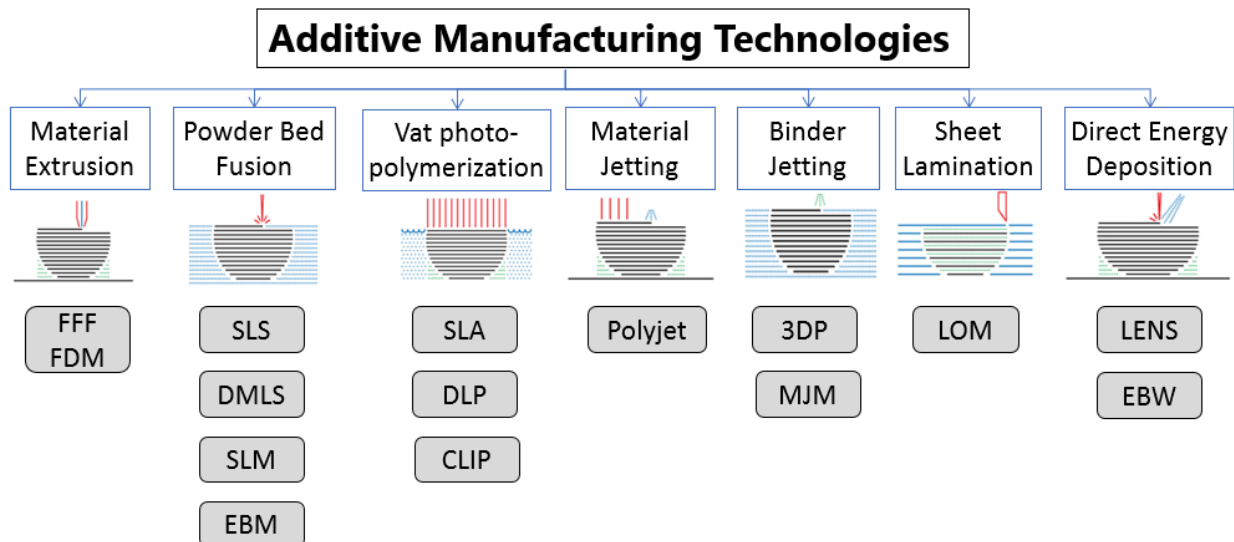


Figure 2. Technologies de Fabrication Additive (Asadollahi-Yazdi et al., 2018) ISO/ASTM 52900

Les technologies de fusion sur lit de poudre impliquent l'utilisation d'un laser. Les plus connues sont le SLM (Selective Laser Melting) et le SLS (Selective Laser Sintering). Le Dr Deckard et le Dr McClure ont inventé le SLS en 1988 (Deckard and McClure, 1988). Le processus de fabrication commence par rependre une fine couche de poudre polymère ou métallique étalée par un rouleau ou un racloir. Un puissant faisceau laser fusionne ensuite la poudre exactement aux points définis par les données de conception générées par ordinateur. Ensuite, la plateforme de fabrication s'abaisse et une autre couche de poudre est appliquée. Une fois encore, le matériau est fondu de manière à se lier à la couche inférieure aux points prédéfinis ("EOS", 2018). Au cours du processus, des couches successives de poudre métallique sont entièrement fondues et consolidées les unes sur les autres dans le cas du SLM. Les fabricants d'imprimantes 3D proposent aujourd'hui des machines dotées d'une puissante technologie laser double ou multiple, avec des couches allant de 75 à 150 µm d'épaisseur. Les matériaux proposés sont l'acier, l'acier inoxydable, le chrome cobalt, le titane et l'aluminium.

La photopolymérisation dans un bain de résine utilise le balayage d'un laser (SLA, Stéréolithographie) et a été inventé en 1984. Trois semaines avant que l'américain Chuck Hull ne dépose son brevet, les français Alain Le Mehaute, Olivier de Witte et Jean Claude André ont déposés un brevet sur le processus de la stéréolithographie (Cependant cette demande fut abandonnée). La projection d'images (DLP, Digital Light Processing) projette l'ensemble de la couche, et pas seulement des lignes ou des points. Cette méthode permet de construire beaucoup plus rapidement une pièce en diminuant le temps de fabrication en

se substituant au balayage par laser (ex. Phidias technologies, Prodways). Il existe d'autres technologies qui utilisent ce principe de fabrication couche par couche comme le MJM (Multi Jet Modeling) qui dépose des gouttes de résine photosensible dans une enceinte à rayonnement ultraviolet (UV) ou le 3DP (3D Printing) qui utilise un liant pour agglomérer une poudre de type plâtre, céramique ou sable (Gardan, 2016).

Lorsque vous découvrez les technologies de fabrication additive et que vous pouvez en utiliser certaines, les experts savent que plusieurs contraintes de fabrication et comportements mécaniques entraînent des modifications au niveau du modèle 3D ou au niveau du processus de fabrication et de post-traitement. L'orientation de fabrication du modèle influe sur la qualité de la géométrie et sa conformité dimensionnelle (Figure 3). L'orientation de la pièce peut modifier la planéité, la circularité et la rugosité de la surface. La structure interne du produit, la répétition de sa géométrie (ex. treillis, nid d'abeille...) et les paramètres de remplissage génèrent des contraintes d'utilisation qui doivent être intégrées. Nous pouvons citer dans une liste non exhaustive l'anisotropie et les contraintes résiduelles ou encore le vieillissement UV des polymères. D'une imprimante 3D à une autre, la précision est souvent déterminante pour obtenir un produit fiable ou un mécanisme fonctionnel. De plus, le post-traitement, le post-usinage ou le post-finissage sont souvent nécessaires pour obtenir un produit fini. Le recyclage et le coût des matières premières doivent également être pris en compte. Pour résumer, un ensemble d'étapes doit être défini en amont pour évaluer les implications de la technologie de fabrication additive dans le cycle de conception d'une pièce. L'enrichissement des données métiers améliore considérablement le processus d'ingénierie et de Fabrication Additive.

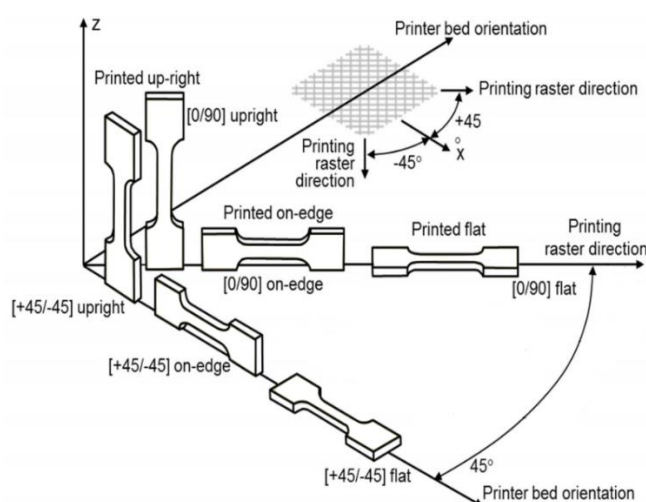


Figure 3. Types d'orientation pour des éprouvettes en FDM pour des essais de traction (Cantrell et al., 2017)

1.4. Matériaux intelligents par fabrication additive

Cette section présente une classification des matériaux intelligents afin de positionner le travail de recherche sur l'étude d'un matériau structuré ou architecturé (Chapitre 3, §3) qui propose d'améliorer la résistance à la rupture de pièces fabriquées en FDM. La figure 4 illustre la classification des matériaux intelligents comportant des matériaux pré-structurés et des matériaux réactifs (Gardan, 2019).

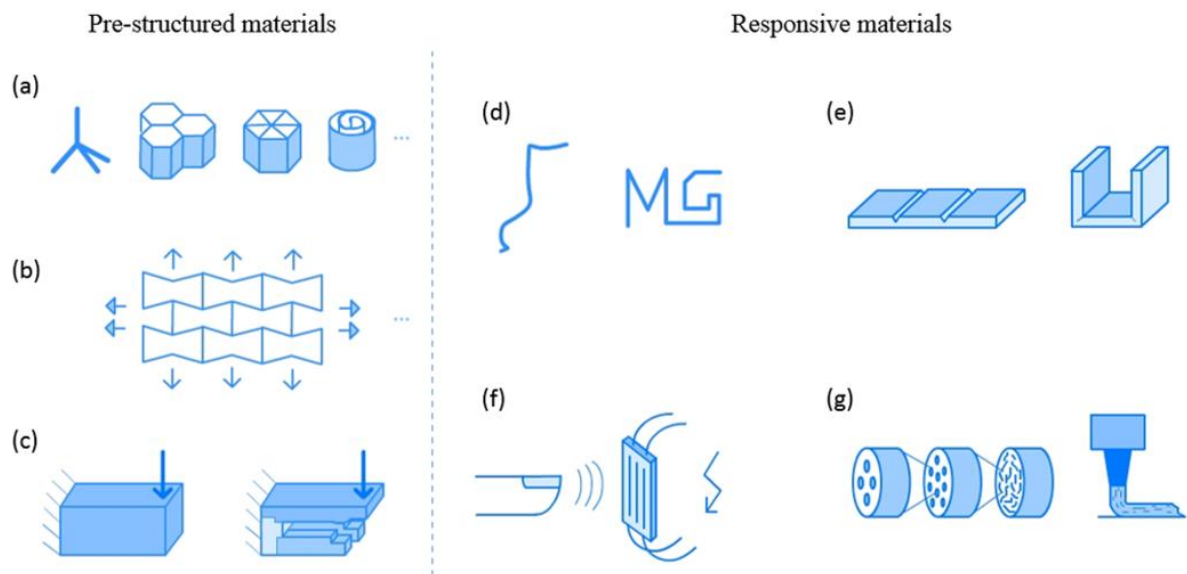


Figure 4. Matériaux intelligents : (a) Réseaux spécifiques, (b) Métamatériaux et cellule auxétique, (c) Optimisation topologique multi-matériaux, (d) Matériau à mémoire de forme (SMM, Shape Memory Material) 1D et (e) 3D avec autoassemblage, (f) Polymère piézoélectrique, (g) Biomimétisme et nanostructures (Gardan, 2019)

Les matériaux structurés avancés reposent sur une définition statique de formes complexes ou sur la combinaison des matériaux afin d'obtenir une ou plusieurs propriétés répondant à une fonctionnalité prédéfinie, comme un matériau intelligent ou fonctionnalisé sans transformation dans le temps. Dans de nombreux domaines d'application, le développement de nouvelles méthodes et de nouveaux processus doit être accompli au moyen de techniques de modélisation et de simulation précises et fiables (Andreas Öchsner et al., 2012). Ils se traduisent par des exigences spécifiques telles que des matériaux intelligents à haute résistance pour les véhicules et les grandes structures spatiales, des matériaux aux propriétés mécaniques, thermiques ou électriques prédéfinies, des matériaux pour la conversion d'énergie à haut rendement et des matériaux avec des systèmes de détection ou de compensation intégrés pour la fiabilité et la sécurité (Gates and Hinkley, 2003). Plusieurs études montrent différentes méthodes pour améliorer les propriétés de la

structure des matériaux construite en impression 3D. Par exemple, Vesenjak et al. (Vesenjak et al., 2010) ont étudié les effets sur les panneaux sandwich allégés produits par fabrication additive. D'autres études ont abouti à la conception et à la fabrication de structures renforcées (Galantucci et al., 2008), des nids d'abeilles (Abramovitch et al., 2010) ou des formes de cellules, comme des "tetrachirales" (Abramovitch et al., 2010) ou des "hexachirales" (Prall and Lakes, 1997) (figure 4 (a)). Le développement de réseaux spécifiques est également utilisé dans les nanostructures et présente de nombreux avantages, en particulier pour la fabrication de nanostructures métalliques par addition de matière (Haggui et al., 2012; Hubert et al., 2005; Mao et al., 2017).

Les matériaux réactifs sont basés sur le processus d'impression 4D qui démontre un changement radical dans la fabrication additive. Il s'agit d'impressions multi-matériaux avec une capacité de transformation dans le temps, par exemple la capacité de changer de formes (Gardan, 2019). Bien que la technologie d'impression 3D ait été utilisée pour créer des structures statiques à partir de données numériques, l'impression 4D ajoute le concept de modification de la configuration imprimée au fil du temps, en fonction de stimuli provenant de l'environnement d'utilisation. Les structures se transformeraient en forme ou en fonction en tenant compte de tout stimulus environnemental qui agit comme un catalyseur (ex. apport de chaleur, humidité, rayonnement UV...). Ainsi, les matériaux à mémoire de forme (Shape Memory Material, SMM) rassemblent des alliages à mémoire de forme (Shape Memory Alloy, SMA) ainsi que des polymères à mémoire de forme (Shape Memory Polymer, SMP) qui peuvent changer de formes à la suite d'une déformation importante lorsqu'un stimulus externe est appliqué (Shape Memory Effect, SME). Par exemple, Neri Oxman et le Media Lab du Massachusetts Institute of Technology ont récemment développé une plate-forme de fabrication numérique sur la base d'un matériau composé d'eau utilisant un polymère renouvelable provenant de l'océan pour améliorer les objets et les bâtiments avec des matériaux biologiques capables de s'adapter, de réagir et d'interagir avec leur environnement (Duro-Royo et al., 2015; Oxman, 2011). De nombreux projets en impression 4D reproduisent par mimétisme des structures complexes reconfigurables pour l'autoassemblage et dites auto-évolutives.

1.5. Évolution de la Fabrication Additive

Le marché et les besoins de la société ont profondément modifié le paradigme de fabrication des produits (Figure 5). Ils ont également modifié nos modes de consommation,

soutenus par de nouveaux moyens de communication et de distribution. La personnalisation des produits a déclenché une production de masse pour répondre au désir de l'utilisateur avec un délai d'acquisition réduit. Aujourd'hui, la fabrication additive semble apparaître comme la réponse à la personnalisation de masse et plus encore à la production personnalisée.

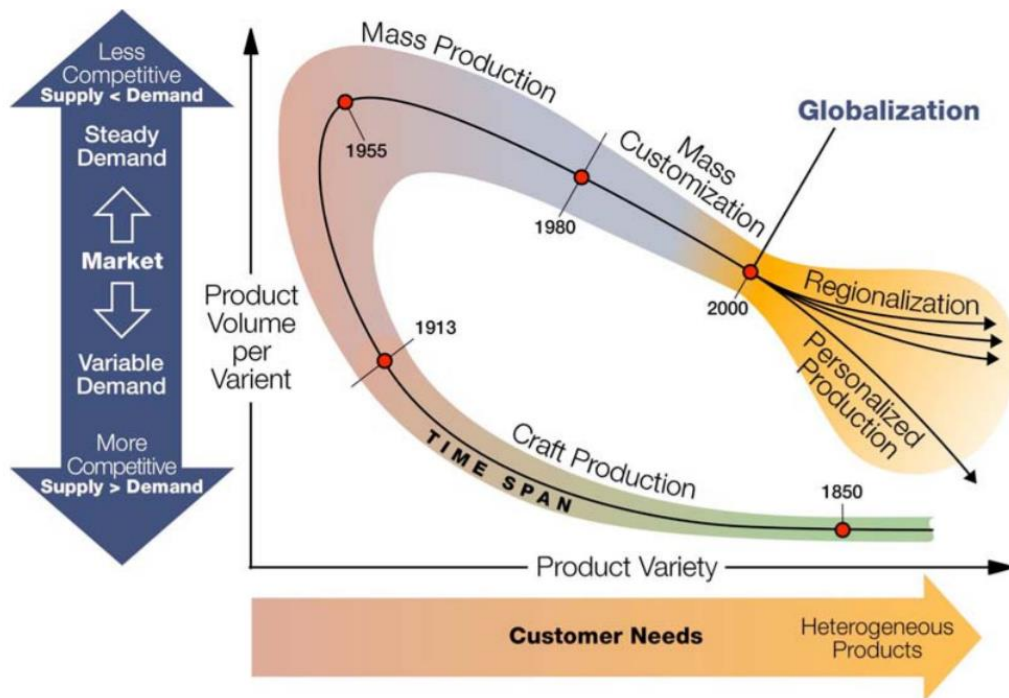


Figure 5. Les moteurs de nouveaux paradigmes sont le marché et les besoins de la société
«La révolution mondiale de la fabrication» (Koren, 2010)

Selon le rapport Wohler de 2014, les imprimantes 3D grand public sont classées dans la catégorie des imprimantes dont le coût est inférieur à 5 000 dollars (Wohlers and Caffrey, 2013). L'Université Cornell et l'Université de Bath ont conçu les premières imprimantes 3D personnalisées open sources avec la Fab@home et la RepRap en 2005 (Malone and Lipson, 2007; Sells et al., 2010). Les imprimantes 3D d'entrée de gamme sont principalement basées sur la technologie FDM, mais plus récemment, des machines dérivées de la Stéréolithographie (SLA) sont arrivées sur le marché en raison de l'expiration de certains brevets. Il est généralement démontré que les machines à faible coût ont des performances inférieures. Par exemple, la technologie grand public FDM induit des déformations de pièces (Es-Said et al., 2000) ainsi qu'un choix limité de matériaux thermoplastiques. À l'inverse, une imprimante professionnelle FDM coûte entre 10 000 et 300 000 dollars. Les systèmes basés sur la fusion laser ou le faisceau d'électrons

peuvent coûter entre 300 000 et 1 million de dollars (“3D Printer Landscape”, n.d.). Ces machines sont généralement très performantes mais leur coût reste élevé. Les sociétés qui vendent des imprimantes 3D professionnelles sont 3D Systems (qui a acheté ZCorporation en 2011), Stratasys (qui a acquis Objet en 2013), Hewlett Packard, AddUp, Prodways, Markforged, Desktop Metal, Solido LTD, Voxeljet et ExOne, etc. La fabrication des machines de production et leur implantation sont en forte augmentation depuis une vingtaine d’années (Figure 6).

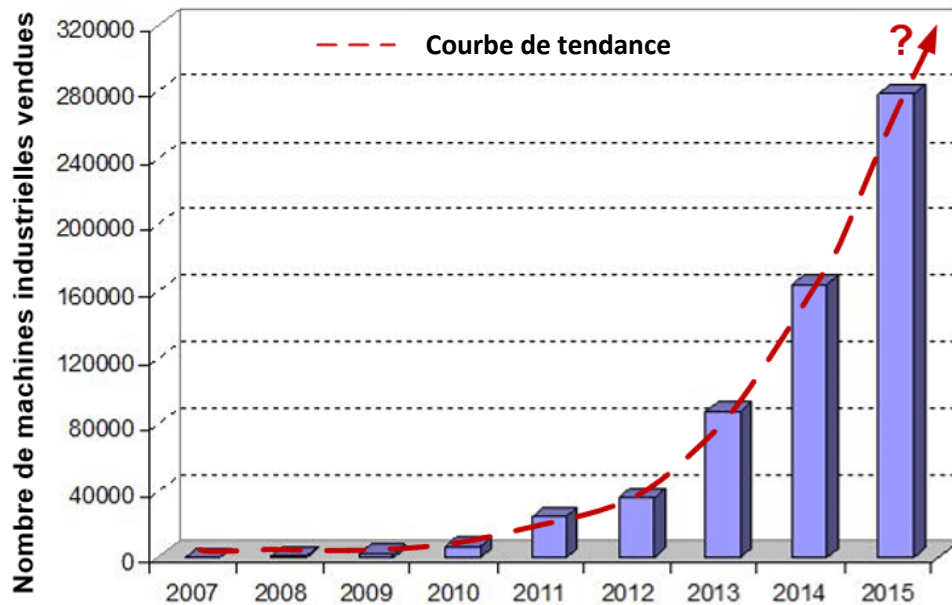


Figure 6. Évolution du nombre de machines industrielles de fabrication additive vendues (Wohlers et al., 2016)

Chaque technologie de Fabrication Additive a des contraintes liées à la technologie d'impression, au matériau utilisé et aux fonctions attendues (esthétique, mécanique, utilisation...). Les domaines d'intérêt qui utilisent l'impression 3D pour fabriquer des pièces sont l'aéronautique, l'architecture, l'industrie automobile, l'art, la dentisterie, la mode, l'alimentation, la bijouterie, la médecine, la pharmacie, la robotique et l'industrie des jouets (Bourell et al., 2009). Les technologies de fabrication additive sont devenues incontournables dans de nombreux secteurs industriels et jouent également un rôle important dans l'industrie 4.0.

Le rapport de fin d'année du cabinet américain SmarTech Publishing annonce 9,3 milliards de dollars de recettes pour le marché de la fabrication additive en 2019 (SmarTech Markets, 2019). À titre de comparaison, elles étaient de 4,1 milliards en 2014. Ce chiffre, qui couvre le matériel, les logiciels, les matériaux et les services, représente une augmentation de 18 % par rapport à 2017. En 2019, le marché de l'impression 3D a dépassé

la barre symbolique des 10 milliards pour atteindre les 11,2 milliards de dollars. Dans son nouveau rapport intitulé « 2019 Additive Manufacturing Market Outlook and Summary of Opportunities », le cabinet SmarTech, qui est considéré comme une autorité fiable dans l'observation de la fabrication additive dans le monde, présente un résumé et une prévision de l'ensemble de l'industrie de la fabrication additive de 2014 à 2027 (Figure 7).

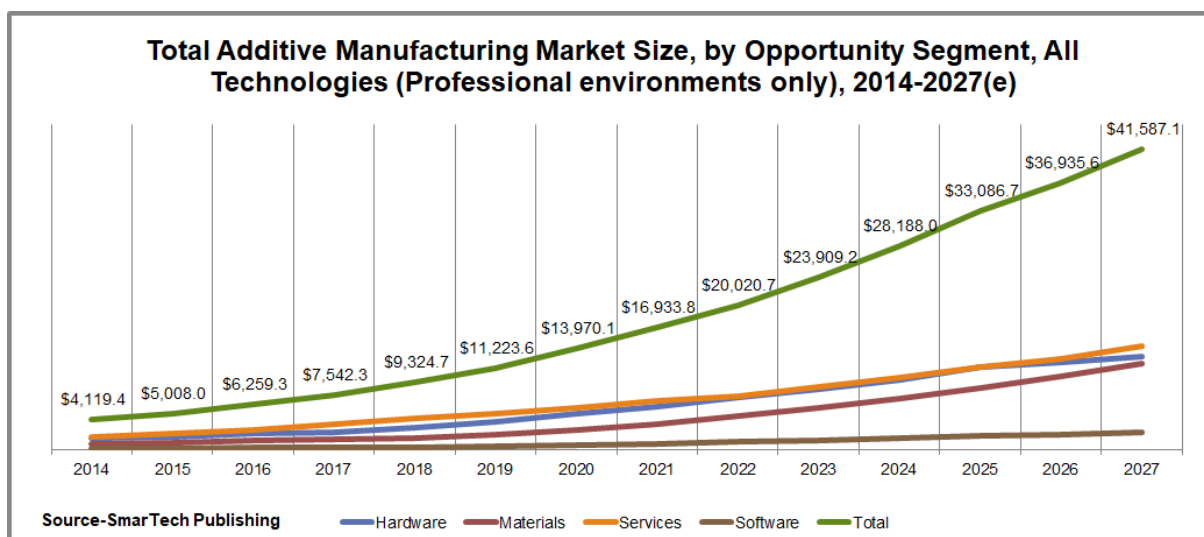


Figure 7. Examen du marché de la fabrication additive de 2014 à 2027 (SmarTech Markets, 2019)

Il est primordial pour de nombreux secteurs d'activité, comme l'aéronautique, l'automobile, le ferroviaire ou le médical, de maîtriser le comportement physique des pièces produites par impression 3D pour leur qualification dans un cadre d'utilisation extrêmement exigeant (Lasi et al., 2014; Petrovic et al., 2011). Les constructeurs automobiles exploitent cette technologie pour développer les nouveaux produits plus rapidement sur le marché. Les entreprises aérospatiales s'intéressent à ces technologies en raison de leur capacité à réaliser des produits très complexes de hautes performances. L'intégration de fonctionnalités mécaniques, la diminution des assemblages et la création de fonctionnalités internes (telles que des canaux de refroidissement (Pelaingre et al., 2003), des structures internes en nid d'abeille, ou une nouvelle structure obtenue par optimisation topologique (Schneider et al., 2013), etc.) se combinent pour créer des structures mécaniques plus légères (Figure 8).

Les industries médicales s'intéressent également à la fabrication additive en raison de la facilité avec laquelle les données d'imagerie médicale 3D peuvent être converties en objets physiques. De cette façon, les dispositifs peuvent être personnalisés pour répondre aux

besoins d'un patient spécifique (Campbell et al., 2012). Ainsi, chaque technologie de FA présente des avantages et des inconvénients associés à des applications bien spécifiques de personnalisation, d'allègement de structure, et de conception de pièces complexes. Dans cette dynamique, de nouvelles normes ont été définies par l'International Organization for Standardization (ISO)² afin de qualifier les méthodes et le cadre de fabrication :

- [ISO 17296-2:2015](#) : Additive manufacturing - General principles - Part 2: Overview of process categories and feedstock. Elle décrit les principes de base du processus de FA avec les processus existants et les différents types de matériaux utilisés.

- [ISO 17296-3:2014](#) : Additive manufacturing - General principles - Part 3: Main characteristics and corresponding test methods. Elle couvre les principales exigences appliquées avec les principales caractéristiques de qualité des pièces, les procédures appropriées et les recommandations.

- [ISO/ASTM 52910:2018](#) : Additive manufacturing -- Design -- Requirements, guidelines and recommendations. Il est en cours de développement depuis 2015 et rassemblera les bonnes pratiques de conception afin d'obtenir un produit fiable.



Figure 8. Exemples de pièces industrielles pour l'aéronautique, le spatial et le naval (Édito, Région Occitanie / Pyrénées-Méditerranée).

1.6. Opportunités et verrous

Dans les nouvelles pratiques portées par le « grand public », nous assistons à l'apparition de nouveaux participants dans la création de produits appelés « pronétaires »³ par (De Rosnay and Revelli, 2005), qui représentent « *une nouvelle classe d'usagers des réseaux numériques capables de produire, diffuser, vendre des contenus numériques non propriétaires..., ils utilisent pour cela des outils analogues à ceux des professionnels et*

² International Organization for Standardization: www.iso.org

³ **Pronétaire** est un néologisme créé par Joël de Rosnay en 2005 à partir du grec *pro* (devant, avant, mais aussi favorable à) et de l'anglais *net* (réseau). Il s'emploie comme nom commun et est un clin d'œil au mot *prolétaire*.

facilement accessibles sur Internet ». Ces acteurs sont considérés comme des *professionnels amateurs* dans le tissu économique et social, et également appelés « *Makers* ». Ces nouveaux acteurs ne vont pas se contenter de produire des produits numériques (textes, musique, vidéo...). Des outils leur donnent désormais la possibilité de fabriquer des objets physiques à partir d'imprimantes 3D (De Rosnay, 2007).

Au départ utilisé en prototypage rapide, la fabrication additive ou l'impression 3D s'est imposée industriellement pour la fabrication directe de pièces fonctionnelles. L'outillage rapide est un domaine très présent grâce à sa complémentarité avec les systèmes de production à l'instar de l'impression 3D de moules en sable par 3DP (3D Printing). La fabrication directe est le domaine d'application le plus récent grâce aux nombreux progrès et innovations proposés ces dernières années (ex. multiplication des sources laser, photopolymérisation par projecteur DLP...). L'hybridation des technologies « classiques » avec la fabrication additive pour produire une pièce ou un outillage est un sujet d'intérêt pour les industriels. Un exemple récent est l'émergence d'un système hybride associant l'impression 3D par projection directe de poudres métalliques (DED) et l'usinage par commande numérique à travers la solution LASERTEC Additive Manufacturing proposée par DMG MORI © qui accélère la réalisation du produit fini. La capacité de production des technologies proposées est limitée et le contexte d'industrialisation lié à une cadence de production freine l'intégration des imprimantes 3D. Quatre principales opportunités peuvent être résumées et adaptées de (Ponche, 2013):

- **La liberté de conception :** La géométrie de la pièce n'est pas limitée par les contraintes présentes dans un procédé de fabrication conventionnel. La conceptualisation d'un produit est plus ouverte et les fonctionnalités du produit peuvent être optimisées grâce à une structure complexe. La répartition de la matière est facilitée pour réduire la masse des pièces et ainsi diminuer la consommation des véhicules.
- **L'impact économique et environnemental :** L'ajout de matière réduit la consommation en matière première avec peu de déchets. La masse de matériau utilisé ainsi que, dans certains cas, l'énergie nécessaire à sa mise en forme sont ainsi minimisées (Serres et al., 2011). De nouveaux modèles économiques, basés sur la fabrication de pièces de rechange, donnent une seconde vie à des appareils qui pourraient devenir obsolètes.
- **La flexibilité :** Un concepteur peut vérifier rapidement le fonctionnement d'un mécanisme et la Fabrication Additive est adaptée à la production en petite série en

s'affranchissant d'outillage onéreux. Elle dépend également moins des pièces standardisées utilisées pour des assemblages et diminue l'implication d'un grand nombre de pièces pour simplifier la conception. Cette flexibilité permet une production en flux tendu avec diminution des stocks (Baumers et al., 2016).

- **La personnalisation :** La conception d'une pièce par Fabrication Additive peut s'adapter plus facilement au besoin. Ainsi, une production à l'unité pour un besoin spécifique est possible sans surcoût par rapport à une production en série dépendant d'un outillage.

Du fait des avantages qu'elle procure, la Fabrication Additive suscite un intérêt et des attentes très fortes, notamment pour les produits personnalisables, les dernières technologies de fabrication métallique, la réalisation d'appareils médicaux personnalisés, la bio-impression ou son intégration dans la chaîne logistique (Supply Chain) (Figure 9).

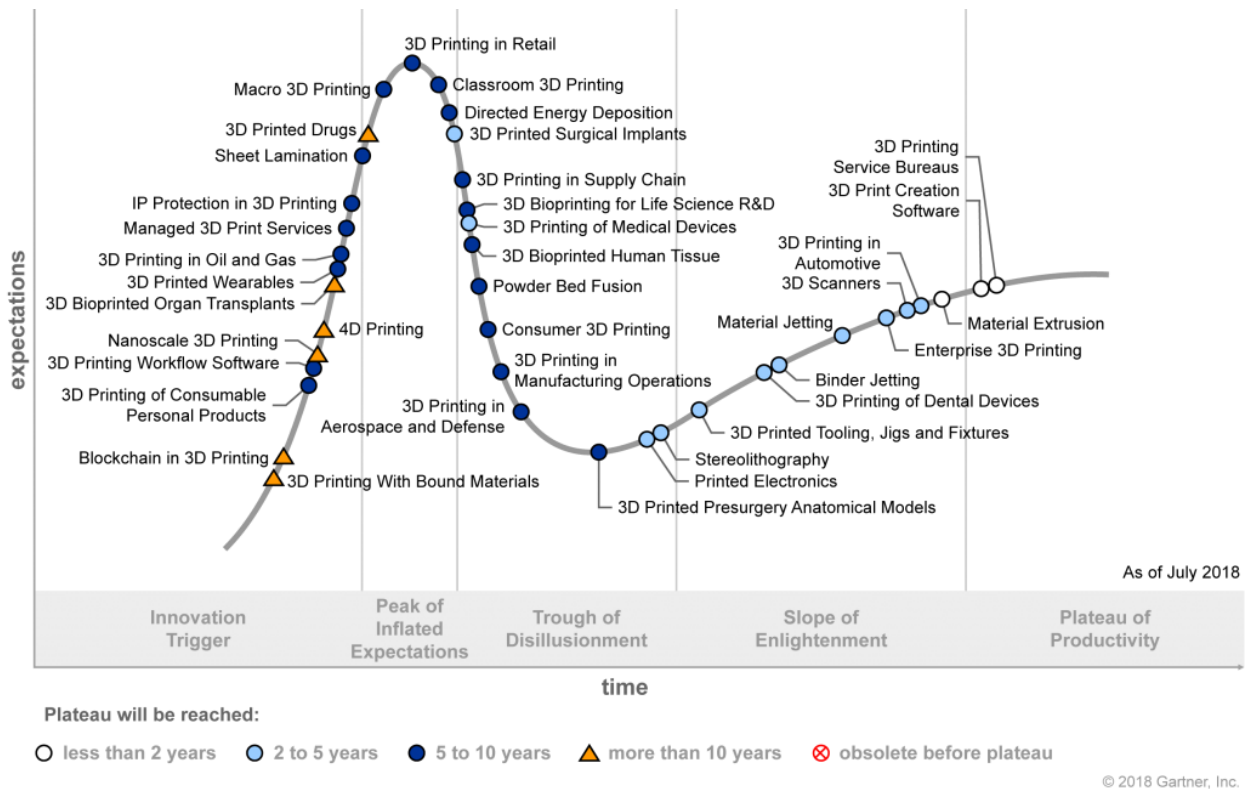


Figure 9. Courbe des attentes pour les technologies d'impression 3D - Hype Cycle Chart réalisé par le cabinet Gartner ("Hype Cycle for 3D Printing", 2018)

L'utilisation de ce principe de fabrication est relativement récente et de nombreux problèmes de qualification de pièces sont traités par des industries de pointe comme l'aéronautique ou le médical. Des verrous scientifiques et technologiques sont actuellement identifiés :

- **Comportements physiques non-maitrisés :** L'anisotropie des pièces et l'implication même des technologies de fabrication influencent la structure spécifique et le(s) matériau(x) utilisé(s). Les phénomènes physiques impactent la qualité dimensionnelle et la résistance mécanique des pièces avec une compréhension bien différente des procédés de fabrication conventionnelle. D'une vision macroscopique, où la structure des pièces ressemble à un composite, à une observation méso et microscopique, où l'empilement des couches, la fusion des grains, ou la soudure des filaments jouent un rôle important, nous pouvons conclure que de nombreux critères influencent la fiabilité d'une pièce et induisent un comportement mécanique spécifique suivant une technologie et une géométrie donnée.
- **Cycle de conception et de fabrication incomplet :** Ce manque de connaissances des phénomènes physiques observées lors de la fabrication (ex. déformation, retrait, gauchissement...) et lors de l'usage du produit (ex. délaminage, fissuration, rugosité...) implique une conception difficilement maitrisable. En effet, la géométrie du produit et son orientation au sein de la machine d'impression 3D influencent ses caractéristiques d'usage. Il existe quelques outils d'ingénierie numérique qui peuvent guider le concepteur dans les choix de conception et de fabrication pour prendre en compte des contraintes physiques (ex. Technologie SLM, prise en compte du transfert thermique, et placement des pièces via Materialise Magics...), mais il n'existe pas de méthodologies générales permettant d'aider le concepteur à exploiter ces opportunités (Mellor et al., 2014). Toute la chaîne numérique, de la définition du produit jusqu'à sa fabrication additive, nécessite une méthodologie spécifique.

Si nous revenons sur l'impression 3D métallique par fusion sur lit de poudre dans laquelle une source d'énergie, un laser dans le cas de la fusion sélective au laser (SLM) ou un faisceau d'électrons dans la fabrication par faisceaux d'électrons (EBM), fusionne les particules de poudre métallique couche par couche, nous observons que les systèmes de fusion à lit de poudre disposent de mécanismes permettant de contrôler la puissance et la vitesse de balayage de la source d'énergie et la distribution de la poudre qui induisent des comportements physiques influençant le résultat final. Un certain nombre de problèmes peuvent se produire lors de l'impression ("7 Issues to Look Out for in Metal 3D Printing", 2017). Ceux-ci incluent :

- **L'état de surface :** La poudre métallique produit une surface rugueuse même si des particules de poudre plus fines et des épaisseurs de couche plus fines peuvent être imprimées. Il est parfois plus économique d'utiliser des particules de taille légèrement supérieure car les pièces subiront un certain niveau de post-traitement par usinage.
- **La porosité :** De très petites cavités se forment dans les pièces, ceci est causé par le procédé d'impression 3D lui-même ou même par la poudre utilisée. Ces trous microscopiques réduisent la densité globale de la pièce et peuvent provoquer des fissures, ce qui accélère l'endommagement des pièces lors d'efforts variables (en fatigue).
- **La densité :** La porosité d'une pièce est liée à sa densité. Plus une pièce a de pores, moins elle est dense et plus elle est susceptible de souffrir de fatigue ou d'amorçage de fissurations. Une densité supérieure à 99% est requise pour les applications critiques.
- **Les contraintes résiduelles :** Les contraintes résiduelles résultent du chauffage et du refroidissement, de la dilatation et de la contraction qui se produisent pendant la fabrication additive métallique. Lorsque la contrainte résiduelle dépasse la résistance à la traction des couches supports, des défauts, tels que des fissures, un délaminage, ou un gauchissement, peuvent apparaître. L'étude des contraintes résiduelles par DRX (Diffraction de Rayons X) est une thématique importante étudiée par le LASMIS notamment avec leur prise en compte dans les analyses numériques visant à prédire la durée de vie des pièces. Le grenailage de précontrainte est un traitement de renforcement de surface développé par le laboratoire qui permet des gains considérables de durée de vie des pièces métalliques (SMAT- Surface Mechanical Attrition Treatment).
- **La fissuration :** Une fissuration peut se produire lorsque le métal fondu se solidifie mal en provoquant un délaminage (Figure 10). Si la source d'énergie est trop forte, une stratification non désirée peut survenir pendant le processus de solidification.
- **Le gauchissement :** Les couches initiales d'une impression 3D sont liées à un support qui doit être retiré ou découpé par usinage une fois l'impression terminée. Cependant, si la contrainte thermique dépasse la résistance mécanique du support, le support commencera à se déformer, ce qui entraînera finalement le gauchissement de la pièce et risquera de provoquer une collision lors de la fabrication.

- **Et les autres :** D'autres déformations, telles que le gonflement ou la formation de billes, peuvent également se produire pendant le processus d'impression 3D métallique. Le gonflement se produit lorsque le métal solidifié s'élève sur la poudre. De la même manière, des billes de matière fondue sont créées lorsque le matériau se solidifie en une forme sphérique au lieu de couches solides (Figure 10). Ceci est dû à des problèmes liés à la tension superficielle liée au bain de fusion.

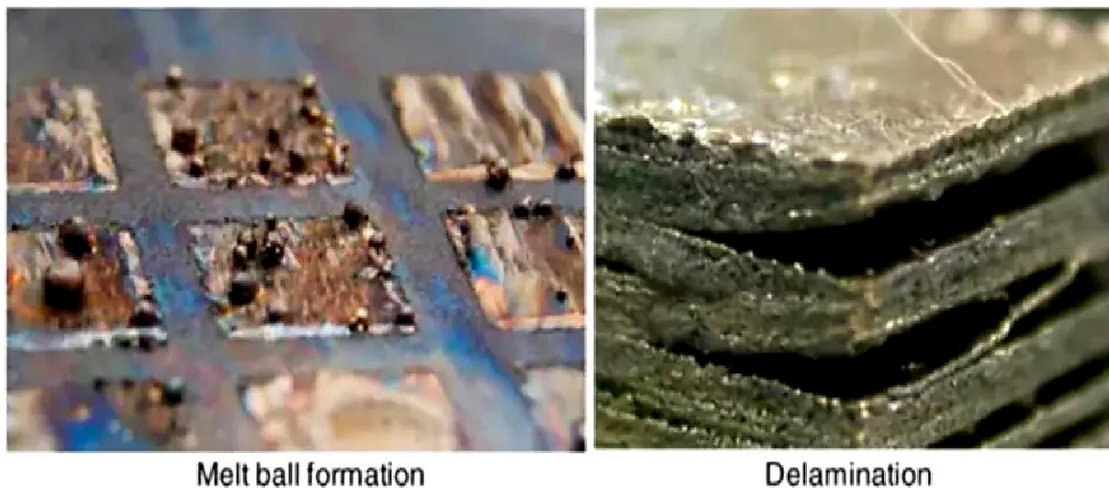


Figure 10. Formation de billes fondues et délamination de couches par EBM avec un acier inoxydable (Sames et al., 2016)

Comme présenté ci-dessus et pour confirmer les arguments précédents, pour éviter les problèmes liés à la fabrication additive, il est nécessaire d'enrichir les connaissances à travers des essais de caractérisations et des retours d'expériences. Chaque géométrie modifie les paramètres de fabrication de la machine obligeant souvent les fabricants à imprimer plusieurs fois la même pièce afin de surmonter des problèmes tels que le gauchissement, la fissuration et la porosité. Nous pouvons citer des paramètres influents en impression 3D laser comme la puissance du laser, la vitesse de balayage du faisceau laser ou la distance de hachurage (espacement de balayage) (Li et al., 2014). Ensuite, les composants doivent être testés pour s'assurer qu'ils répondent aux normes appropriées. Les règles de conception sont influencées par l'orientation selon laquelle une pièce est imprimée. L'orientation définit la géométrie avant la construction couche par couche et peut affecter le résultat. Différentes orientations d'impression sont souvent testées avant de choisir la meilleure car il est difficile de prévoir le résultat. L'imbrication de nombreuses pièces dans une construction peut réduire considérablement les coûts de fabrication. Il est donc important de prendre en compte la production dès la conception car l'agencement des pièces nécessite souvent un compromis.

L'industrialisation ouvre des opportunités pour mieux comprendre les contraintes et les comportements mécaniques des produits fabriqués par impression 3D. De plus, il est nécessaire d'intégrer au plus tôt des modèles de prédiction et d'optimisation du processus de conception et de fabrication pour déterminer la géométrie, l'orientation, l'emplacement et la stratégie de remplissage.

Dans la suite des chapitres, des travaux de recherche ont été entrepris pour déterminer une méthodologie de type conception pour la fabricabilité par impression 3D (Design For Additive Manufacturing - DFAM) et pour concevoir un matériau structuré par dépôt de matière afin d'optimiser le comportement mécanique. Dans un registre plus large, la place de l'humain et l'impact de ces nouvelles technologies sur l'économie et notre mode de vie sont également discutés afin d'approfondir une réflexion générale.

2. Parcours personnel

2.1. Historique

Après avoir obtenu mon Master en Ingénierie et Production Assistée par Ordinateur (IPAO) en 2015, formation spécialisée en ingénierie numérique construite autour des nouveaux procédés et nouvelles technologies (impression 3D, simulation, réalité virtuelle, numérisation 3D...), une opportunité m'a encouragé à créer une entreprise sur la base d'une idée originale soutenue par Oseo (BPI France): la création d'un salon virtuel sur Internet. Cette première expérience a duré 6 ans avec la création de 3 emplois et la possibilité de réaliser une thèse de doctorat dans l'entreprise Arduinnova dans le cadre d'une convention Cifre de 2008 à 2011 inscrite à l'Université de Technologie de Troyes (UTT). Les résultats de recherche ont permis de créer une nouvelle société en 2011 afin de les valoriser sans pour autant trouver un partenaire commercial. Après avoir réalisé plusieurs prestations pour des industriels, tout en terminant sur un résultat net d'exploitation positif, une nouvelle opportunité est apparue pour répondre à l'ouverture d'un poste dans l'enseignement supérieur en 2013 à l'EPF (École d'ingénieur-e-s). Ce premier parcours était principalement porté par plusieurs projets innovants orientés développement de produits et services (Figure 11).

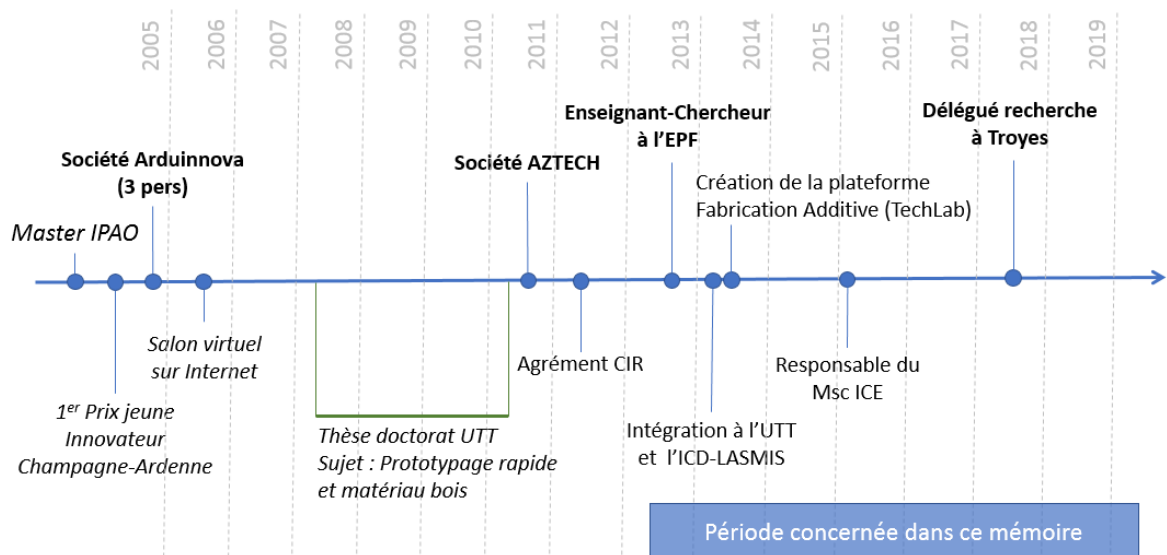


Figure 11. Parcours professionnel de 2015 à 2019

2.2. Situation actuelle

Je suis actuellement enseignant-chercheur à l'EPF de Troyes intégré à l'ICD-LASMIS (Institut Charles Delaunay – Laboratoire d'ingénierie numérique et mécanique) de l'UTT, responsable de l'Ingénierie Système et d'un Master of Science en Innovation, Creativity & Entrepreneurship (ICE). J'ai mis en place une plateforme de Fabrication Additive à l'EPF comportant cinq technologies différentes d'impression 3D (polymère, résine, plâtre et métallique). J'ai également participé au conseil de perfectionnement de l'EPF de 2016 à 2018. Mes enseignements sont décrits en annexe A dans le curriculum vitae détaillé. L'EPF (ex-École Polytechnique Féminine) est une des premières Grandes Écoles créée en 1925 en France à former des femmes aux métiers d'ingénieur(e)s. Depuis cette date, elle a formé plus de 9 500 diplômé(e)s réparti(e)s dans tous les secteurs de l'industrie et des services. Depuis 1994, l'école n'est plus réservée aux femmes. Malgré cela, et grâce à son historique et son expérience, l'EPF reste l'une des écoles où le taux d'inscription des filles est le plus élevé (36% contre 28% dans les autres écoles d'ingénieurs). Chaque promotion est ainsi composée de 300 élèves pour la formation généraliste et de 20 à 30 élèves pour les formations bi-diplômantes. Grâce à sa réputation d'excellence, l'EPF noue des contacts privilégiés avec des institutions régionales et départementales ainsi qu'avec des pôles de recherche. L'école a pu ainsi ouvrir un campus à Troyes en 2010 puis à Montpellier en 2012. Depuis 1938, l'EPF est habilitée par la Commission des Titres d'Ingénieur (CTI) à délivrer le titre d'ingénieur avec une reconnaissance par l'État depuis 1943. En 1976, l'École devient membre de la Conférence des Grandes Écoles (CGE). En 1993, elle intègre

l'UGEI (Union des Grandes Écoles Indépendantes) après avoir obtenu le statut de fondation reconnue d'utilité publique en 1991, et depuis, la fondation EPF gère l'école d'ingénieur-e-s avec le statut d'EESPIG (Établissement d'Enseignement Supérieur Privé d'Intérêt Général). Le pôle de recherche en mécanique de l'EPF a pour objectif l'étude de la durabilité des matériaux et des structures neufs ou dégradés et la maîtrise de leur sûreté de fonctionnement. Il se préoccupe des problématiques scientifiques et technologiques liées aux matériaux, procédés de fabrication et processus de production.

L'équipe LASMIS de l'ICD (Institut Charles Delaunay) a été initialement créée en 1994 comme le Laboratoire des Systèmes Mécaniques et d'Ingénierie Simultanée. Ce laboratoire est l'un des 3 laboratoires de recherche historique de l'UTT. Il a d'abord été reconnu comme « équipe d'accueil, EA3171 » en 1999 puis associé au CNRS en 2004 (FRE 2719). En 2006, dans le cadre de la politique nationale de regroupement d'unités de recherche en composantes de taille critique suffisante, le LASMIS a participé à la création de l'Institut Charles Delaunay de l'UTT. L'équipe LASMIS s'attache à développer des méthodes d'ingénierie pour concevoir et élaborer des composants fortement sollicités. Plus précisément, il s'agit donc d'intervenir sur certains points critiques du cycle de vie du composant permettant :

- D'identifier et de maîtriser les phénomènes physiques qui surviennent au cours de la mise en forme et du traitement des matériaux car ceux-ci conditionnent les propriétés de service des composants,
- D'intégrer ces nouvelles connaissances et méthodologie dans le processus de développement pour garantir et optimiser les performances du couple composant/procédé.

Pour cela les activités de l'équipe sont organisées selon quatre thèmes :

- Ingénierie de précontraintes.
- Procédés de mise en forme, formage virtuel.
- Conception intégrée et ingénierie virtuelle
- Élaboration et caractérisation de matériaux innovants.

Depuis 2018, mon poste a évolué comme délégué recherche sur le campus de Troyes avec une mission de représentation de la recherche à l'EPF de Troyes sous la direction d'Olivier HORNER (Directeur de la recherche et de l'innovation à l'EPF) auprès de ses partenaires industriels et académiques, et d'accompagnement des sept enseignants-chercheurs et d'un ingénieur de recherche dans leurs projets. Dans le cadre de cette mission, je participe au CoDir de l'Institut Charles Delaunay de l'UTT. J'anime la thématique

« Procédés et Matériaux Avancés » de l'Institut des Services et Industries du Futur Troyes (ISIFT) qui a pour mission la mise en place d'une collaboration entre plusieurs établissements d'enseignement supérieur Troyens afin de faciliter le développement de projets de recherche transversaux.

Dans le cadre de mes activités, je suis amené à piloter des projets proposés par des entreprises, des laboratoires ou initiés par l'EPF. Plusieurs dossiers de financement ont été déposés avec obtention des fonds entre 2013 et 2019 sur un projet d'encadrement de thèse, d'investissements et un projet pédagogique autour de la Fabrication Additive nommé FabAdd-Académie (voir www.fabadd-academie.fr, ou annexe A). Nous pouvons également citer certains projets comme le développement d'orthèses personnalisées en partenariat avec le BCIT (British Columbia Institute of Technology de Vancouver) et la société NEUT (orthésiste à Troyes), la collaboration en transfert de technologies avec la société Axon'Cable pour le traitement de surfaces de pièces fabriquées par SLM ou notre engagement dans la réalisation de dispositifs personnalisés pour l'association d'hémiplégie.

Le principal projet porté par mes activités est actuellement notre travail sur le développement d'un « matériau intelligent » dans le domaine des matériaux avancés structurés impliquant un dépôt spécifique en impression 3D. Un projet de recherche sur le traitement de surface de pièces métalliques imprimées en 3D a été défini grâce aux compétences du Dr Mahdi CHEMKHI et notre intégration à l'ICD-LASMIS.

Actuellement, l'équipe de l'EPF de Troyes est composée de sept enseignants-chercheurs dont deux d'entre eux travaillent sur la fabrication additive avec le soutien d'un ingénieur de recherche impliqué à 30% ETP. Mon rattachement à l'ICD-LASMIS implique une collaboration élargie avec mes collègues chercheurs (optimisation et Design For Additive Manufacturing, mousse métallique pour le stockage d'énergie, dispositif rotatif d'impression 3D, traitement de surface SMAT (Surface Mechanical Attrition Treatment)).

3. Bilan

Ce premier chapitre décrit succinctement les technologies et l'évolution de la fabrication additive, et également le parcours du candidat afin de situer les activités présentées dans les chapitres suivants dans un contexte global. La liberté de conception, l'impact économique et écologique, la flexibilité et la personnalisation offerts par le principe de fabrication additive sont de véritables opportunités afin de répondre aux besoins de la société. Il en

résulte que la fabrication additive est un levier pour parvenir à une production plus personnalisée et optimisée avec la possibilité d'obtenir des solutions de conception innovantes. De nouvelles pratiques portées par l'évolution des technologies proposent des solutions d'impression 3D personnalisées accessibles par le consommateur. Les opportunités technologiques et économiques sont présentées, ainsi que les verrous scientifiques et technologiques pour appréhender les travaux de recherche associés.

Il est primordial pour les industriels d'avoir une meilleure compréhension du comportement physique des structures mécaniques obtenues par fabrication additive afin de maîtriser également le processus de conception et de fabrication en ingénierie. Cette démarche nous amène aux sujets de recherche étudiés et leurs contextes qui se focalisent sur les méthodologies de conception et de fabrication additive dans le cadre du Design For Manufacturing (DFM) pour intégrer au plus tôt les contraintes d'usage et de fabrication, mais également sur l'optimisation des structures à travers un dépôt spécifique de la matière dans le cadre du développement d'un matériau structuré (matériau intelligent ou fonctionnalisé) appliqué au domaine de la mécanique de la fracture. L'ensemble repose sur le principe selon lequel le modèle numérique doit être le garant d'une fabrication additive fiable. Ce mémoire se concentre essentiellement sur la période professionnelle de 2013 à 2020 (Figure 11). Ce parcours est jalonné par des projets pédagogiques et des projets de recherche associés à la création d'une plateforme technologique de fabrication additive, l'encadrement de trois thèses, d'un post-doctorat, de deux stages de Master 2 et la prise de responsabilités administratives. Le chapitre suivant présente le développement des activités liées à la fabrication additive d'un point de vue opérationnel.



Développement des activités liées à la Fabrication Additive

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| 1. Introduction | 47 |
| 2. Activités pédagogiques et de recherche | 47 |
| 2.1. Plateforme de Fabrication Additive | 47 |
| 2.2. Activités pédagogiques | 48 |
| 2.3. Activités de recherche | 50 |
| 3. Encadrements | 54 |
| 3.1. Encadrements de thèses et de stages | 54 |
| 3.2. Participation à des jurys de thèse | 55 |
| 3.3. Animations et responsabilités..... | 55 |
| 3.4. Collaboration avec des chercheurs étrangers | 56 |
| 3.5. Collaborations industrielles..... | 62 |
| 3.6. Projets régionaux et internationaux..... | 62 |
| 4. Bilan..... | 63 |

1. Introduction

Ce nouveau chapitre décrit mes activités pédagogiques et de recherches afin de détailler leur organisation et les responsabilités associées. La complémentarité de ces deux activités est un élément essentiel, portée par la conviction qu'elles s'enrichissent l'une et l'autre. La première introduit des sujets scientifiques et technologiques qui permettent d'avoir accès à des technologies de pointe ; la seconde bénéficie d'une ouverture nouvelle qui facilite la créativité et le développement des projets de recherche. Cette dernière est plus simple à mettre en place dans le cas d'une recherche appliquée avec un cas d'étude bien précis en y associant les étudiants et les enseignants. L'envie d'entreprendre et d'initier de nouveaux projets font également partis de cette approche. Ainsi, ces activités sont présentées dans une même section avec les résultats obtenus.

2. Activités pédagogiques et de recherche

2.1. Plateforme de Fabrication Additive

À mon arrivée en 2013 à l'EPF de Troyes, les étudiants n'avaient accès à aucune des technologies de fabrication sur les campus de l'EPF. Pour interpréter les difficultés liées à la fabrication dès la conception et permettre aux étudiants de matérialiser leur idée, il a été nécessaire d'entreprendre la création d'une plateforme technologique ou TechLab (Figure 12). Transmettre une culture technologique aux étudiants est essentielle pour appréhender les méthodes et les maîtriser. Ainsi, après avoir été la première plateforme de Fabrication Additive de l'EPF, d'autres TechLabs sont apparus sur les campus de Sceaux et de Montpellier. La plateforme de Fabrication Additive ou d'impression 3D de l'EPF est un lieu d'étude et d'échange pour l'émergence de projets innovants ou le lancement d'études de conception et de caractérisations dans différents domaines (prototypage, ingénieur numérique, caractérisation mécanique...).

Aujourd'hui, le TechLab Fabrication Additive de Troyes travaille sur des projets innovants comme les matériaux intelligents, les traitements de surfaces de pièces métalliques, les orthèses personnalisées obtenues par impression 3D et d'autres projets de recherche en étroite collaboration avec l'ICD-LASMIS. Il est équipé de :

- 8 imprimantes (FDM, 3DP couleurs, SLA) ;
- 1 imprimante 3D métallique (MarkForged, Metal X) ;

Développement des activités liées à la Fabrication Additive

- 1 commande numérique de type Stratoconception ;
- 2 scanners 3D et des moyens logiciel associés (Geomagic Design X).

Des outils complémentaires ont été associés pour couvrir plus largement la chaîne numérique de conception. Huit étudiants participent à la gestion de cette plateforme avec également un TechLab Manager. Il a été nécessaire de mettre en place un affichage de sécurité, une charte d'utilisation, un suivi des impressions, et d'organiser la maintenance et l'approvisionnement. Les investissements ont été définis sur la base des besoins en prototypages rapide :

- Valider des mécanismes et réaliser des pièces fonctionnelles ;
- Fabriquer des maquettes réalistes pour la Majeure Ingénierie et Architecture Durable de Troyes ;
- Produire des pièces précises avec des matériaux aux propriétés différentes ;
- Diversifier les développements vers des matériaux métalliques pour répondre à un besoin élargi.



Figure 12. Plateforme Fabrication Additive à Troyes, TechLab

Les moyens mis à disposition sont le support à de nombreux projets pédagogiques et de recherche. Le portage de projets repose sur la gestion des investissements et la recherche de fonds ainsi que la définition et la cohérence globale de la plateforme.

2.2. Activités pédagogiques

Les projets pédagogiques reposent sur une organisation et un lieu ouvert vers les étudiants, enseignants et chercheurs. Une idée, un projet innovant, un projet de recherche ou une demande formulée par une entreprise peuvent être pris en charge par le TechLab

Développement des activités liées à la Fabrication Additive

Fabrication Additive dans un cadre pédagogique. Nous avons plusieurs exemples (Figure 13) :

- Maquette d'implantation d'un projet d'urbanisme pour le Parc De La Villette ;
- Accompagnement de start-up (Snapshot & Romy) pour la réalisation de prototypes ;
- Rénovation d'une statuette pour le château de Montmirail (Axon'Cable) ;
- Développement d'orthèses personnalisées (société NEUT, projet BCIT, association d'hémiplégie) ;
- Réalisation de pièces mécaniques d'essais pour l'automobile (Mefro Wheels-Michelin, CKP Engineering).



Figure 13. Exemples de réalisations en projet pédagogique

Plusieurs cours utilisent ce support dans le cadre des projets de mécatronique en 2^{ème} année, des projets appliqués au mois de juin en 3^{ème} année, et de la Majeure Ingénierie et Architecture Durable, ainsi que du Master of Science ICE en 5^{ème} année. Les étudiants en cursus d'innovation et entrepreneuriat utilisent l'impression 3D pour la réalisation de leur prototype, ainsi que pendant leur incubation pour leur création d'entreprise à la technopole de l'Aube. Tous les projets sont accompagnés par un enseignant spécialisé dans un domaine (ex. mécanique, objet connecté, design...) ou un coach professionnel selon l'objectif du

Développement des activités liées à la Fabrication Additive

projet. Mes activités d'enseignement sont présentes dans mon curriculum vitae détaillé en annexe A.

Je suis également porteur d'un projet sur l'élaboration d'une formation sur la Fabrication Additive, FabAdd-Académie, menée par l'EPF, en partenariat avec l'UTT, l'ESTP, l'ESC et l'IUT de Troyes (URCA), et en lien avec le tissu industriel local. Monsieur Mahdi CHEMKHI participe également à son élaboration. Le projet consiste à mettre en place une mission d'ingénierie pédagogique permettant de procéder à l'analyse précise des besoins des entreprises et des établissements d'enseignements locaux afin de proposer des modules de formation. Cette action est financée par la région Grand Est et les établissements d'enseignement Troyens sur la base d'un dispositif nommé « Pacte Grands Écoles ». Cette mission est en cours de réalisation par un coordinateur pédagogique (M. Arthur GONTIER) recruté en octobre 2018 qui doit réaliser les actions suivantes :

- Procéder à une analyse précise des besoins industriels en matière de fabrication additive au sein du tissu industriel du secteur troyen, mais aussi au niveau national et international ;
- Proposer des modules de formation déclinables et assemblables qui pourraient constituer les briques élémentaires des compétences à diffuser au sein des entreprises du secteur à travers des formations initiales et/ou des formations continues ;
- À partir de ces modules, établir la trame des formations qui pourraient être élaborées par les établissements d'enseignement supérieur afin de satisfaire les besoins identifiés. Des formations en ligne, ou MOOC (Massive Open Online Course), sont aujourd'hui disponibles sur www.fabadd-academie.fr

Concrètement, nous avons commencé par concevoir une arborescence des compétences (ou référentiel de compétences) adaptées aux besoins des industriels tout en définissant un modèle économique viable pour pérenniser le projet. Cette étape est nécessaire afin de définir des parcours de formation. Une communication commune et une charte graphique à tous les établissements ont permis la création d'un premier site Internet vitrine qui sera également utilisé pour organiser les formations portées par les établissements. Des événements ont été organisés comme deux tables rondes qui ont eu lieu le 2 juillet 2019 à l'EPF de Troyes. La première table ronde était centrée sur l'ingénierie numérique et une autre sur les procédés additifs avec des conférenciers comme Prodways, AddUp, le CIRTES, IREPA-LASER, le Ctif, Micado, CoreTechnologie ou Platinum 3D. Une

nouvelle édition des tables rondes de FabAdd-Académie a été organisée le 21 octobre 2020 autour de deux thématiques, l'innovation pédagogique pour la Fabrication Additive et l'impression 3D du bâtiment du futur. Cet événement en ligne a rassemblé une centaine de personnes.

2.3. Activités de recherche

Des projets de recherche ont émergé grâce aux compétences présentes à l'EPF et l'UTT, les moyens à disposition et le projet scientifique de développement des sujets de recherche en fabrication additive autour de la conception intégrée et des matériaux intelligents. C'est lors de l'étude de fabricabilité que les incohérences apparaissent au niveau du modèle numérique. La fabrication additive s'inscrit parfaitement dans notre démarche d'ingénierie intégrée et de Design For Manufacturing afin d'étudier un nombre important d'informations qui influencent le processus de conception à la fabrication. Une boucle de reconception est parfois nécessaire pour modifier le produit afin d'obtenir un produit conforme en impression 3D. L'intégration de caractéristiques de fabrication additive en concordance avec les matériaux envisagés au moment de la conception permet d'optimiser le prototype final. Ainsi, nous avons pu mettre en œuvre :

- La caractérisation d'un modèle conçu par optimisation topologique et fabriqué par projection de résine (MJM) (Schneider et al., 2013)
- La caractérisation d'un filament de bois obtenu par dépôt additif pour étudier le comportement mécanique de produits en bois reconstitués (Gardan, Nguyen, et al., 2016; Gardan and Roucoules, L, 2014);
- Une méthode de caractérisation et d'amélioration de l'impression 3D par projection de liant appliquée à la qualité des textures (Julien Gardan, 2017) ;
- Le développement d'une orthèse pour le remodelage crânien d'enfants atteints de plagiocéphalie à travers un processus de numérisation 3D et d'impression 3D (Geoffroy et al., 2018);
- Une analyse thermique expérimentale et numérique de mousses d'aluminium à cellules ouvertes développées à travers un processus d'optimisation topologique et d'impression 3D pour la fabrication d'un moule perdu en plâtre pour la fonderie (Merabtine et al., 2018).

Deux projets de recherche principaux sont menés depuis 2014 :

- Une méthode pour la conception intégrée en fabrication additive via un modèle de développement de processus « peau et squelette » et d'optimisation multi-objectifs (thèse terminée en 2018 et réalisée par Mme ASADOLLAHIYAZDI) (Asadollahi-Yazdi et al., 2017, 2018) ;
- Une méthode pour améliorer la ténacité à la rupture en utilisant l'impression 3D FDM et une stratégie de renforcement d'un matériau structuré par dépôt de filaments (de 2014 à aujourd'hui. Thèse en cours avec M. ZOUAOUI depuis fin 2018) (Gardan, Makke, et al., 2016a; Gardan et al., 2018a, 2018b) ;

Pour ces travaux de recherche, deux états de l'art ont été réalisés pour appréhender les difficultés et leur positionnement. L'un concernait plus généralement les technologies de fabrication additive et ses tendances (Gardan, 2016), tandis que l'autre examinait les matériaux intelligents par FA et leurs classifications (Gardan, 2019). Ces deux derniers projets de recherche seront détaillés dans le chapitre 3, mais nous pouvons en décrire un autre pour observer la démarche et je propose le projet de « mousse d'aluminium » pour le stockage d'énergie thermique (j'ai participé à ce projet grâce au soutien du Professeur Xia-Lu GONG et du Dr Abdelatif MERABTINE).

Cette étude visait à analyser le comportement thermique de deux mousses métalliques bi-matériau composées d'une structure en aluminium et d'un matériau à changement de phase (paraffine). Un modèle classique composé d'un réseau hétérogène obtenu par l'utilisation de grains de sels placés dans un moule de fonderie pour préformer l'aluminium fondu, et un nouveau modèle conçu par optimisation topologique et fabriqué par impression 3D ont été proposés. Pour mesurer l'amélioration de la dissipation de chaleur, l'étude vise à comparer ces modèles, dont l'un est un modèle fabriqué à partir d'éléments périodiques aux formes obtenues par optimisation topologique, et l'autre, un modèle conçu sur la base d'éléments périodiques en forme de treillis. La solution originale provient d'une optimisation topologique basée sur le paramétrage des matériaux et de leurs comportements thermiques. Des simulations numériques utilisant la méthode des éléments finis (FEM) ont été réalisées afin d'étudier la cartographie thermique du flux de chaleur. Ce travail a montré que la mousse métallique optimisée présentait une température locale moins élevée car la chaleur est mieux diffusée que dans la structure classique où la chaleur est concentrée. L'écart est d'environ 10 °C entre les deux modèles. La forme optimisée à cellules ouvertes semble être une bonne solution pour le refroidissement d'un système comportant un

matériau à changement de phase. Comme illustré à la figure 14, le processus est basé sur un modèle 3D issu de l'optimisation topologique appliquée aux échanges thermiques. Une telle forme se rapproche des caractéristiques structurales proposées dans l'étude et est souvent utilisée dans la modélisation des mousses à faible densité. Après l'impression 3D des empreintes en plâtre, une étape de nettoyage est nécessaire pour extraire la poudre non durcie à l'intérieur du moule. Cette étape est également dimensionnée pour en déterminer le niveau de porosité afin de paramétrer le modèle CAO et d'extraire facilement la poudre. Le moule final en plâtre est utilisé en tant que moule à modèle perdu à travers un processus de coulée d'aluminium afin d'obtenir la mousse d'aluminium.

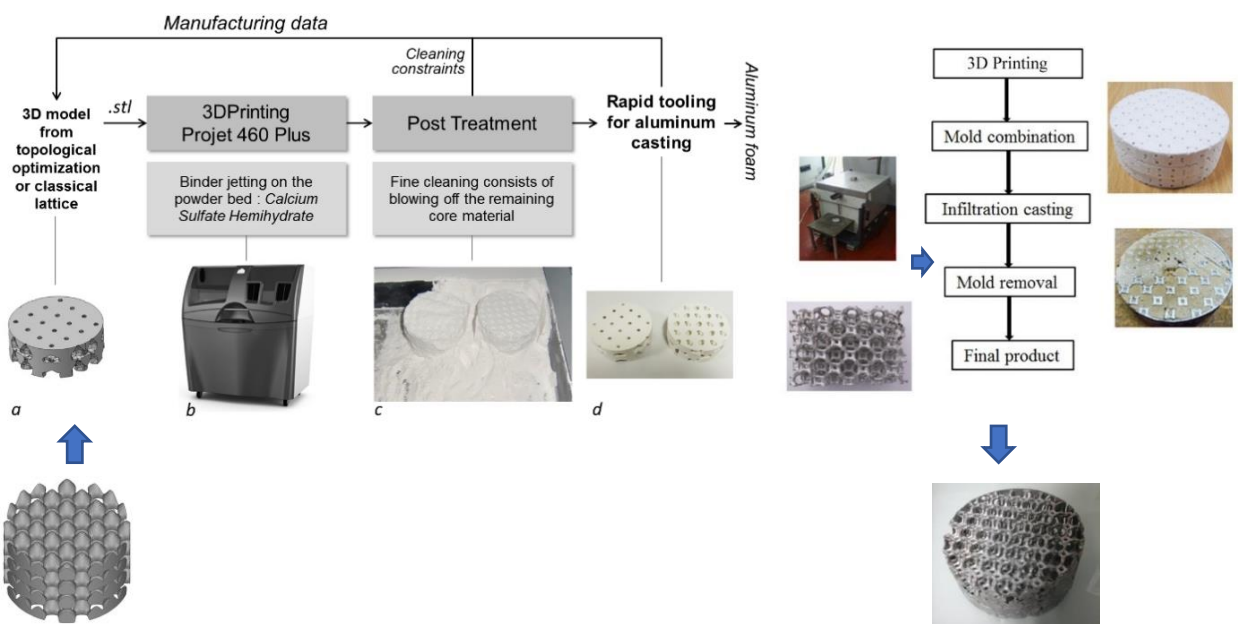


Figure 14. Schéma de principe du moulage de la mousse à cellules ouvertes. Moule en plâtre par impression 3D et procédé de fabrication utilisant le moulage par infiltration

Nous pouvons observer que la notion de fabricabilité englobe bien une prise en compte de l'ensemble des contraintes liées à la fabrication du produit en incluant donc normalement sa définition et les caractéristiques attendues ainsi que le processus de fabrication. La conception guidée par la fabricabilité contribue à créer des produits qui donnent de bons résultats en fabrication mais enrichit également la méthode associée à travers l'intégration des fonctions attendues en intervenant au plus tôt dans le cycle de conception. Il est clairement montré qu'une étape expérimentale est nécessaire pour caractériser certaines fonctions d'usage et de fabrication afin de pouvoir les intégrer au modèle 3D. La répétabilité des essais et la capitalisation des connaissances en sont d'autant plus importantes pour donner un sens à cette notion de conception intégrée qui doit notamment agir sur le cycle

complet de conception et de fabrication pour réduire le temps et le coût de réalisation d'un projet.

3. Encadrements

3.1. Encadrements de thèses et de stages

Un premier projet a été développé pour améliorer la résistance à la rupture de pièces fabriquées par impression 3D à travers un dépôt structuré de la matière. Le projet a été identifié dans la thématique « Matériaux Intelligents » par FA sur la base des matériaux avancés structurés et a fait l'objet d'une étude préliminaire avant d'être introduit dans des stages de niveau Master 2 et à travers un nouveau sujet de thèse SMAM « Smart Material in Additive Manufacturing ». Un deuxième projet a été défini sur la base de l'intégration de connaissances provenant des technologies de Fabrication Additive dès la définition du produit dans le cadre des méthodes de Design For Additive Manufacturing.

J'ai co-encadré une thèse soutenue et je co-encadre actuellement deux thèses avec le Professeur Pascal Lafon (ICD/LASMIS de l'Université de Technologies de Troyes, UTT) et Monsieur Sihao Cheng (Université de Technologies de Belfort Montbeliard, UTBM). Je co-encadre le Post-Doctorat du Dr Mohamed Ali BOUAZIZ depuis Septembre 2019 avec un Enseignant-Chercheur de l'EPF, le Dr Joseph MARAE DJOUDA (Annexe A):

- **De 2015 à 2018**, Mme Elnaz Asadollahiyazdi, Bourse Essaimage de la région Grand Est réalisée à Troyes en relation étroite avec l'UTT, « Integrated design of Additive Manufacturing based on Design For Manufacturing and skin-skeleton models », soutenue le 21 septembre 2018.
- **De 2018 à 2021**, M. Marouene Zouaoui, Bourse ministérielle et Feder de l'UTT réalisée à Troyes, SMAM « Smart Material in Additive Manufacturing ».
- **De 2018 à 2021**, M. Cheng Chang, Bourse CSC des Ut, China Scholarship Council, réalisée à l'UTT, Développement des procédés de Fabrication Additive de pièces à gradients de composition.
- **De Septembre 2019 à Juin 2020**, M Mohamed Ali BOUAZIZ, Bourse Jeune Chercheur de la région Grand Est, Étude de la ténacité à la fracture du matériau structuré au niveau macroscopique à travers un micro-mouchetis et une corrélation d'images.

Développement des activités liées à la Fabrication Additive

Depuis 2013, j'ai encadré deux stages d'ingénieurs provenant de l'école polytechnique de Turin sur une période de 6 mois au sein de l'EPF de Troyes dans la continuité du projet « Smart Materials » :

- Amélioration de la ténacité dans les échantillons de fabrication additive (M. Pietro Lanzillotti en 2017);
- Étude de l'anisotropie des matériaux intelligents en mécanique de la rupture (M. Adriano Lenti en 2018).

3.2. Participation à des jurys de thèse

J'ai participé comme examinateur en mars 2017 au jury de thèse de M. Feng ZHU à l'Université de Technologie de Troyes intitulé « Experimental and Numerical Study of Metal Foam Composites in Innovative Application of Thermal Energy Storage » sous la direction de M. Xiao-Lu GONG. Mme Elnaz ASADOLLAHIYAZDI a également soutenu sa thèse en septembre 2018.

3.3. Animations et responsabilités

J'ai différentes responsabilités pédagogiques sur le campus de Troyes :

- Responsable de FabAdd-Académie : FabAdd-Académie est une action portée par 5 établissements d'enseignement supérieur Troyens destinée à fédérer les formations sur la fabrication additive.
- Responsable de l'Ingénierie Système, ce qui implique la coordination des cours et des projets en ingénierie numérique et système au sein du cycle Licence et du cycle Master. L'enseignement des modules de conception mécanique sur CATIA V5 a fait également partie de cette mission jusqu'en 2019.
- Responsable du TechLab Fabrication Additive, qui a une double mission, pédagogique et de recherche, pour initier de nouveaux projets innovants ou développer des projets scientifiques (ex. matériaux intelligents, orthèses personnalisées). Des étudiants (TechLab Manager) sont impliqués pour développer et maintenir cette plateforme.
- Responsable du Master of Science « Innovation Creativity Entrepreneurship » (Msc ICE) en collaboration avec l'École Supérieure de Commerce de Troyes. Cette formation est accréditée par la Conférence des Grands Écoles (CGE) et enseignée entièrement en anglais avec une ouverture vers des étudiants internationaux. Cette

Développement des activités liées à la Fabrication Additive

responsabilité implique la création d'un syllabus comportant les modules d'enseignement, la définition et le suivi des projets incubés, la validation des stages, la promotion de la formation et le recrutement des étudiants (Ingénieurs EPF ou candidats internationaux).

Mes enseignements contiennent ~180 heures équivalent TD par an (de la 1^{ère} à la 5^{ème} année du cursus). Ils comportent des travaux pratiques en CAO (Surfacique, Volumique, Paramétrage), des cours magistraux en ingénierie système, des projets de sciences pour l'ingénieur et des projets appliqués.

En tant que délégué recherche de l'EPF sur le campus de Troyes, j'accompagne une équipe composée d'enseignant-chercheurs et d'un ingénieur de recherche.

J'anime la thématiques « Procédés et Matériaux Avancés » de l'Institut Services et Industries du Futur Troyes (ISIFT) qui a pour mission la mise en place d'une collaboration entre plusieurs établissements d'enseignement supérieur, le développement de projets transversaux de recherche et la mutualisation de moyens.

3.4. Collaboration avec des chercheurs étrangers

J'ai développé un partenariat qui a débuté en 2016 avec le BCIT (British Columbia Institute of Technology) de Vancouver et plus précisément le laboratoire MAKE + spécialisé dans la conception de dispositifs médicaux. Ce partenariat porte sur la conception et la fabrication additive d'orthèses personnalisées de type AFO (Ankle Foot Orthosis) et d'un casque de correction de la plagiocéphalie infantile (Geoffroy et al., 2018). Je me suis rendu à Vancouver à deux reprises pour développer ce partenariat (un séjour de 4 semaines en 2015, puis 1 journée de travail en 2017). Nous avons reçu notre partenaire (Mme Johanne MATTIE) à Troyes en Juillet 2017 et j'ai également participé à l'organisation d'un Workshop intitulé « Fundamental and application research in Additive Manufacturing » qui s'est déroulé à l'université de Shanghai en 2017 avec l'UTT, l'UTBM et l'UTSEUS (Figure 15). Un partenariat entre l'EPF et Polytechnique de Turin a vu le jour en 2017 avec l'accueil de deux étudiants en stage de Master 2.



Figure 15. Activités à l'international avec le BCIT de Vancouver et l'université de Shanghai

Ma dernière activité de recherche est une expérience à l'international aux États-Unis qui s'est déroulée au sein du laboratoire de recherche de photo-acoustique (Photo-Acoustics Research Laboratory) du Professeur Cetin CETINKAYA à Clarkson University (Potsdam, État de New York, USA) pendant 6 mois, de juillet 2019 à janvier 2020. Cette expérience stimulante s'est organisée autour d'un projet de recherche, d'heures d'enseignements et d'un accès à l'ensemble des cours proposés par Clarkson (je ne décris pas mon expérience personnelle, mais ma famille était avec moi, mes deux enfants ont suivi un cursus scolaire anglophone, et nous nous sommes intégrés dans d'autres activités (conférences, activités

sportives et culturelles, ...)). Cette partie ne détaille pas l'ensemble du travail de recherche précisément mais vient compléter l'apport de mon expertise dans la compréhension du comportement mécanique des matériaux structurés produits par fabrication additive.

Monsieur Cetinkaya et son équipe travaillent depuis plusieurs années sur un artefact (Phononic Crystal Artifact (PCA), Figure 16) et des mesures non-destructives par ultrasons (Figure 17) (Xu et al., 2017) afin de quantifier la qualité des spécimens imprimés en 3D par FDM (Fused Depositing Modeling – Extrusion de filament) en utilisant un polymère PLA (PolyLactic Acid). L'objectif est de développer un modèle numérique qui intégrerait plusieurs données physiques provenant du protocole expérimental décrit dans la figure 17 afin de prédire l'influence de la structure filamentaire ou plus précisément leurs empilements et l'impact des zones soudées. Le protocole correspond à la propagation d'une onde sonore qui traverse l'artefact grâce à un émetteur (Transducer 1) appliquant un type d'onde à une fréquence donnée. Un récepteur (Transducer 2) mesure la fréquence de sortie, et également la topologie de l'onde et la longueur d'onde (Wavefront). Les aspects topologiques de la propagation des ondes sont extrêmement répandus à l'heure actuelle et donnent lieu à des publications internationales à très fort impact depuis quelques années.

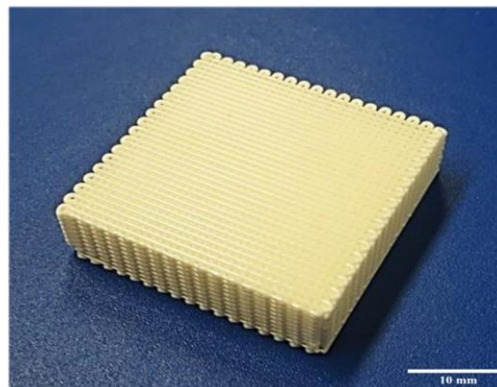


Figure 16. Phononic Crystal Artifact

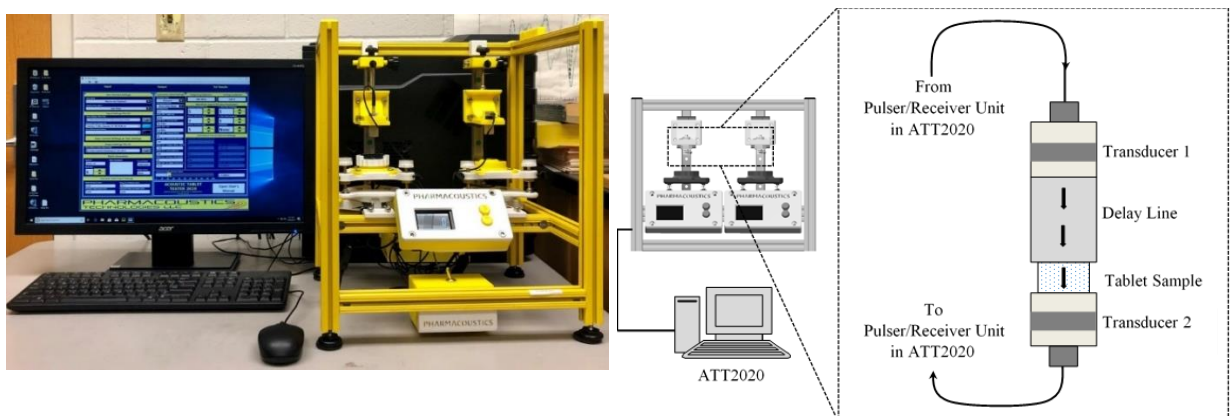


Figure 17. Appareil de mesure par ultrason

La superposition des filaments et leurs soudages déterminent la qualité et l'intégrité mécanique d'une pièce. Ainsi, nous avons déterminé un nouveau critère qui influence la rhéologie du polymère et la qualité des points de soudure entre les filaments. L'étude de l'influence de la température (T_p) a donné lieu à une nouvelle campagne d'expérimentations en faisant varier les températures d'extrusion lors de l'impression du PCA de 190 °C à 210 °C en appliquant un pas de 5°C qui déboucha sur 15 spécimens (3 X 5 typologies). Les conditions d'impression 3D, les dimensions des spécimens après fabrication et les résultats des mesures sont présentés ci-dessous (Figure 18) :

| Design Parameters | | PCA[1,1] | | | | |
|--|---------------|----------|---------|---------|---------|---------|
| | | T190 | T195 | T200 | T205 | T210 |
| Extruder Temperature (T_p) (°C) | | 190 | 195 | 200 | 205 | 210 |
| Extrusion speed (v_p) (mm/sec) | | 42 | 42 | 42 | 42 | 42 |
| Specified fiber thickness (t_s) (μm) | | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| Average measured fiber thickness (t_m) (μm) | | 386 | 418 | 395 | 400 | 409 |
| Specified print layer height (h_s) (μm) | | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| Average measured print layer height (h_m) (μm) | | 340 | 331 | 322 | 312 | 298 |
| Specified fiber-to-fiber spacing (s_s) (μm) | | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| Average measured fiber-to-fiber spacing (s_m) (μm) | | 314 | 301 | 275 | 257 | 252 |
| Dimensions | L=Length (mm) | 29.12 | 29.26 | 29.26 | 29.35 | 29.56 |
| | W=Width (mm) | 28.88 | 28.93 | 28.99 | 29.19 | 29.47 |
| | H=Height (mm) | 7.51 | 7.45 | 7.41 | 7.35 | 7.28 |
| Artifact mass (m_A) (g) | | 3.98 | 4.03 | 4.09 | 4.11 | 4.13 |
| Apparent artifact mass density (ρ_A) (kg/m ³) | | 630.17 | 639.04 | 650.71 | 652.69 | 651.23 |
| ToF in the artifacts (ToF) (μsec) | | 6.52 | 5.67 | 5.55 | 5.42 | 5.45 |
| Speed of pressure waves (c_L) (m/s) | | 1151.84 | 1313.93 | 1335.14 | 1356.09 | 1335.78 |
| Apparent Young's modulus (E_A) (GPa) | | 0.83 | 1.11 | 1.16 | 1.20 | 1.17 |

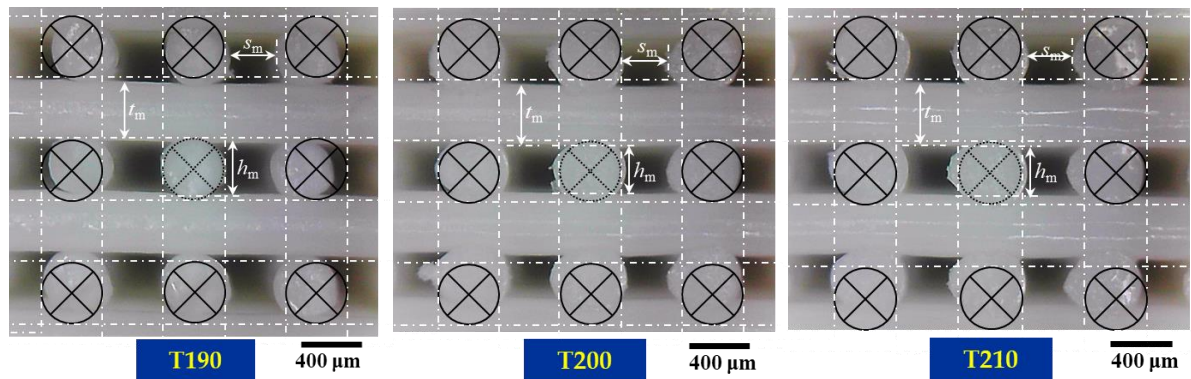


Figure 18. Spécifications d'impression 3D, caractéristiques microscopiques spécifiées et mesurées, données de masse et de densité apparente, durées de propagation (ToF), vitesse des ondes de pression (c_L) et module apparent de Young (E) pour les artefacts.

Les coupes permettent d'observer l'impact de la rhéologie du filament polymère sur la forme de la section transversale des filaments et l'affaissement de ceux-ci (diminution de la hauteur moyenne de la section circulaire (h_m) en μm entre T190 à T210 qui impacte la hauteur des PCAs (H en mm)). La topologie de la propagation de l'onde apporte de

nouvelles observations afin d'analyser l'intégrité mécanique et géométrique des spécimens. La durée de propagation (Time of Flight, ToF) entre l'impulsion d'entrée et l'onde de sortie est utilisée afin de mesurer l'impact de la variation de plusieurs paramètres (température, dimensions, influence des points de soudure). La signature de l'onde est un élément important car nous pouvons observer que l'onde se propage moins rapidement en-dessous de T200 avec une dispersion plus importante ce qui se traduit par une résistance à la propagation produite par la structure filamentaire.

La mesure du module de Young permet également de quantifier l'avancement de l'état de dégradation d'un matériau qui peut se traduire par un gonflement ou l'effondrement de celui-ci. La vitesse de propagation des ondes sonores ou ultra-sonores dans un milieu continu dépend de l'élasticité de ce milieu en fonction de son module de Young. L'intégrité de la structure est mesurée à travers un module d'Young apparent (E_A) car les PCAs comportent une structure poreuse avec un E_A qui semble se stabiliser entre T200 et T205 (Figure 19).

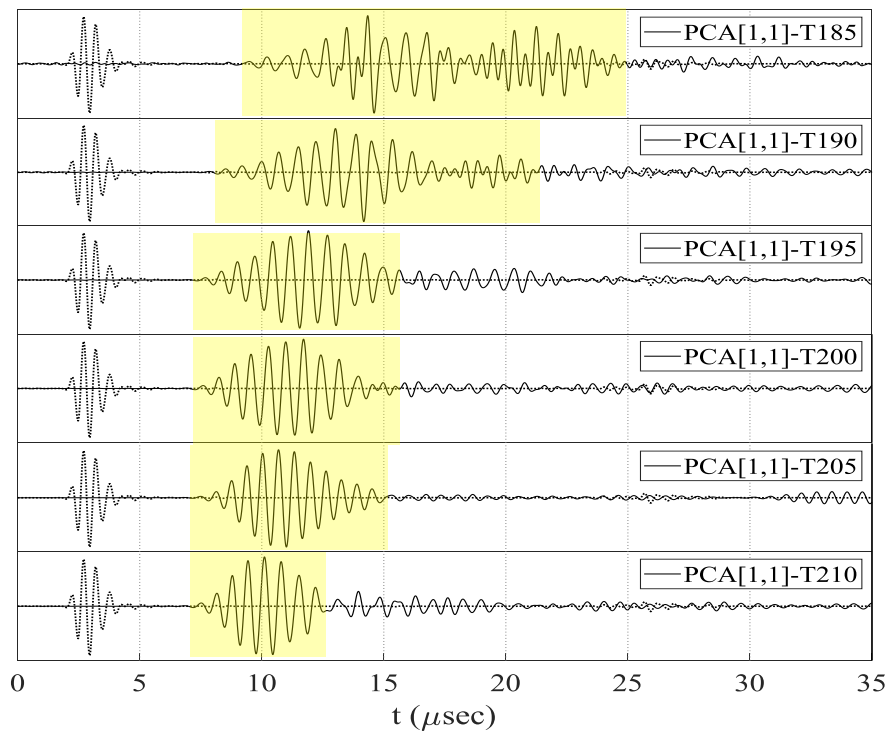


Figure 19. Topologies des ondes ou les formes d'ondes de T185 à T210

Comme discuté précédemment, l'objectif est d'intégrer l'ensemble de ces paramètres dans un modèle numérique par EF (Éléments Finis) afin de définir un modèle numérique qui permettrait de vérifier l'intégrité et la fiabilité mécanique des pièces produites par impression 3D FDM. Nous avons utilisé le logiciel OnScale qui permet de simuler des

inspections TOFD (Time of Flight Diffraction). En reproduisant les conditions expérimentales qui comportent un émetteur et un récepteur, la mise en données (fréquence, typologie de l'onde, matériau utilisé) et le modèle 3D de l'artefact PCA avec une structure filamentaire prédéfinie sans effondrement, nous avons lancé plusieurs calculs afin d'étudier et définir une méthode d'analyse de simulations par Éléments Finis (Figure 20).

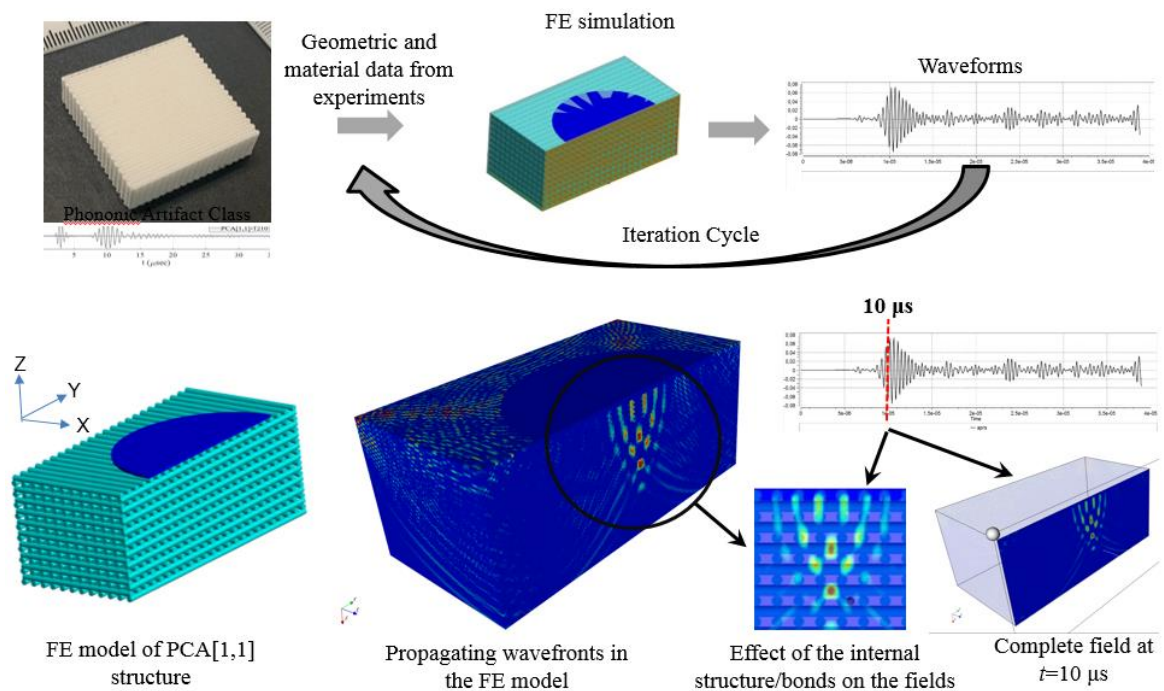


Figure 20. Méthode d'analyse par Éléments Finis pour un PCA prédéfini

Les premiers résultats sont prometteurs mais nous avons besoin de temps afin de reproduire précisément l'influence des points de soudure sur le résultat de la propagation de l'onde. Ainsi, des mesures par rayon X sont en cours afin d'obtenir des images haute-résolution au niveau des zones de contacts entre les filaments afin d'approfondir nos observations. Cette collaboration continue et l'ensemble sera décrit dans un article scientifique.

L'aspect qui me semble le plus important dans cette collaboration internationale est le fait que cette méthode expérimentale et numérique complète notre compréhension de l'impact des points ou des lignes de soudure à un niveau nanoscopique sur la structure imprimée en 3D afin d'optimiser l'intégrité mécanique par dépôt structuré de filaments polymère (projet de recherche majeur dans ce manuscrit, § 3). De plus, le rayonnement scientifique et mon adaptation dans un laboratoire international sont des éléments qui ouvrent d'autres perspectives enthousiasmantes dans l'évolution d'une carrière.

Développement des activités liées à la Fabrication Additive

À travers cette collaboration internationale avec Clarkson University, j'ai également échangé avec mes collègues du département de génie mécanique et aéronautique, organiser un séminaire par visioconférence avec Monsieur Marouene ZOUAOUI (doctorat en cours avec l'UTT), collaborer avec leur incubateur, et enseigner vingt-deux heures à un niveau licence 3ème année (junior students).

3.5. Collaborations industrielles

Nous avons développé des relations avec différentes entreprises comme Axon'Cable (ETI, Montmirail) à travers un premier projet qui avait pour objectif de transférer des connaissances en traitement de surface sur des pièces réalisées en SLM (Selective Laser Melting) avec le Dr Mahdi CHEMKHI et les compétences de l'ICD-LASMIS. Une discussion est en cours pour prolonger le projet à travers une bourse CIFRE. Concernant le développement de nos travaux sur les orthèses personnalisées par impression 3D, nous avons tissé des collaborations avec la société NEUT (Orthésiste à Rosières-Pres-Troyes) et l'association d'hémiplégie. Dans notre mission d'accompagnement des projets innovants, nous avons également travaillé avec la société Remy (développement d'une machine « espresso » pour la cosmétique) ou la société SnapShot (développement d'une base rotative pour les smartphones) incubés à la technopole de l'Aube pour concevoir leurs premiers prototypes. Depuis 2018, ma mission en tant que délégué recherche de l'EPF sur le campus de Troyes implique le suivi des projets de recherche.

3.6. Projets régionaux et internationaux

Je participe depuis 2020 au développement de la filière Fabrication Additive AddAGE porté par INORI SAS et le Professeur Claude BARLIER. Nous sommes partenaires de l'ISIFT (Institut des Services pour l'Industrie du Futur Troyen) dans le cadre des thématiques définies par la Stratégie de Spécialisation Intelligente S3 du Schéma Régional de Développement Economique, d'Innovation et d'Internationalisation (SRDEII). Parmi les autres projets régionaux, j'ai obtenu une bourse ESSAIMAGE en 2015 pour le financement de la thèse de Mme ASADOLLAHIYAZDI. Depuis 2014 et concernant les investissements nécessaires au développement de la plateforme de Fabrication Additive de l'EPF de Troyes, j'ai également fait appel à la région Grand Est (GE), au Conseil Départemental (CD10), à la Métropole de Troyes (TCM) avec le soutien financier de la fondation EPF. Nous avons participé à d'autres appels à projet de type France-Canada

Développement des activités liées à la Fabrication Additive

pour financer notre collaboration avec le BCIT de Vancouver. En partenariat avec l'Université Québec Trois-Rivières (UQTR), nous avons obtenu une bourse Mitacs Globalink pour l'accompagnement d'une thèse qui n'a pas abouti à la suite de difficultés pour le doctorant d'obtenir son visa. Chaque financement fait également appel aux fonds propres de la fondation EPF. Le tableau ci-dessous récapitule les financements obtenus :

| Type de financement | Montant de la subvention | Coût final (Fondation EPF) |
|---------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Bourse régionale | | |
| - ESSAIMAGE | 110 K€ | 120 K€ |
| - Pacte Grands Écoles* | 114,4 K€ | 143 K€ (5720 € / École) |
| - ESR Champardennais* | 17 K€ | 4 K€ |
| - Aide Jeune Chercheur | 20 K€ | 40 K€ |
| Bourse Mitacs Globalink | 4 K€ | 0 K€ |
| Subvention GE, CD10 et TCM | | |
| - Scanner 3D | 15 K€ | 25 K€ |
| - Logiciel de reconstruction 3D | 20 K€ | 25 K€ |
| - Imprimantes 3D FDM | 24 K€ | 30 K€ |
| - Imprimante 3D Métallique | 70 K€ | 134 K€ |
| TOTAL | 394 000 € | 521 000 € |

*Le Pacte Grandes Écoles correspond à un soutien de la Région Grand Est afin de développer des formations sur la fabrication additive en partenariat avec des établissements d'enseignements Troyens (§4) : FabAdd-Académie. L'action est également soutenue par l'ESR Champardennais (regroupement des établissements supérieurs champardennais).

Tableau 1. Financements locaux, régionaux et internationaux pour la recherche et la pédagogie

4. Bilan

Ce chapitre 2 présente les activités pédagogiques et de recherche d'un point de vue opérationnel afin d'évaluer l'engagement et l'implication liés à la fabrication additive pour l'EPF, l'UTT et les établissements d'enseignement supérieurs Troyens. La gestion de projets a ouvert des opportunités de financements et de partenariats pour contribuer au développement de ces activités grâce au dynamisme des collectivités locales et la région Grand Est. Les responsabilités présentées ont participé à la structuration des projets portés au niveau de l'EPF et de l'UTT, mais également à travers des initiatives qui ont pour objectif de développer les connaissances et les moyens dédiés à la fabrication additive. Ces activités ont fait apparaître de nouveaux besoins et ont débouché sur trois recrutements afin de renforcer cette thématique à l'EPF depuis 2014 (Dr Mahdi CHEMKHI, M. Arthur GONTHIER et M. Julien KAUFFMANN). L'association des projets pédagogiques et de recherche a ouvert d'autres perspectives pour l'émergence de projets innovants en alliant des compétences complémentaires. Les projets collaboratifs avec les entreprises ou des

Développement des activités liées à la Fabrication Additive

partenaires étrangers participent à l'enrichissement de ces compétences pour une meilleure compréhension des besoins actuels et futurs. Un projet d'envergure pour la mise en place de formations continues et initiales sur la Fabrication Additive est en cours avec des établissements d'enseignement Troyens à travers le projet Pacte Grandes Écoles financé par la région Grand Est. Ainsi, L'EPF de Troyes a été reconnue en 2017 par le ministère de l'économie et des finances et identifiée au niveau national comme l'un des « principaux centres de recherche actifs sur le sujet de la fabrication additive en France » selon le Pôle interministériel de Prospective et d'Anticipation des Mutations Économiques (PIPAME) à travers un rapport intitulé « Futur de la fabrication additive » (Figure 21).

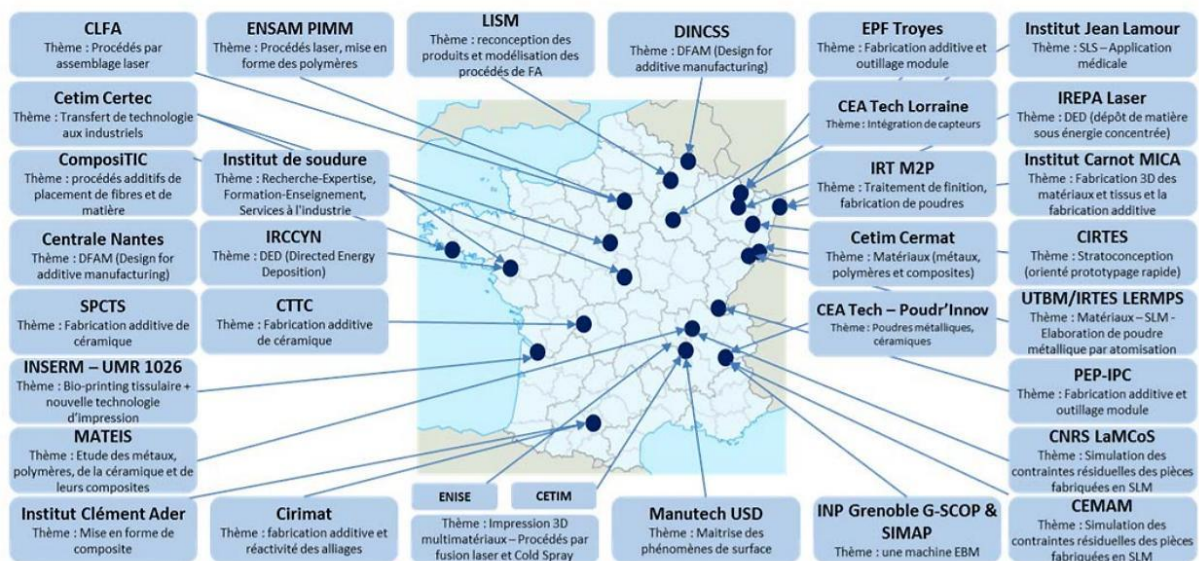


Figure 21. Principaux centres de recherche actifs sur le sujet de la fabrication additive en France (Futur de La Fabrication Additive PIPAME, 2017)

Ma récente expérience internationale à Clarkson University m'a également permis d'échanger avec de nouveaux chercheurs et un corps d'enseignants qui utilisent d'autres méthodes et qui évoluent dans un environnement différent. Ainsi, l'expertise dédiée aux mesures non-destructives par ultrasons, appliquée aux structures filamenteuses par impression 3D polymère, accentue ma compréhension à différentes échelles de l'influence des interfaces, entre les couches et les filaments soudés, à l'intégrité mécanique des pièces. Mon expérience en tant qu'entrepreneur et chef d'entreprise m'apportent parfois une vision différente dans le développement de projets.



Chapitre III

De l'ingénierie intégrée aux solutions d'optimisation d'un matériau structuré par impression 3D

Sommaire

| | |
|---|------------|
| 1. Introduction | 67 |
| 2. Conception intégrée pour la fabrication additive à travers une approche « peau et squelette » et une optimisation multi-objectifs | 67 |
| 2.1. Définition du Design For Manufacturing (DFM) | 68 |
| 2.2. Design For Additive Manufacturing - DFAM | 69 |
| 2.3. Approche DFM-peau et squelette pour la fabrication additive | 70 |
| 2.4. Optimisation bi-objectif et application..... | 74 |
| 2.5. Bilan | 86 |
| 3. Développement et étude d'un matériau structuré par impression 3D afin d'améliorer la résistance à la rupture | 87 |
| 3.1. Impression 3D des échantillons..... | 90 |
| 3.2. Simulation numérique | 90 |
| 3.3. Essais de traction avec des échantillons C-T | 91 |
| 3.4. Résultats et discussion..... | 92 |
| 3.5. Conditions de mesures par corrélation d'images | 94 |
| 3.6. Étude du champ de déformation..... | 95 |
| 3.7. Facteur d'intensité de contrainte (SIF) | 98 |
| 3.8. Bilan | 100 |
| 4. Bilan général | 102 |

1. Introduction

Les projets de recherche sont principalement motivés par l'amélioration du processus de conception et de fabrication additive qui nécessite la maîtrise des paramètres de fabrication et de nouvelles pratiques de conception. Plusieurs projets ponctuels ont enrichi la démarche comme le développement d'une mousse d'aluminium par outillage rapide, la conception d'un casque pour corriger la Plagiocéphalie infantile, le développement d'une structure interne par optimisation topologique et la résolution des textures imprimées en couleur avec une imprimante 3D plâtre (Projet 460 Plus). Dans la définition de nos projets structurants, nous avons commencé par une étude dédiée au Design For Additive Manufacturing (DFAM) afin de proposer une méthode qui prend en compte simultanément les contraintes d'usage et de fabrication du produit pour accompagner le concepteur dans son processus de développement dans le domaine de la FA. Parallèlement, nous avons lancé une première étude de faisabilité qui a débouché sur une nouvelle thèse ayant pour objectif le renforcement des propriétés mécaniques des pièces produites en FDM en reproduisant les directions principales des contraintes obtenues par Éléments Finis pour créer un dépôt spécifique de la matière. Ainsi, ce nouveau chapitre propose de résumer les deux projets de recherche mentionnés ci-dessus.

2. Conception intégrée pour la fabrication additive à travers une approche « peau et squelette » et une optimisation multi-objectif

Cette étude traite de l'approche DFM (Design For Manufacturing) dans le cadre de la Fabrication Additive afin d'examiner simultanément les différents attributs et critères de conception et de fabrication. L'approche de conception intégrée est fournie au niveau de la définition du produit et des exigences définies par le client jusqu'au modèle final du produit. La principale contribution porte sur la mise en place d'un moteur de résolution qui constitue une interface entre le modèle de produit et le modèle de fabrication. Ce moteur est développé à travers l'analyse de toutes les technologies d'impression 3D et l'identification de leurs paramètres et critères de fabrication. Cette étude utilise l'approche Peau et Squelette pour modéliser la première définition du produit et les flux d'informations. Afin d'évaluer certains paramètres de fabrication additive, un problème multi-objectif est formulé, basé sur l'analyse d'une technologie, le temps de production et la masse de matière afin d'optimiser le comportement mécanique et la rugosité du produit.

2.1. Définition du Design For Manufacturing (DFM)

(Gupta et al., 1995) définissent la conception guidée par la fabricabilité comme devant considérer simultanément les objectifs de conception et les contraintes de fabrication afin d'identifier les problèmes liés à la fabrication et de faciliter leur résolution lors de la conception. Ainsi, guider le concepteur nécessite de pouvoir évaluer la fabricabilité de la pièce au cours de la conception. De nombreux auteurs s'accordent à dire que la conception pour la fabrication doit comporter différents degrés de détermination ou différentes phases d'analyse (Boothroyd et al., 2001; Gupta et al., 1997; Zhao and Shah, 2002). Globalement, deux objectifs fondamentaux se distinguent en fabricabilité :

- **L'analyse de faisabilité**, qui est purement qualitative, et doit permettre aux acteurs de savoir si la fabrication est réalisable ;
- **L'analyse comparative**, qui est quantitative et fait intervenir des évaluations plus précises pour situer le produit dans le processus de conception et de fabrication (dans le cahier des charges, les moyens associés, lors de la conception...).

Le choix des procédés de fabrication est un des éléments le plus important du DFM. Dans ce sens, nous pouvons citer l'approche d'Ashby qui définit plusieurs paramètres en relation avec les procédés de fabrication (Ashby, 2000; Ashby et al., 2004) (Figure 22):

- Le matériau utilisé,
- La géométrie,
- Les fonctions à réaliser,
- Les caractéristiques (attributs) des procédés (taille, rugosité, formes possibles).

Dans cette approche, la meilleure solution de conception peut être déterminée si et seulement si les décisions liées au choix du matériau, de la géométrie et des procédés sont considérées simultanément.

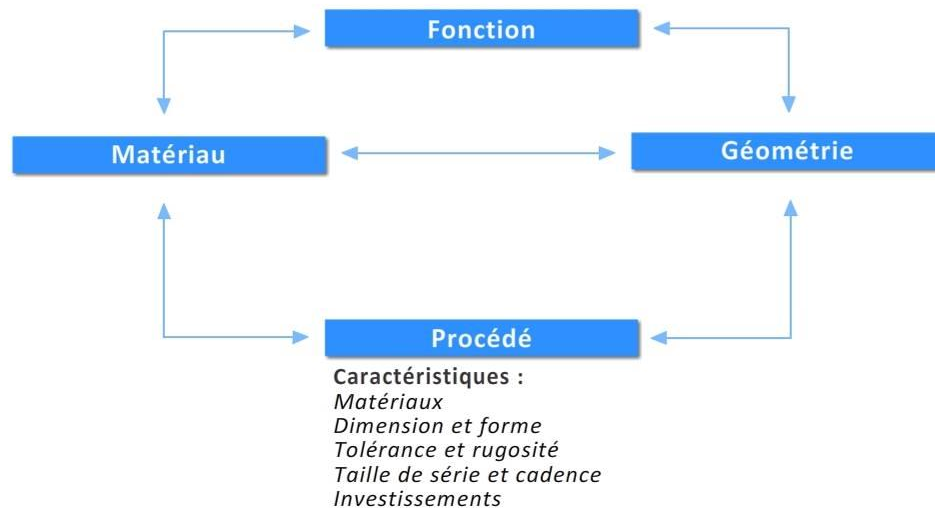


Figure 22. Relations procédé / matériau / géométrie (Ashby et al., 2004)

Ashby a également élaboré des diagrammes et des graphes de choix systématiques des procédés (ex. CES EduPack). Ces diagrammes représentent à chaque fois deux caractéristiques (ex : tolérance en fonction de la rugosité, dureté en fonction de la température de fusion...). Le choix des procédés se fait à travers des diagrammes et des spécifications de conception. Les procédés identifiés dans la zone délimitée sont alors des solutions potentielles. Par la suite, cette méthode a été complétée par un classement des procédés en se basant sur l'estimation des coûts.

2.2. Design For Additive Manufacturing - DFAM

Généralement, la conception pour la fabrication (DFM) est utilisée pour considérer les contraintes et les attributs de fabrication au stade de la conception comme une approche de conception intégrée pour éliminer les difficultés de fabrication et minimiser les coûts. Cependant, l'émergence des technologies de fabrication additive (AM) offre l'occasion de repenser le DFM pour tirer parti des capacités uniques de ces technologies. Le terme DFM a été transféré à AM et s'intitule « Design For Additive Manufacturing » (DFAM). Par conséquent, différents chercheurs ont récemment présenté une approche DFAM en tant qu'approche de conception pour la fabrication additive avec pour objectif d'optimiser les performances du produit par la définition de formes, de tailles, des structures hiérarchiques et de compositions des matériaux, en fonction des capacités des technologies de FA (Rosen, 2014). Les approches DFAM sont classées par (Laverne et al., 2014) en tant qu'évaluations

de concepts, comprenant une analyse qualitative et quantitative, avec une prise de décision considérant les directives proposées, l'optimisation de la conception, la validation géométrique et les propriétés du produit. Cependant, cette classification n'est pas exclusive et il n'y a pas de distinction claire entre les approches générales axées sur les processus et celles orientées sur la conception.

Une autre classification a été créée par (Kumke et al., 2016) avec deux approches définies sur la base des méthodologies générales de conception. La première fournit aux concepteurs des instructions structurées pour exploiter pleinement les procédés de fabrication additive, par exemple en identifiant des chemins qui modifient la conception innovante contrairement aux simples modifications de pièces. La deuxième approche assure un soutien et des conseils spécifiques au concepteur en prenant en compte l'expérience utilisateur (connaissances sur la FA), le degré de nouveauté de la conception et ses objectifs.

Une méthode basée sur des flux fonctionnels est dédiée à la conception d'assemblages afin d'enrichir l'approche de DFAM (Sossou et al., 2018). Elle consiste à identifier les interfaces fonctionnelles des composants ainsi que leurs positions dans un espace de conception. Ensuite, la géométrie est conçue en connectant les interfaces fonctionnelles afin que les flux (ex. énergie, matériau, signal) nécessaires soient acheminés de manière appropriée. L'optimisation paramétrique est considérée pour permettre une minimisation de la matière requise. Ainsi, une méthode indépendante du processus, structurée et systémique pour la conception de mécanismes sans assemblage en FA est proposée.

Pour présenter une approche intégrée de la conception pour la Fabrication Additive, il est nécessaire de définir une approche capable de prendre en charge plusieurs critères basés sur des fonctions d'usage et des fonctions de fabricabilité avec pour objectif la quantification et l'optimisation de la fabrication. Pour répondre à toutes ces questions, cette étude développe une approche combinatoire du DFM intégré pour la Fabrication Additive.

2.3. Approche DFM-peau et squelette pour la fabrication additive

Nous avons choisi dans la suite de cette étude de nous concentrer sur une première technologie de FA en utilisant le FDM. Depuis plusieurs années, de grands efforts ont été consacrés à l'étude de paramètres de fabrication par FDM tels que l'optimisation des chemins d'outils (Jin et al., 2014; Xiaomao et al., 2011), le remplissage (Wu et al., 2015), la rugosité de surface (Thrimurthulu et al., 2004; Vahabli and Rahmati, 2017), la précision des dimensions (Galantucci et al., 2015; Kaveh et al., 2015), le temps (Baich et al., 2015;

Zhang and Bernard, 2013) et le coût de fabrication (Baumers et al., 2016). Selon ces études, les paramètres importants sont identifiés comme l'orientation de la construction, l'épaisseur des couches, le motif et la densité de remplissage, la température d'extrusion, les propriétés du matériau et d'autres paramètres tels que le diamètre de la buse, l'extrusion du fil et la vitesse de déplacement de la tête d'impression 3D.

Dans le processus de développement d'un produit, plusieurs tâches doivent être effectuées pour atteindre progressivement les exigences du client à travers un modèle du produit. Le produit est conçu en fonction des contraintes liées à l'ensemble du cycle de vie du produit (matériaux, analyse fonctionnelle, recyclage, etc.). Par conséquent, l'ingénierie simultanée peut aider à prendre en compte et à analyser les contraintes de fabrication dans le développement du produit. Cette intégration dans la définition du produit est réalisée à travers un sous-modèle représentant un modèle de conception et de fabrication (Roucoules et al., 2004). Ainsi, une approche Peau et Squelette est utilisée pour présenter simultanément le modèle d'usage et le modèle de fabrication en tant que première représentation du modèle de produit.

L'approche Peau et Squelette permet de modéliser le produit et le processus de fabrication en commençant par l'analyse fonctionnelle jusqu'à la production. En règle générale, les peaux doivent décrire les surfaces fonctionnelles du produit et les squelettes indiquent les trajectoires d'écoulement de matières ou d'énergie, comme illustré à la figure 23. Cette figure présente un exemple d'utilisation et de fabrication de peaux et de squelettes pour définir le modèle de produit d'un aimant en forme de « U ». La solution n'est pas totalement déterminée et elle est contrainte par le modèle de fabrication, ainsi que par la modélisation d'interface issue de la conception et de la fabrication. Plusieurs solutions de conception sont alors disponibles. Des ensembles d'attributs spécifiques sont associés à la peau, tels que la forme, la tolérance, la rugosité et la direction du matériau, qui dépendent de la géométrie. Les attributs du squelette sont définis sur la base de la section initiale qui suit une variation de sections pour en déterminer une fibre neutre (ligne, courbe, plaque, etc.). Un attribut supplémentaire définit la direction du flux de matière pour la fabrication du squelette. Selon ce concept, la définition du produit sera analysée en fonction du processus de fabrication sélectionné. En effet, le modèle 3D final d'un produit (constitué de peaux de fabrication) est construit en balayant ou en déformant la section du squelette sur la trajectoire du squelette. Le modèle initial décrit une peau et un squelette d'« usage » qui doivent être comparés à leur homologue de « fabrication » (Skander et al., 2008).

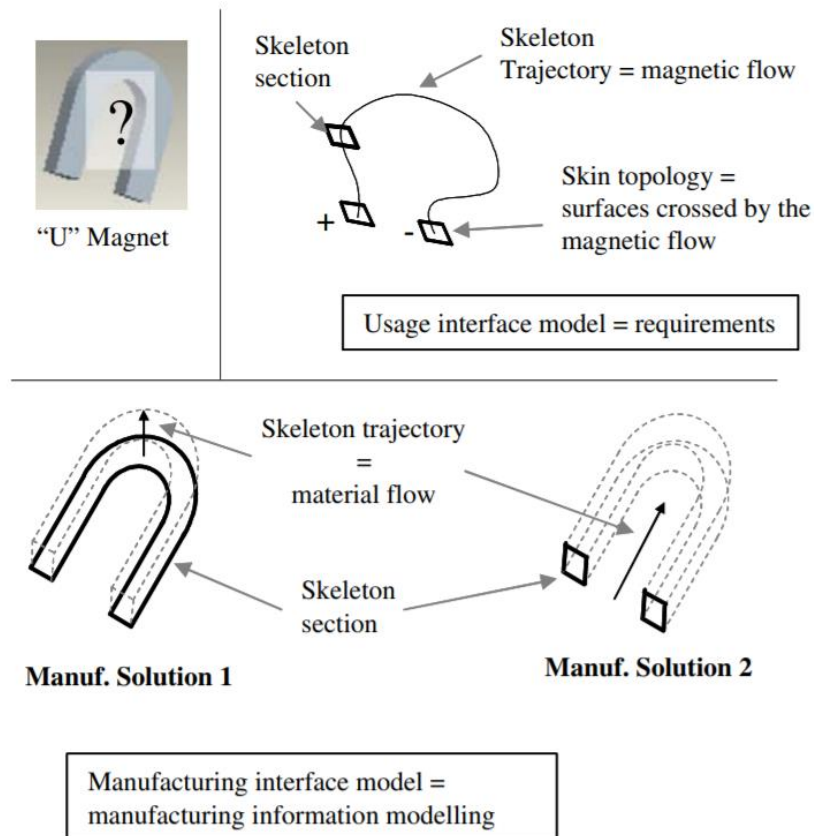


Figure 23. Approche Peau et Squelette (Skander et al., 2008)

Pour développer cette approche Peau et Squelette pour la FA, les fonctionnalités doivent être adaptées aux caractéristiques et attributs des technologies de FA. La structure de notre méthodologie est illustrée sur la figure 24. Comme indiqué, cette méthodologie repose sur plusieurs modèles : le modèle FBS (Function Behavior Structure Model), le modèle d'usage, le modèle de fabrication et le moteur de résolution présenté dans la suite du manuscrit. En outre, la fiche technique sur les matériaux et les différents types de technologies de FA constituent des informations importantes qui doivent être analysées pour déterminer le matériau et le type d'impression 3D souhaités pour la production. Le modèle FBS est obtenu en analysant les exigences et les spécifications du produit. Ainsi, il fournit un modèle initial en analysant les fonctions du produit, son comportement et sa forme. Par conséquent, il est indispensable de définir simultanément le modèle d'usage avec le modèle de fabrication. Le modèle d'usage (figure 24.a) est créé par le biais d'un modèle intermédiaire obtenu par optimisation topologique pour minimiser la masse tout en conservant le comportement mécanique souhaité. En parallèle, le modèle de fabrication (figure 24.b) détermine les paramètres et les règles métiers du procédé. Finalement, le moteur de résolution (figure 24.c) propose de guider le concepteur dans les choix de

définition du modèle de produit en tenant compte simultanément des attributs et des critères de conception et de fabrication.

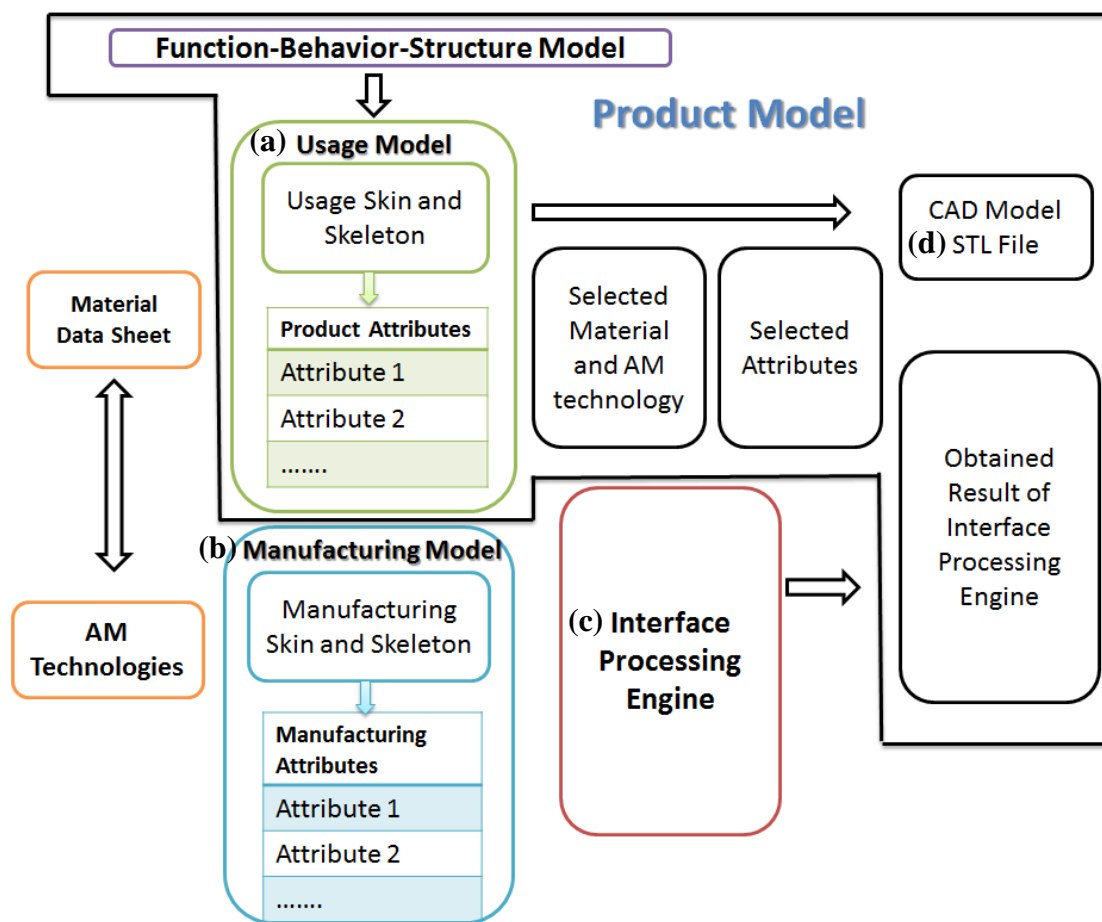


Figure 24. Structure générale de l'approche peau et squelette pour le DFAM (Asadollahi-Yazdi et al., 2018)

Les informations nécessaires à la réalisation du moteur de résolution sont identifiées à travers les modèles FBS, d'usage et de fabrication. L'ébauche du produit (figure 24.d) est créée à l'aide du modèle d'usage. De plus, l'analyse des technologies de FA avec plusieurs logiciels de découpage tels que slic3r, Cura et MakerBot permettent de déterminer les paramètres de fabrication. En outre, il est essentiel d'analyser les critères influençant la qualité et les fonctions du produit final tels que le temps de production, le comportement des matériaux et les contraintes mécaniques ainsi que la rugosité de pièces fabriquées par impression 3D. Un diagramme SADT (Structured Analysis Design Technique) a été réalisé pour déterminer les interactions et définir les entrées et sorties de chaque sous-diagramme (Annexe B) pour en détailler la structure générale.

Le temps de fabrication et la masse du matériau sont les premiers critères à analyser pour tous les systèmes de production. Leurs tendances peuvent être simulées à travers un logiciel spécifique dédié à l'imprimante 3D.

Le comportement mécanique et la qualité de surface sont identifiés comme les principaux critères pour une industrialisation. La fabrication couche par couche et la structure interne des produits constituent la principale différence entre les produits par FA et les autres produits fabriqués selon les méthodes de fabrication classiques. Ces critères sont influencés par les paramètres de fabrication et par les caractéristiques d'usage du modèle final.

Pour le comportement mécanique, la résistance maximale à la traction (Ultimate Tensile Stress (UTS)) est prise en compte. Elle est mesurée au niveau de la contrainte maximale qu'un matériau peut supporter lors de la traction avant sa rupture. Une recherche bibliographique sur de nombreux essais de traction effectués sur des éprouvettes de traction standardisées nous a permis de déterminer le comportement mécanique à la traction et notamment la résistance maximale en fonction de plusieurs paramètres de fabrication FDM (épaisseur de couches, orientation, matériau ABS, température d'extrusion, diamètre de la buse ...).

Pour étudier la qualité de surface, la rugosité peut être analysée. Comme décrit dans la norme ASME B46.1 (Classification and Qualities, 2003), Ra (la rugosité) est la moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts de hauteur du profil mesuré. En outre, Ra est la moyenne d'un ensemble de mesures individuelles des pics et des creux de la surface. Le fait que la surface des pièces soit rugueuse est une conséquence de la fabrication par couches dans le cas du FDM. Cette rugosité de surface a une influence sur les propriétés fonctionnelles du produit tels que le comportement mécanique, les propriétés optiques et le frottement. En déterminant ces différents critères d'usage et de fabrication avec leur quantification ainsi que les spécificités attendues du produit, nous obtenons un problème multicritère qui peut être traité en hiérarchisant les objectifs afin de proposer des réponses optimales.

2.4. Optimisation bi-objectif et application

Nous présentons l'optimisation proposée avec le cas d'étude qui nous a permis de valider cette proposition. Nous avons décidé de définir une optimisation bi-objectif pour analyser notre problème décisionnel multicritère. Cette optimisation est décrite comme

l'activité finale (A9) dans le diagramme SADT (Annexe B) pour trouver la solution optimale pour la Fabrication Additive par FDM. Le temps de fabrication et la masse de matière en tant que critère principal sont pris en compte en tant que fonctions objectives pour ce problème d'optimisation. En raison de l'importance du comportement mécanique et de la rugosité de surface en tant qu'inconvénients, ils sont déterminés comme des contraintes d'optimisation. Selon l'analyse de différentes études réalisées par d'autres recherches, les paramètres les plus influents sont les épaisseurs des couches, ainsi que l'orientation des filaments qui sont identifiées comme des variables de décisions pour l'optimisation. Les variables de décision définies, les fonctions objectifs et les contraintes sont communes à toutes les technologies de FA, mais pour le moment ce moteur de résolution ne peut être appliqué qu'à la technologie FDM.

La formulation mathématique du problème d'optimisation à deux objectifs est expliquée ci-après. Le vecteur des variables de décision à quatre composantes (x) contient les angles d'orientation et l'épaisseur de la couche :

$$x = \{\theta_x, \theta_y, \theta_z, L_t\}$$

Où :

- $\theta_x, \theta_y, \theta_z$: définissent l'orientation, c'est-à-dire l'angle entre la pièce et les axes x, y , et z . Ces angles montrent l'orientation de la pièce sur la plateforme de fabrication et l'angle de remplissage définit la rotation suivant l'axe z par θ_z .

- L_t : l'épaisseur de couche.

Le problème d'optimisation bi-objectif s'écrit :

$$f_1(x) = \text{Temps}(x)$$

$$f_2(x) = \text{Masse}(x)$$

Les contraintes sont :

$$g_{R_a}(x) \leq R_{a\text{Max}}$$

$$g_{\text{UTS}}(x) \geq \sigma_{\text{Max}}$$

$$l_b \leq x \leq u_b$$

Avec

$$\begin{aligned} x &= \{\theta_x, \theta_y, \theta_z, L_t\} \\ l_b &= \{-180^\circ, 0^\circ, -180^\circ, L_{tMin}\} \\ u_b &= \{180^\circ, 180^\circ, 180^\circ, L_{tMax}\} \end{aligned}$$

Comme le montre la formulation mathématique, le premier objectif est le temps nécessaire à la fabrication. Le deuxième objectif est la masse de matière consommée pour la fabrication. Une solution optimale pour la fabrication sera apportée en minimisant ces objectifs. l_b et u_b sont les vecteurs des bornes inférieure et supérieure des composantes de la variable de décision qui indiquent les valeurs minimales et maximales autorisées. La valeur de l'épaisseur de la couche est comprise entre L_{tMin} et L_{tMax} . Pour considérer toutes les orientations possibles du produit dans l'espace, les angles de x et z sont définis entre -180° et 180° et l'angle de y est compris entre 0° et 180° (Raster angle, Figure 3 et 29). Il faut mentionner que la rotation autour de l'axe z détermine l'angle de remplissage. Les fonctions objectives sont calculées à travers la simulation proposée par le logiciel spécifique à la machine d'impression 3D.

La conception et la fabrication d'un crochet sont proposées comme étude de cas pour valider l'approche. Le crochet peut simplement être posé sur une table pour accrocher et suspendre un sac. L'analyse des besoins montre que l'ABS (Acrylonitrile Butadiène Styrène) est un choix approprié en tant que matière première pour le crochet en raison de ses caractéristiques telles que la recyclabilité, la disponibilité et le coût. Le FDM (Fused Deposition Modeling) est choisi pour fabriquer le produit en ABS. La première activité de notre approche est l'analyse fonctionnelle et l'analyse des exigences. Nous supposons que le crochet peut supporter un poids de 7,5 kg. Le modèle FBS illustré dans la figure 25 permet de déterminer les flux de matière en fonction du comportement souhaité du produit.

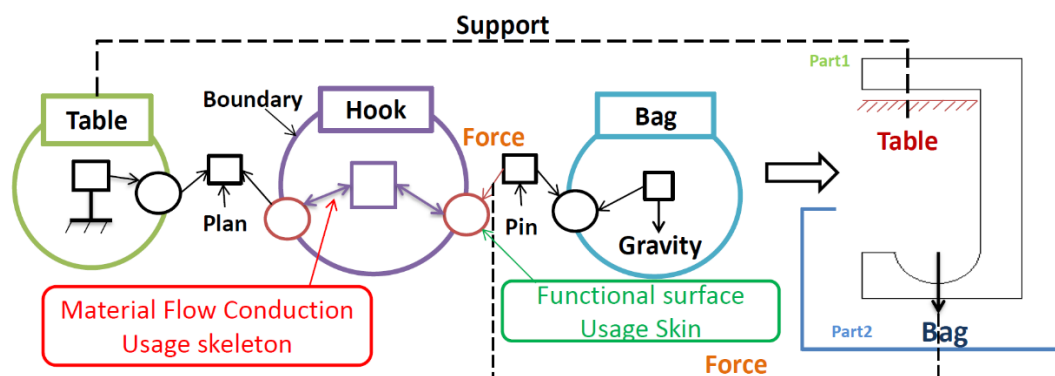


Figure 25. FBS du crochet

Comme illustré dans le modèle FBS, le crochet doit pouvoir supporter le poids du sac. Une table est alors définie comme support et la surface d'appui du crochet. Ce modèle est utilisé pour identifier la peau et le squelette d'usage. Par conséquent, un logiciel CAO est utilisé pour dessiner une ébauche 3D du produit afin de créer un volume initial en tenant compte de la surface fonctionnelle, de la relation entre les supports, de la conduction du flux de matière, les fonctions du produit doivent également répondre à une force appliquée et des performances mécaniques. L'optimisation topologique est utilisée pour optimiser la masse et le volume initial. Il fournit ainsi une peau d'usage concernée par le comportement mécanique et la réduction de masse. Il convient de préciser que la simulation numérique a été réalisée sur la base d'un matériau isotrope et le résultat obtenu ne reste qu'une évaluation incomplète. Après reconnaissance de la peau d'usage, le squelette d'usage est identifié (figure 26).

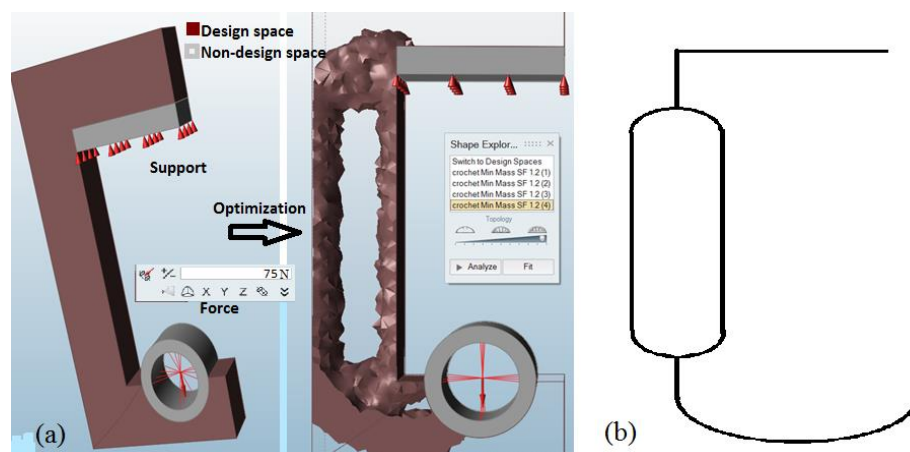


Figure 26. (a) Structure obtenue par optimisation topologique comme peau d'usage (b) Utilisation du squelette comme flux de matière

Selon le modèle d'usage, le modèle 3D est défini à travers une diversité de forme qui résulte des formes proposées en optimisation topologique. En ce qui concerne l'enveloppe et le squelette d'usage présentés, les fonctionnalités et différents problèmes, tels que l'épaisseur de paroi minimale requise pour la fabrication, l'utilisation de congés au lieu d'arêtes vives, et la forme finale sont déterminées par Conception Assistée par Ordinateur, comme indiqué dans la figure 27.

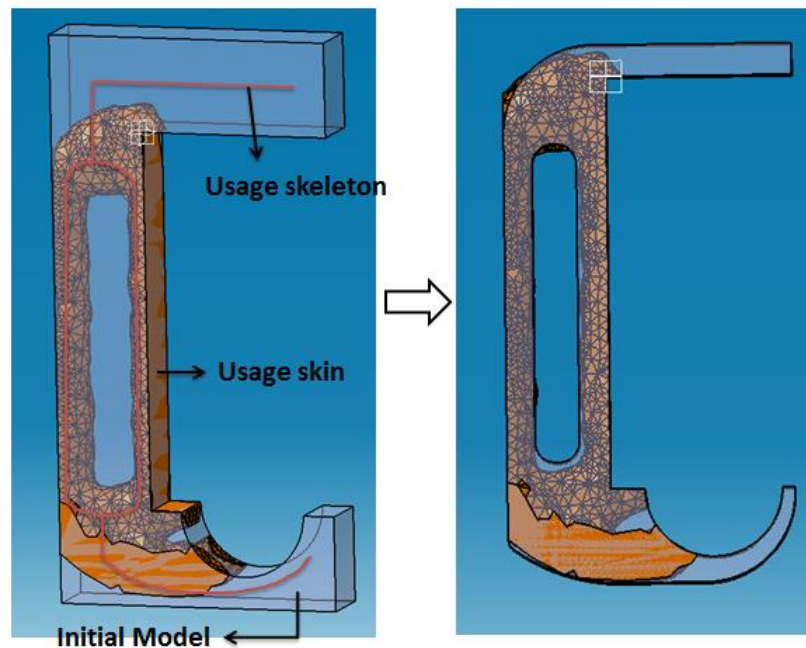


Figure 27. Processus de détermination de l'ébauche 3D

Pour fabriquer le produit, le modèle CAO doit être converti en fichier STL. Ce fichier STL est créé en haute résolution avec un grand nombre de triangles afin de minimiser les imprécisions dimensionnelles et la facettisation du modèle. Cette activité identifie le modèle de fabrication. Dans le processus FDM, la production de la couche commence par la création des contours et de la structure intérieure. En réalité, les contours produits par couches sont la peau de fabrication. La structure intérieure et le parcours de la buse pour remplir les couches sont des éléments importants de la fabrication. L'orientation est un autre paramètre important qui détermine l'angle de remplissage et la direction de dépôt des filaments dans la pièce. Ainsi, l'orientation de la pièce est considérée comme paramètre influent dans la fabrication du squelette. Comme le montre la figure 28, ce modèle définit les couches avec leurs contours et l'orientation de la pièce qui est perpendiculaire à la plateforme de construction.

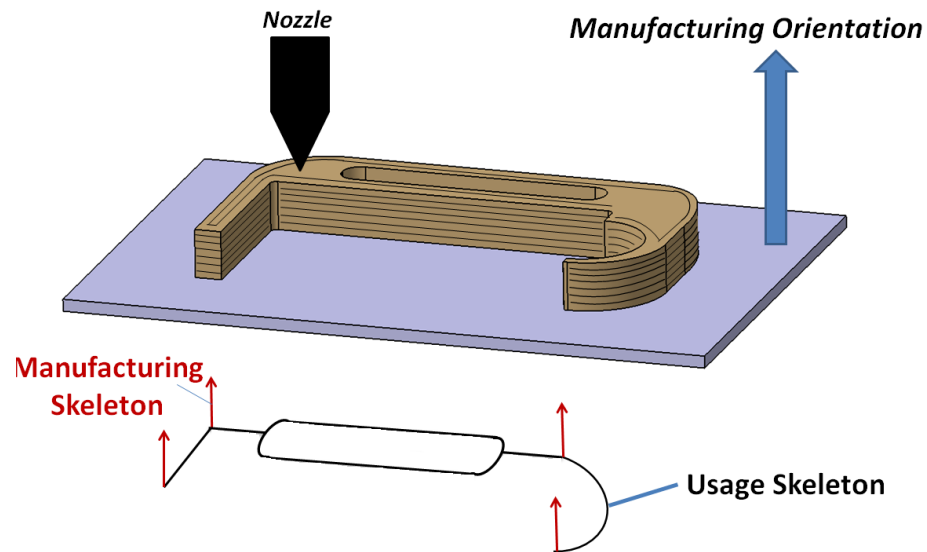


Figure 28. Peau et squelette de fabrication

La détermination de la peau et du squelette de fabrication permet d'identifier les paramètres de fabrication. Ces paramètres de fabrication doivent être analysés en fonction de critères importants tels que le temps, la masse de matière, la résistance maximale de traction et la rugosité. Les attributs liés au FDM sont identifiés par l'analyse des résultats proposés par différents logiciels et l'étude des technologies de FA associées. Ces attributs proviennent du paramétrage de la machine en tant que paramètres de fabrication définis par le logiciel, de la matière et de la technologie en tant que processus. La pièce fabriquée comprend différentes caractéristiques, telles que la structure de remplissage, les couches (shell, roof...), les couches de stabilisation (raft) et les échafaudages pour les géométries suspendues (figure 29).

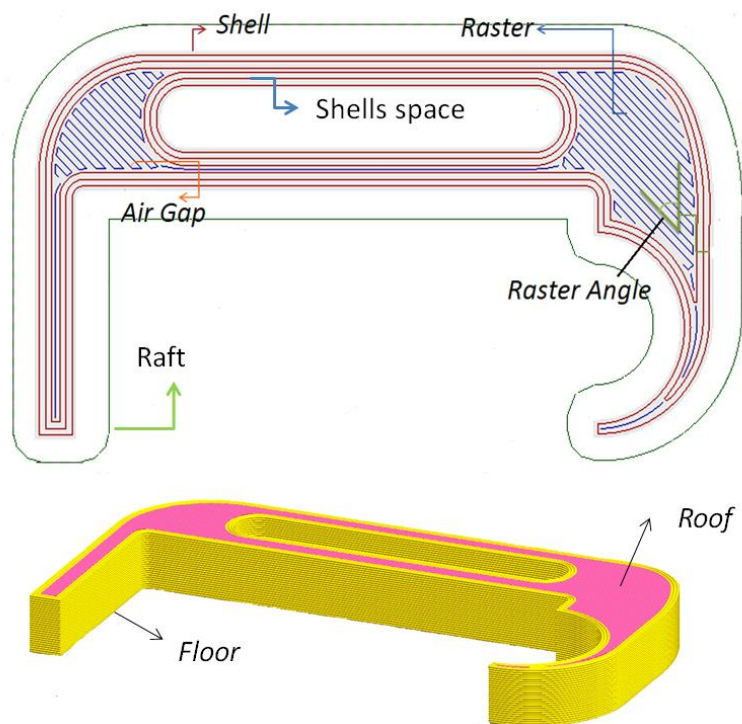


Figure 29. Caractéristiques de l'impression 3D du crochet

Le temps de fabrication et la masse sont calculés par simulation sur Cura 2.5 via MATLAB pour différentes valeurs d'épaisseur de couche et types d'orientation. Cura est un logiciel de découpage qui transforme un modèle 3D en un fichier d'impression 3D (G-Code). Cura étant un logiciel open source, le fichier de paramétrage de l'impression 3D est modifié suivant le format de données JavaScript en fonction de nos paramètres et de l'imprimante 3D souhaitée. Dans cette étude, les caractéristiques de l'imprimante 3D MakerBot 2x sont définies. MATLAB est utilisé pour automatiser et exécuter Cura afin de générer différents fichiers G-Code pour différentes valeurs d'épaisseur de couches et d'orientations. Chaque code G comprend la trajectoire de l'outil sous forme de coordonnées et de quantité de matériau extrudé (sur la base d'une longueur de filament extrudé).

Le temps de fabrication est calculé en fonction de la distance entre les coordonnées et la vitesse de déplacement de la tête d'impression, comme indiqué dans le G-Code pour toutes les pièces. En outre, il existe d'autres mouvements tels que le mouvement de rétractation, le mouvement de déplacement et leur vitesse qui affectent les valeurs d'extrusion et le temps de fabrication.

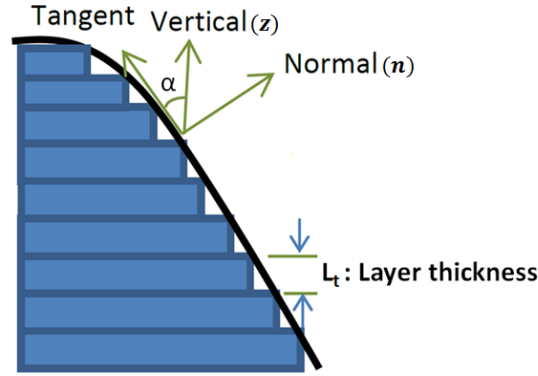


Figure 30. Paramètres utilisés pour définir la rugosité pour des pièces fabriquées par FDM (Pandey et al., 2003)

La rugosité R_a est calculée à l'aide d'une méthode d'estimation hybride mise au point par (Vahabli and Rahmati, 2017) qui utilise un modèle 3D au format STL facettisé. Ils ont proposé cette estimation par la comparaison de données expérimentales avec des modèles existants de rugosité pour différentes valeurs d'angles de dépôts du filament. Dans cette formulation (1), α est défini comme l'angle entre le vecteur tangent des pièces et la direction verticale (Figure 30). W est le paramètre de réglage sans dimension fixe pour les facettes des triangles STL prises en charge dans le calcul de la rugosité qui est supposé être égal à 0,2 pour tous les systèmes FDM basés sur une rugosité de surface mesurée expérimentalement par (Reddy and Pandey, 2005). R_1 et R_2 sont respectivement les deux rayons de congé utilisés dans le cas d'étude.

(1)

$$R_a(\alpha, L_t) = \begin{cases} 70 \frac{L_t}{\cos(\alpha)} & 0 \leq \alpha \leq 70^\circ \\ 1000 L_t \sin\left(\frac{90^\circ - \alpha}{4}\right) \tan(90^\circ - \alpha) & 70^\circ < \alpha \leq 90^\circ \\ 70 \frac{L_t}{\cos(\alpha - 90^\circ)} (1 + W) & 90^\circ < \alpha \leq 135^\circ \\ 1000 \frac{L_t}{4} - \frac{(R_1^2 + R_2^2)(1 - \frac{\pi}{4}) \sin(90^\circ - \alpha)}{1000 L_t} + \frac{((R_1^2 - R_2^2)(1 - \frac{\pi}{4}))^2 \sin^2(90^\circ - \alpha)}{(1000 L_t)^3 \cos(90^\circ - \alpha)} & 135^\circ < \alpha < 160^\circ \\ 1000 \frac{L_t}{2} \cos(90^\circ - \alpha) & 160^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ \end{cases}$$

Pour analyser la rugosité à travers notre moteur de résolution en fonction de ces relations, un programme incluant ces relations en tant que rugosité, en fonction de l'épaisseur et de l'orientation de la couche, est écrit dans MATLAB. L'algorithme écrit est résumé comme suit :

- La normale de chaque triangle du fichier STL est obtenue à travers un calcul de maillage normal pour chaque facette d'un maillage triangulaire.

- Les orientations sont créées grâce à la matrice de rotation $(R_{\theta_x \theta_y \theta_z})$. Les vecteurs normal et tangent sont pivotés le long des angles de rotation $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ comme indiqué dans l'équation (2). L'orientation le long des angles de rotation fait pivoter le vecteur normal de chaque facette du modèle STL, ainsi que l'angle de déposition qui modifie la valeur de la rugosité pour chaque facette du triangle.

$$(2)$$
$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix}$$
$$R_y = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix}$$
$$R_z = \begin{bmatrix} \cos \theta_z & -\sin \theta_z & 0 \\ \sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$R_{\theta_x \theta_y \theta_z} = R_x \times R_y \times R_z$$

Les outils de calcul fournissent les conditions préalables à la création d'un problème d'optimisation bi-objectif. Ce problème est utilisé pour trouver les paramètres de fabrication optimaux en améliorant le temps de fabrication et la masse de matière (la résistance à la traction et la rugosité étant considérées comme les contraintes permettant de fabriquer notre crochet par Fused Depositing Modeling). Les données collectées pour les valeurs de résistance à la traction avec différentes orientations et épaisseurs de couche ne sont pas suffisantes pour créer un méta-modèle afin de les utiliser dans un problème de type continu (tableau 2). Le problème d'optimisation continue bi-objectif est utilisé pour optimiser le temps et la masse de matière en ce qui concerne la rugosité en tant que fonction de contrainte (tableau 3). Pour obtenir une solution réalisable, une méthode méta-heuristique, appelée Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II), est sélectionnée. Les entrées de cet algorithme sont le fichier STL, le fichier d'exécution de Cura et les paramètres identifiés. Une technique de croisement et une mutation polynomiale des données sont adaptées pour générer les nouvelles solutions. Le rang d'un individu est généralement déterminé par sa dominance à travers la loi de Pareto dans la population actuelle. Ainsi, nous présentons un modèle basé sur les algorithmes génétiques et l'étude du front de Pareto pour l'optimisation multi-objectif des paramètres. Le modèle proposé, basé sur l'exploitation de l'algorithme NSGA-II, est implémenté dans Matlab.

| Orientation | Flat $\pm 45^\circ$ | Flat 0/90° | On edge $\pm 45^\circ$ | On edge 0/90° | Up right $\pm 45^\circ$ | Up right 0/90° |
|-------------|--|---------------|---------------------------|------------------|----------------------------|-------------------|
| θ_x | 0° | 0° | 0° | 0° | 90° | 90° |
| θ_y | 0° | 0° | 90° | 90° | 0° | 0° |
| θ_z | 0° | 45° | 0° | 45° | 0° | 45° |
| L_t [mm] | UTS values [MPa] for different orientation | | | | | |
| 0.1 | 32.8 | 30 | 31.9 | 33.5 | 30.7 | 30.9 |
| 0.13 | 27.8 | 30 | 29.6 | 25.7 | 29.11 | 30 |
| 0.2 | 27.5 | - | - | - | - | - |
| 0.25 | 27.3 | 32.7 | 25.4 | 29 | - | - |
| 0.33 | 28.94 | - | - | 31.64 | - | 24.72 |
| 0.35 | 20.22 | 27.35 | - | 22.7 | - | - |

Tableau 2. Types d'orientations et données de résistance à la traction pour différentes épaisseurs de couches et orientations collectées dans la littérature

| | |
|----------------------|------------------------|
| Nozzle Temperature | 230 °C |
| Platform Temperature | 110 °C |
| Nozzle Diameter | 0.4 mm |
| Infill | 100 % - linear |
| Shell number | 2 |
| Travel speed | 130 mm s ⁻¹ |
| Infill speed | 90 mm s ⁻¹ |
| Outline speed | 40 mm s ⁻¹ |
| Floor-Roof speed | 90 mm s ⁻¹ |
| Support | (20 %) 0.2 mm |
| Support Angle | 68° |
| Retraction speed | 25 mm s ⁻¹ |

Tableau 3. Paramètres du problème d'optimisation bi-objectif

Les opérateurs génétiques et leurs critères sont considérés comme suit :

- Numéros d'exécution = 2
- Effectif de la population = 100
- Nombre d'itération = 50
- Indice de croisement = 20
- Indice de mutation = 10
- Probabilité de mutation = 0,25

Les solutions provenant du front de Pareto obtenues pour le problème d'optimisation continu et discret sont présentées dans la figure 31.

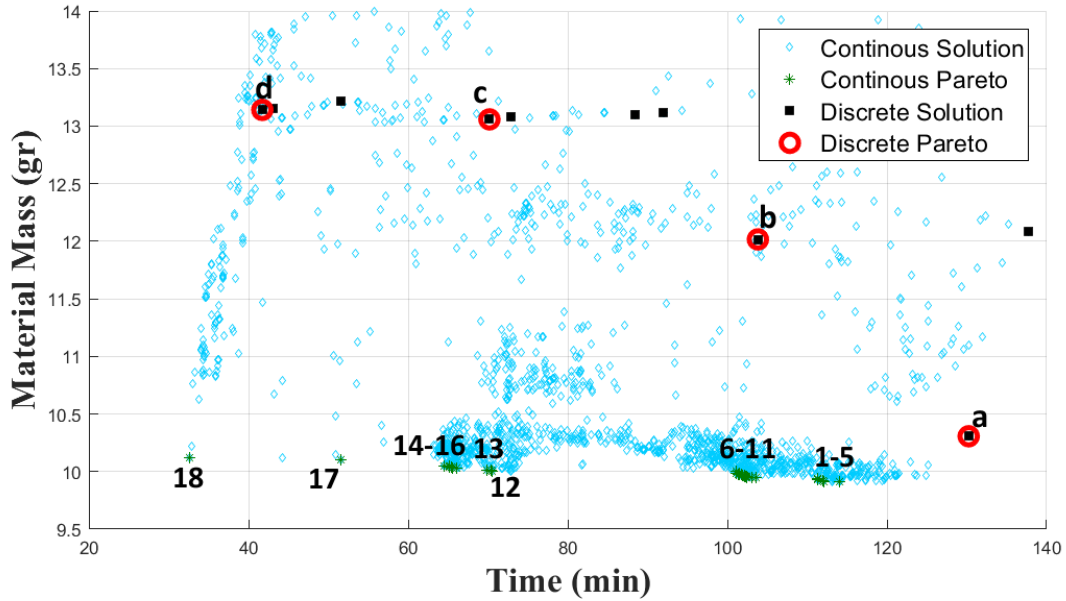


Figure 31. Solution optimale obtenue par NSGA-II pour un problème d'optimisation à deux objectifs

Cette figure montre toutes les solutions réalisables comme solutions continues représentées par un diamant bleu clair. Les solutions réalisables pour le problème discret sont extraites de la population et illustrées avec les carrés noirs. NSGA-II fournit le front de Pareto en tant que solution optimale au problème d'optimisation continu et discret, représenté par les étoiles vertes et les cercles rouges. Les solutions optimales sont décrites dans les tableaux 4 et 5. Les 18 solutions optimales pour le problème continu sont numérotées et les 4 solutions pour le problème d'optimisation discrète ont été nommées par ordre alphabétique.

| Sol. | L_t [mm] | θ_x [°] | θ_y [°] | θ_z [°] | Time [min] | Material [g] | R_a [μm] |
|------|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|-----------------|---------------|
| 1 | 0.11 | 132.89 | 125.75 | -87.31 | 113.99 | 9.91 | 19.53 |
| 2 | 0.11 | 133.12 | 125.44 | -87.31 | 112.08 | 9.91 | 19.80 |
| 3 | 0.11 | 133.25 | 125.55 | -87.19 | 112.00 | 9.92 | 19.74 |
| 4 | 0.11 | 133.22 | 125.88 | -87.64 | 111.31 | 9.93 | 19.79 |
| 5 | 0.11 | 133.05 | 125.90 | -87.65 | 111.26 | 9.94 | 19.87 |
| 6 | 0.12 | 141.90 | 125.38 | -88.20 | 103.08 | 9.95 | 18.51 |
| 7 | 0.12 | 141.93 | 125.41 | -88.21 | 101.37 | 9.98 | 18.50 |
| 8 | 0.12 | 141.96 | 125.42 | -88.24 | 101.14 | 9.98 | 18.59 |
| 9 | 0.12 | 141.99 | 125.42 | -88.25 | 101.12 | 9.99 | 18.48 |
| 10 | 0.12 | 141.90 | 125.37 | -88.20 | 102.25 | 9.96 | 18.56 |
| 11 | 0.12 | 141.92 | 125.41 | -88.21 | 101.91 | 9.97 | 18.54 |
| 12 | 0.18 | 40.00 | 147.91 | -25.01 | 70.45 | 10.00 | 19.69 |
| 13 | 0.18 | 39.04 | 148.03 | -24.95 | 69.81 | 10.01 | 19.06 |
| 14 | 0.19 | 44.33 | 169.90 | -45.05 | 66.06 | 10.03 | 19.60 |
| 15 | 0.2 | 143.36 | 150.35 | -88.75 | 65.56 | 10.03 | 19.91 |
| 16 | 0.2 | 143.34 | 151.53 | -88.75 | 64.48 | 10.05 | 19.76 |
| 17 | 0.26 | 140.40 | 156.61 | -73.35 | 51.60 | 10.10 | 19.60 |
| 18 | 0.28 | -179.84 | 0.26 | -4.48 | 33.66 | 10.12 | 19.56 |

Tableau 4. Solutions optimales pour un problème continu d'optimisation à deux objectifs

| Sol. | L_t [mm] | Orientation | Time [min] | Material [g] | UTS [MPa] | R_a [μm] |
|------|---------------|------------------------|---------------|-----------------|--------------|---------------|
| a | 0.1 | On-edge $\pm 45^\circ$ | 103.82 | 12.01 | 31.90 | 19.04 |
| b | 0.1 | On-edge $0/90^\circ$ | 130.24 | 10.31 | 33.50 | 19.04 |
| c | 0.13 | Flat $0/90^\circ$ | 70.18 | 13.05 | 30.00 | 9.10 |
| d | 0.25 | Flat $0/90^\circ$ | 41.73 | 13.14 | 32.70 | 17.50 |

Tableau 5. Solutions optimales pour un problème d'optimisation discret à deux objectifs

Ces résultats prouvent que la fabrication dans différentes orientations et résolutions (différentes valeurs d'épaisseur de couches) affecte la masse de matériau et le temps de fabrication. Pour le problème d'optimisation continue, les valeurs optimales du temps varient entre 33,66 et 113,99 minutes et la masse optimale est modifiée dans la plage comprise entre 9,91 et 10,12 grammes. Bien que ces plages pour le problème discret ne soient pas les mêmes que le problème continu, les variations de masse et de temps sont plus importantes pour les orientations définies dans le problème discret que pour les orientations possibles dans le problème continu. Il existe un antagonisme entre la masse et le temps, à l'image du principe d'optimisation multi-objectifs

La différence de temps et de masse est imposée par la structure en couches, le radeau (le raft) et la structure de support. En outre, les valeurs d'épaisseur de couches affectent le nombre de couches pour fabriquer le produit en raison de son volume (hauteur du produit par rapport à l'orientation considérée). Étant donné que le nombre de couches est réduit en augmentant l'épaisseur des couches, la fabrication d'un produit nécessite moins de temps. Le compromis entre ces paramètres illustre donc la masse de matière et le temps requis pour la fabrication. Le résultat obtenu pour le problème d'optimisation continue montre que ses solutions optimales ne consistent pas en des orientations planes, sur le bord et en position verticale, car elles nécessitent davantage de matière et de temps que d'autres types d'orientation. Enfin, le crochet a été imprimé en choisissant une solution optimale qui dépend du concepteur et de ses objectifs (figure 32).

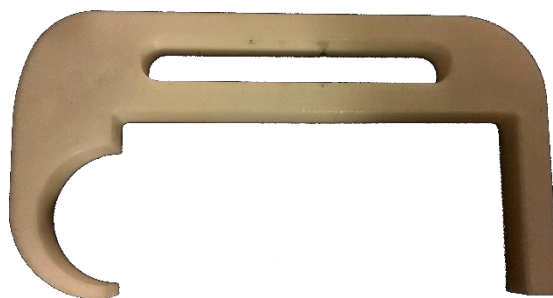


Figure 32. Crochet imprimé en 3D selon une solution optimale

2.5. Bilan

Cette section présente une méthodologie pour la conception intégrée et la fabrication additive. Elle permet de prendre en compte dès que possible tous les attributs, contraintes et critères de fabrication additive dans la définition du produit. Cette méthodologie définit progressivement les besoins du client et son produit à travers un modèle FBS (Function-Behavior-Structure), l'approche Peau et Squelette et le moteur de résolution. La première étape de gestion du cycle de vie du produit est l'ingénierie des exigences et le modèle FBS nous aide à analyser le comportement et les fonctions du produit, ainsi qu'à fournir la structure initiale du produit. Les modèles Peau-Squelette définissent deux configurations d'utilisation et de fabrication qui décrivent les informations initiales pour la conception et la fabrication simultanément. Le modèle d'utilisation est lié aux spécifications du produit et l'analyse de ce modèle permet de fournir une ébauche 3D. En outre, la fabrication contient les informations essentielles pour la fabrication. Un moteur de résolution est développé pour prendre en compte les attributs d'utilisation, de conception et de fabrication simultanément dans la définition du produit en tant qu'approche intégrée de Design For Manufacturing. Il représente une boîte noire qui accompagne l'utilisateur dans sa recherche des solutions de fabrication (épaisseur de la couche, orientation, motif de remplissage) selon un cas d'usage défini pour le guider dans sa conception. Composé d'outils de calcul et d'optimisation bi-objectif permettant d'analyser le processus de FA, cette méthode traite un grand nombre de critères liés à la technologie de fabrication additive comme le temps, la masse de matière, la rugosité et le comportement mécanique afin de proposer un modèle de produit intégré avec des solutions d'optimisation avant de concevoir le produit. Ce modèle ouvre la possibilité de repenser un produit en comparant les critères souhaités et ses spécifications. Par conséquent, cette méthodologie est utilisée pour trouver le modèle de produit optimal, notamment le modèle 3D, les paramètres de fabrication optimaux, et le fichier de fabrication (code G) liés à l'impression 3D du produit.

Il est intéressant de proposer une méthodologie pour la fabrication multi procédés permettant d'utiliser simultanément tous les avantages des technologies de fabrication. L'étude sur le comportement mécanique des produits issus de la FA fait toujours défaut et peut être poursuivie dans des applications alliant différents procédés de fabrication. La précision et le coût doivent également être analysés. De plus, le moteur de résolution présenté pourrait être appliqué à toutes les technologies de fabrication additive et aidera le concepteur

dès la première étape de définition du produit. La section suivante présentera le projet de recherche sur le dépôt d'un matériau structuré avancé par impression 3D.

3. Développement et étude d'un matériau structuré par impression 3D afin d'améliorer la résistance à la rupture

Comme observé précédemment, les technologies de fabrication additive dépendent du matériau et de son système de fabrication comme le frittage et la fusion laser, le liant et la projection de résine, ou le dépôt de filament. D'une technologie à l'autre, le sens de fabrication, l'orientation du modèle et le comportement du matériau sont importants pour obtenir une pièce précise et fiable. Nous avons choisi dans cette étude d'utiliser le procédé FDM pour réaliser une étude de faisabilité en préparant également un transfert de la méthode d'optimisation du dépôt de matière vers un procédé métallique. Cette technologie est proche d'une machine à commande numérique à trois axes et utilise à l'origine un langage de programmation G-Code. Par la suite, certains fabricants d'imprimantes 3D ont converti ce code au format propriétaire de leurs machines. À travers un dépôt standard, la trajectoire du filament est définie pour remplir le produit avec un motif à $\pm 45^\circ$ par couches alternées et également pour créer une peau au produit.

Ce processus conduit à une structure hétérogène en raison des lignes de soudure entre les filaments et sa structure orientée. Ces trajectoires sont prédéfinies et ne reposent pas essentiellement sur les contraintes mécaniques spécifiques liées à l'utilisation du produit. En conséquence, les lignes de soudure peuvent être orientées dans de mauvaises directions, ce qui réduit la résistance mécanique de l'échantillon imprimé en 3D. Afin d'appliquer une trajectoire de dépôt capable de prendre en compte le comportement mécanique du produit, cette étude propose de générer une trajectoire filamentaire couplée à des contraintes localisées. Nous avons utilisé la simulation par éléments finis pour identifier les directions principales de contraintes dans un échantillon normalisé de type Compact-Tensile (C-T) pour caractériser la ténacité à la fissuration en mode I (ouverture de l'encoche par traction).

L'objectif est de reproduire les directions principales des contraintes à l'intérieur de la structure d'un échantillon lors d'un dépôt par extrusion afin d'améliorer la ténacité à la rupture. Plusieurs échantillons en Acrylonitrile-Butadiène-Styrène (ABS) ont été imprimés et testés. L'approche analyse les résultats en comparant une procédure d'essai de traction avec des dépôts de filaments classiques et optimisés.

3.1. Impression 3D des échantillons

Cette étape implique un langage G-code pour convertir le découpage en trajectoires et en couches. Au cours de la fabrication, un filament est extrudé à travers une buse pour imprimer une section transversale d'un objet, puis remonte verticalement pour répéter le processus pour une nouvelle couche (figure 33). Pour prédire le comportement mécanique des pièces FDM, il est essentiel de comprendre les propriétés du matériau et l'effet des paramètres de fabrication sur les propriétés du matériau anisotrope (Ahn et al., 2002). En ce qui concerne les structures internes des produits réalisés par impression 3D, des études telles que (Vesenjak et al., 2010) s'intéressent à l'utilisation des structures en treillis, notamment pour alléger les panneaux sandwich tout en maintenant leur résistance mécanique. D'autres études développent des structures spécifiques telles que des structures courbes (Galantucci et al., 2008), des structures en nid d'abeille (Abramovitch et al., 2010) ou des formes de cellules, des "tétrachirales" (Miller et al., 2010) ou des "hexachirales" (Prall and Lakes, 1997). L'utilisation d'un dépôt de fil plus adapté aux contraintes mécaniques du produit en fonction de son utilisation n'a pas été plus explorée. Dans cette étude, nous avons utilisé une imprimante 3D Makerbot Replicator 2X pour fabriquer les échantillons en matériau ABS.

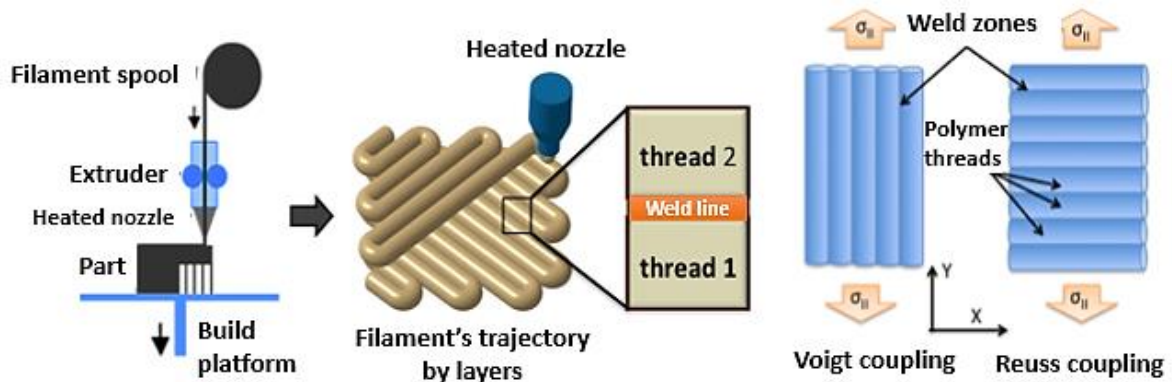


Figure 33. Trajectoire classique par dépôt FDM

3.2. Simulation numérique

La simulation par éléments finis (FE) avec un modèle de comportement d'un matériau linéaire élastique a été utilisée pour calculer les contraintes principales et les déformations de l'échantillon dans des conditions de contraintes planes. Les contraintes principales σ_I (1) et σ_{II} (2), qui sont les valeurs propres du tenseur de contraintes, peuvent être écrites comme suit :

$$\sigma_I = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2}\right)^2 + \sigma_{12}^2} \quad (1)$$

$$\sigma_{II} = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2}\right)^2 + \sigma_{12}^2} \quad (2)$$

σ_{ij} sont les composantes du tenseur de contrainte.

Les directions principales, qui sont les vecteurs propres du tenseur de contrainte, peuvent être décrites avec l'angle θ où

$$\tan(2\theta) = \frac{2S_{12}}{S_{11} - S_{22}}$$

L'éprouvette C-T imprimée utilisée pour la caractérisation de la ténacité est un échantillon standard d'essai pour l'étude de l'initiation et la propagation de la fissuration. L'épaisseur de l'échantillon est de 6,5 mm, ainsi l'hypothèse de contrainte plane est presque vérifiée. Il convient de noter que le matériel imprimé est considéré comme isotrope à la première étape de l'analyse par éléments finis. De manière générale, pour améliorer les propriétés mécaniques d'un échantillon imprimé, les filaments de polymère doivent être orientés vers le champ de force de traction (ou contrainte de traction) dans l'échantillon. Cette idée s'inspire du principe de renforcement des matériaux composites où les fibres sont orientées vers la contrainte de traction dans le plan.

La figure 34 décrit la configuration où le renforcement des filaments peut être fort et faible. Le modèle Voigt de viscoélasticité dans le cas des filaments polymériques conduit à une configuration de renforcement forte lorsque des contraintes de traction sont rencontrées. Pour cette raison, la géométrie de l'échantillon à imprimer est divisée en deux domaines :

- (i) Le voisinage de la zone de concentration de contraintes (autour des singularités géométriques, des trous...)
- (ii) Le reste de l'échantillon où l'amplitude de contrainte n'est pas significativement élevée.

Le voisinage de la concentration de contrainte est la région la plus critique de l'échantillon en raison de la contrainte élevée de Von Mises. Selon la stratégie d'optimisation du dépôt de filament, l'amélioration des propriétés mécaniques est attendue là où les contraintes principales sont essentiellement de traction (σ_I et σ_{II} étant tous les deux positifs). Cette définition nous aide à obtenir la région où la modification de la trajectoire d'extrusion est bénéfique. Cette région appelée ci-après "région affectée" Ω_1 est définie

comme suit. Si Ω est la géométrie entière de l'échantillon et M est un point aléatoire dans cette géométrie, alors :

$$\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2$$

$$\forall M \in \Omega \text{ if } \begin{cases} (\sigma_I > 0) \&\& (\sigma_{II} > 0) \rightarrow M \in \Omega_1 \\ \text{else} \rightarrow M \in \Omega_2 \end{cases}$$

La figure 34 (a) montre la région affectée dans un échantillon C-T standard. L'optimisation des trajectoires de dépôt de fil ne sera effectuée que dans la région définie selon ce critère.

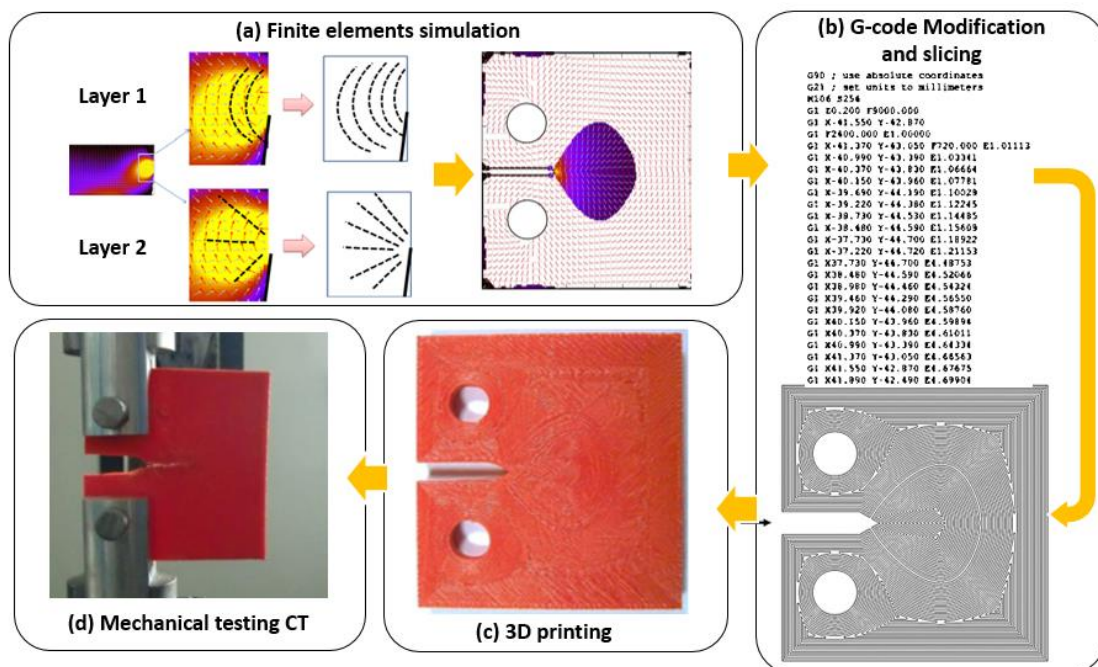


Figure 34. Trajectoire de dépôt selon les directions principales

Les directions principales sont calculées comme décrit ci-dessus à chaque point de l'échantillon. Les trajectoires d'impression seront déterminées pour être tangentes aux directions principales calculées. Dans cette approche, nous traitons un cas de contraintes planes dans deux directions principales. En conséquence, deux trajectoires doivent être prises en compte dans l'impression 3D. Pour cette raison, chaque couche imprimée reproduit une direction principale de façon alternée, comme indiqué sur la figure 34 (b).

3.3. Essais de traction avec des échantillons C-T

Afin de comparer les échantillons classiques et optimisés, deux types d'échantillons C-T sont imprimés. Le premier échantillon « classique » est obtenu à travers un remplissage linéaire à ± 45 degrés et le deuxième échantillon « optimisé » utilise la méthode de trajectoire générative précédente (figure 35).

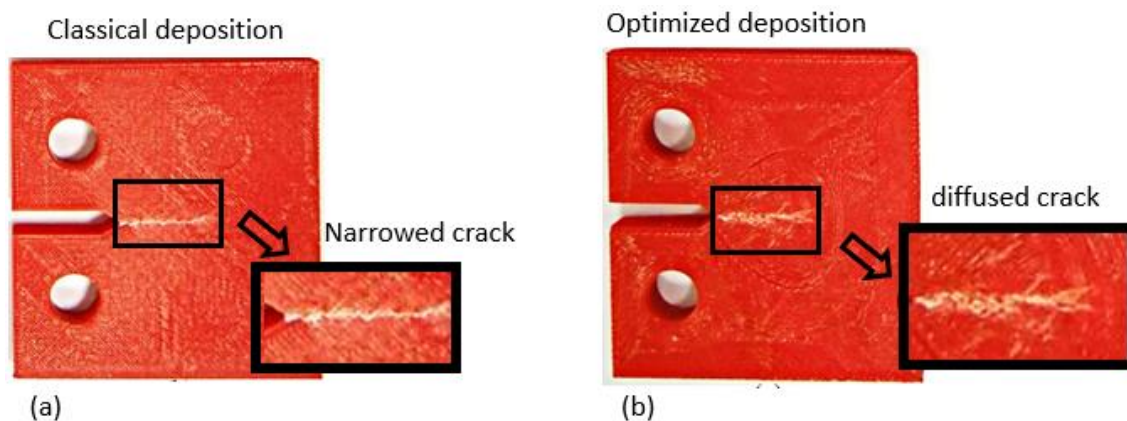


Figure 35. Extension de fissure : échantillons classiques (non optimisés) (a) et échantillons optimisés (b)

La procédure d'essais a utilisé des échantillons C-T fabriqués avec l'imprimante « MakerBot ». Une machine de test de traction Instron 4484 a été utilisée pour effectuer des tests de traction uni axiaux avec un outillage de traction adapté aux échantillons. La vitesse de déplacement de la machine était de 1 mm.min^{-1} avec une période d'échantillonnage de 500 m.s^{-1} . La capacité de charge de la cellule est de 150 KN et la procédure utilisait trois échantillons pour les modèles « classique » et « optimisé ». Des courbes de chargement par rapport au déplacement ont été utilisées pour caractériser la ténacité des échantillons selon la norme ASTM E1820-01 (Fatigue and Fracture, 2011).

Après les essais de traction, les résultats montrent la propagation de la fissuration à partir de l'entaille pour observer une certaine extension de la fissure. Les échantillons « classiques » présentent un faciès de rupture avec une fissuration droite due à l'alternance de couches avec un dépôt de fil à $\pm 45^\circ$. Les échantillons "optimisés" ont un faciès de rupture avec une fissuration dendritique qui traduit une dispersion du champ de contraintes localisé dans la zone qui reproduit les directions principales afin de résister à la propagation (figure 35 (b)).

3.4. Résultats et discussion

La figure 36 compare les courbes de chargement (force en N) par rapport au déplacement pour les échantillons C-T testés. Les valeurs numériques de la force maximale et de son déplacement correspondant sont indiquées dans les tableaux 6 et 7. Selon ces courbes, il convient de souligner deux améliorations principales concernant (i) la force maximale atteinte lors de l'essai et (ii) le déplacement.

(i) Pour les échantillons non optimisés, la charge de traction maximale ne dépasse pas 1410 N, alors qu'elle atteint 1743 N pour les échantillons optimisés. Nous avons également constaté que la moyenne de la force maximale à la rupture pour les échantillons optimisés est toujours supérieure à celle non optimisée. Les échantillons optimisés sont nettement renforcés grâce à une impression adaptée.

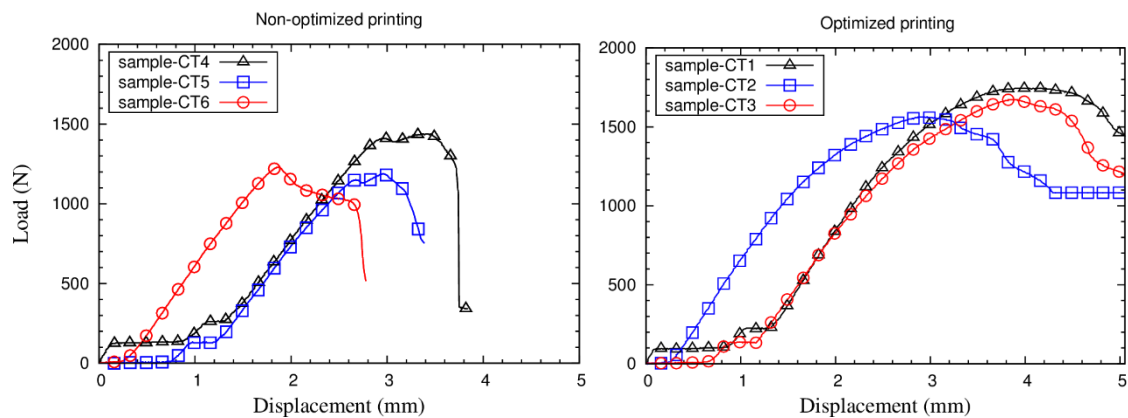


Figure 36. Résultats des essais de fracturation, comparaison entre les résultats d'impression non optimisés (à gauche) et les résultats d'impression optimisés (à droite).

Les résultats sont comparés dans les tableaux 6 et 7 avec la moyenne du comportement mécanique de trois échantillons ABS utilisés dans une imprimante 3D FDM afin de positionner les données.

Tableau 6. Résultats mécaniques d'échantillons classiques

| Classical type | Maximum applied force to Fracture (N) | Displacement (mm) |
|----------------|---------------------------------------|-------------------|
| Sample C-T 4 | 1409,35 | 2,99 |
| Sample C-T 5 | 1187,88 | 2,95 |
| Sample C-T 6 | 1232,15 | 1,87 |
| Average | 1276,46 | 2,60 |

Tableau 7. Résultats mécaniques des échantillons optimisés

| Optimized type | Maximum applied force to Fracture (N) | Displacement (mm) |
|----------------|---------------------------------------|-------------------|
| Sample C-T 1 | 1743,57 | 4,22 |
| Sample C-T 2 | 1562,36 | 2,94 |
| Sample C-T 3 | 1671,09 | 3,92 |
| Average | 1659,00 | 3,69 |

Les échantillons C-T optimisés ont une résistance à la rupture supérieure de 20% par rapport aux échantillons classiques.

(ii) Le déplacement maximal des mors juste avant la rupture finale atteint 3,8 mm pour les échantillons non optimisés, alors qu'il est toujours supérieur à 5 mm pour les échantillons optimisés. L'augmentation du déplacement repose sur le mécanisme de propagation de la fissure dans la structure composite. Les mécanismes de propagation de la fissure ont été fortement influencés par l'orientation du filament dans l'échantillon, comme expliqué ci-dessus. Il est à noter que davantage de tests sont nécessaires pour contrôler la dispersion observée dans divers échantillons.

Une autre observation peut être mise en évidence concernant le chemin d'extension de la fissure. La figure 35 montre clairement que, dans l'échantillon classique, le trajet de la fissure est presque rectiligne, tandis que dans l'échantillon optimisé, la fissure présente un aspect dendritique en raison des ramifications sur la fissuration. Ce comportement a également été observé pour les quatre autres échantillons (non représentés ici). Comme le test de fissuration est effectué dans des conditions de traction quasi-statiques, il n'existe aucun effet dynamique lié à la ramification observée. En fait, ce comportement découle de la structure locale du matériau et de la répartition des lignes de soudure provenant de l'orientation des filaments. Dans les échantillons optimisés, les fissures commencent à l'encoche de l'échantillon comme prévu. Au début de la traction, la fissure est typiquement en mode I (traction). Ensuite, la fissure est déviée par une ligne de soudure, et devient alors une fissure en mode mixte (traction + cisaillement). La contrainte de cisaillement entraîne un écrouissage et ainsi la résistance mécanique augmente localement.

Ce comportement semble être lié à l'amélioration de la ténacité à la rupture observée pour un échantillon optimisé. Le cisaillement local au voisinage de la ramification contribue à la dissipation d'énergie de la fissuration, retarde l'extension de la fissure dans l'échantillon et ainsi renforce la ténacité à la rupture.

Pour poursuivre cette étude, nous avons utilisé une technique de corrélation d'images (DIC, Digital Image Correlation) pour étudier le champ de déplacement local autour de la région affectée.

3.5. Conditions de mesures par corrélation d'images

La corrélation d'images numérique 2D a été utilisée pour observer le déplacement et les champs de contrainte dans l'échantillon. L'objectif de la technique par Digital Image Correlation (DIC) est de mesurer le champ de déplacement dans une « région d'intérêt » (ROI) pour un échantillon en cours de déformation. Les spécimens CT ont été peints afin de réaliser un mouchetis pour distinguer le déplacement de chaque région sur la surface de l'échantillon. Chaque échantillon a été photographié tous les 50 N (46 images ont été prises pendant le test) avec une résolution d'image de 720 x 480 pixels et une taille de sous-ensemble de 15 pixels. La même procédure d'essais de traction en mode I a été utilisée.

L'étude par DIC a été réalisée à l'aide du logiciel NCORR (Blaber et al., 2015; Harilal et al., 2015). Comme la déformation de l'échantillon n'est pas très élevée, l'image initiale non déformée a été prise comme image de référence. Ainsi, le champ de déplacement est mesuré et le champ de déformation est calculé par le logiciel de traitement d'images ainsi que les contraintes. Le logiciel NCORR calcule le gradient de déplacement en utilisant la méthode de la fenêtre de déformation (Pan et al., 2007, p. 207). Les composantes de déplacement $U(x, y)$ et $V(x, y)$ d'un ensemble de points $x_{min} < x < x_{max}$ et $y_{min} < y < y_{max}$ ont été ajustées par une équation plane utilisant la courbe de moindres carrés. La taille de la fenêtre (x et y) est réglée par l'utilisateur.

La déformation Green-Lagrange a été calculée en utilisant les pentes planes résultantes comme suit :

$$\begin{aligned}\epsilon_{xx} &= \frac{1}{2} \left(2 \frac{\partial U}{\partial x} + \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right) \\ \epsilon_{yy} &= \frac{1}{2} \left(2 \frac{\partial V}{\partial y} + \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right) \\ \epsilon_{xy} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial x} \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \frac{\partial V}{\partial y} \right)\end{aligned}$$

3.6. Étude du champ de déformation

Pour mieux comprendre les différents régimes de comportement lors de la fissuration, le DIC suit la déformation de l'échantillon C-T. La figure 37 et la figure 38 présentent les courbes de déplacement avec leurs photos instantanées correspondants aux échantillons optimisés et classiques. Le champ de déplacement ϵ_{yy} est indiqué dans ces instantanés. Pour faciliter la comparaison, la même plage de couleurs est utilisée dans les images.

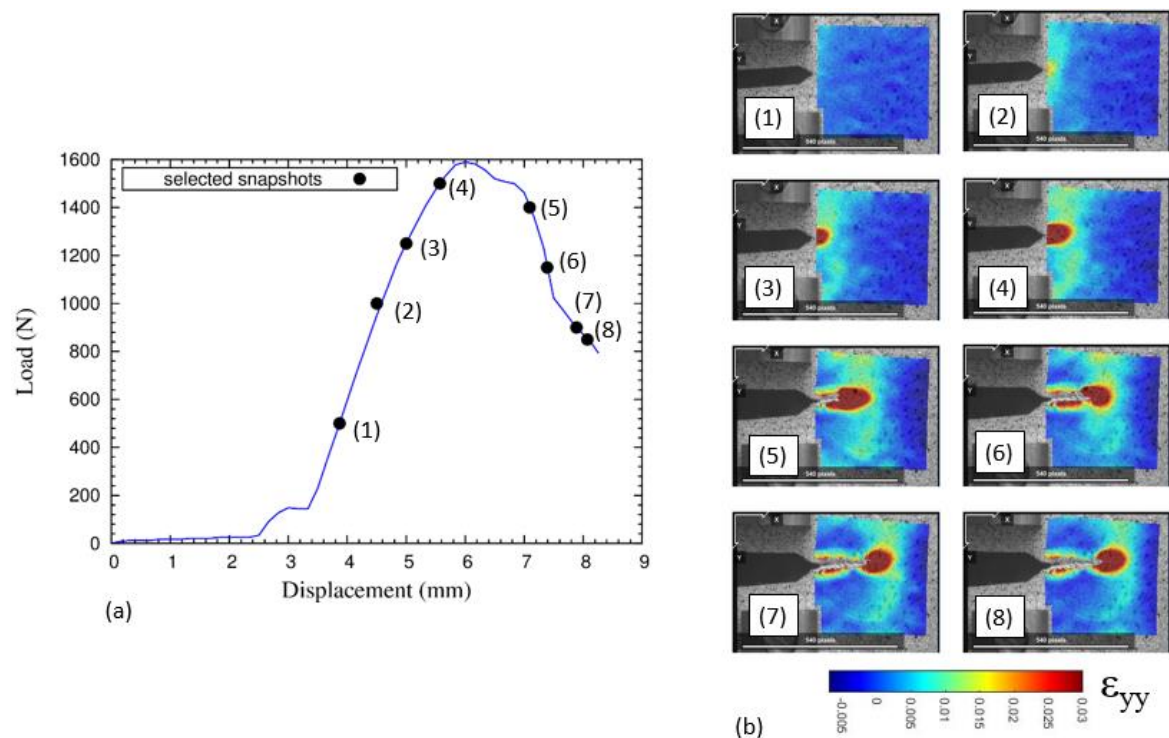


Figure 37. Résultats du test de fracturation d'un échantillon optimisé : (a) Courbe de la charge par rapport au déplacement. Le champ de déformation avec des photos instantanées a été analysé par DIC. Les résultats sont montrés en (b)

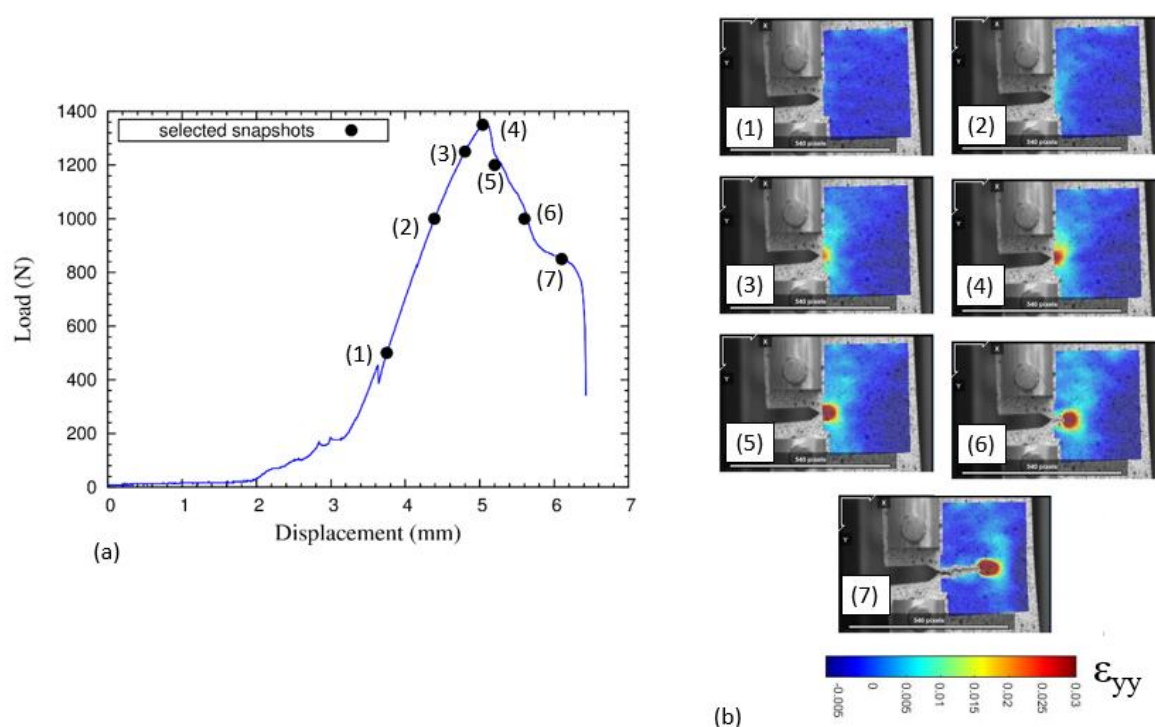


Figure 38. Résultats du test de fracturation d'un échantillon classique : (a) Courbe de déplacement de charge. Le champ de déformation avec des photos instantanées a été analysé par DIC. Les résultats sont montrés en (b)

Lorsque la force augmente par rapport au déplacement, la contrainte augmente dans l'échantillon et se concentre plus près de la pointe de l'entaille en V (zone de couleur rouge). La fissure s'amorce lorsque la force atteint une valeur maximale de 1600 N. L'extension de la fissure conduit à la bifurcation, une discontinuité géométrique apparaît donc dans la figure. Le logiciel de corrélation d'images (DIC) supprime les sous-ensembles de corrélation au sein de la discontinuité. Par conséquent, la zone de fissure apparaît sans être colorée. Cette manipulation permet de distinguer le chemin de la fissure. La diminution de la force correspond à l'extension de la fissure comme le montrent les photos instantanées. La région de concentration de contraintes précède presque l'extrémité de la fissure en raison de la singularité de contrainte attendue dans ce voisinage. L'optimisation locale du dépôt entraîne la modification des propriétés élastoplastiques dans cette région. En conséquence, la contrainte à l'interface entre la région optimisée et le reste de l'échantillon est visible (figure 37 photos 5 à 8). L'influence de cette concentration de contrainte est sans importance compte tenu du gain de résistance à la ténacité de l'échantillon. Il convient de noter que, dans la photo 5 de la figure 38, il n'y a pas de fissure apparente dans l'échantillon malgré la diminution de la force. Cela ne signifie pas qu'il n'y a pas de fissure, mais que la propagation à la surface n'est toujours pas détectable par le logiciel de corrélation d'images.

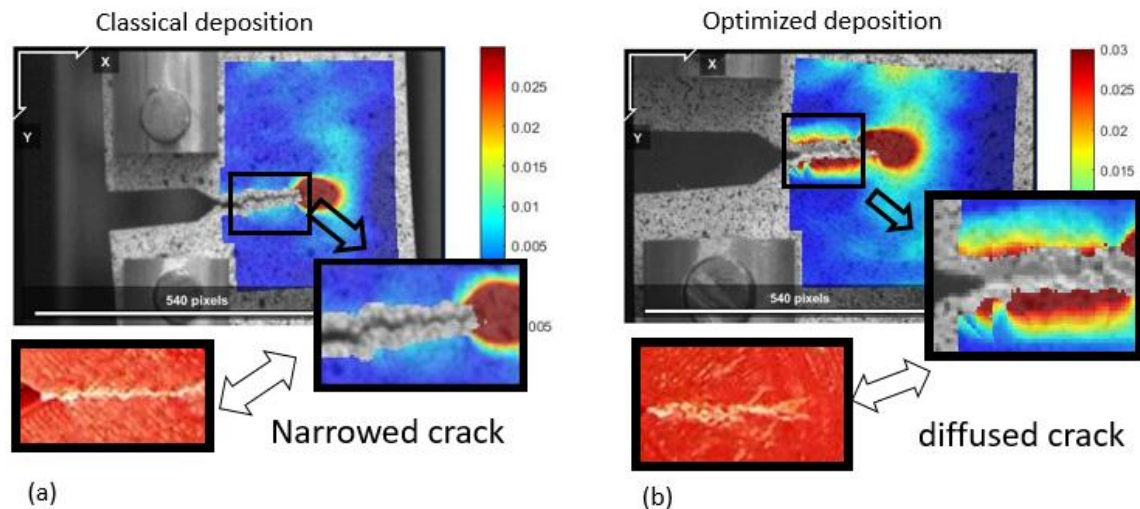


Figure 39. Champ de contrainte dans les échantillons fissurés (a) pour l'échantillon classique et (b) pour l'échantillon optimisé. Les encarts montrent le champ de déformation proche de la fissure. Pour l'échantillon optimisé, on peut distinguer les déformations plastiques résiduelles le long des lèvres de la fissure.

À la fin de l'extension de la fissure, la cartographie du champ de déformation d'échantillons classiques et optimisés a été analysée. La figure 39 montre le champ de déformation ϵ_{yy} près des lèvres de la fissure. Une contrainte fortement positive peut être distinguée au-dessus et au-dessous de la fissure dans l'échantillon optimisé. Cependant, le déplacement dans cette région reste « normal » dans l'échantillon classique. Cette déformation résiduelle située près de la surface des lèvres de la fissure est la signature d'une déformation plastique locale élevée. Cette déformation plastique résulte de la concentration de contraintes sur le voisinage de la pointe de la fissure. Cette contrainte résiduelle subsiste même après le déplacement et se traduit par l'extension de la fissure. Ce comportement est généralement observé lorsque la fissure traverse un matériau ductile. De l'autre côté, la concentration de contrainte dans l'échantillon classique est encore très locale. Le matériau est légèrement affecté par la concentration de contraintes. Par conséquent, aucune déformation plastique apparente n'a été observée près des lèvres de la fissure. Ce comportement est similaire à un comportement de fissuration fragile.

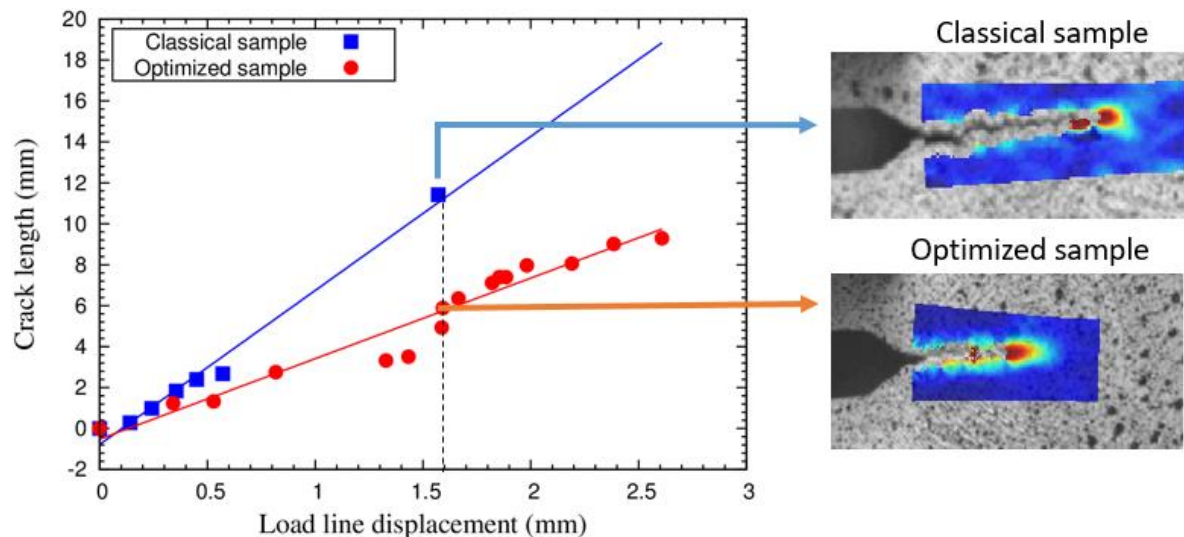


Figure 40. Comparaison de la longueur de fissuration d'une éprouvette optimisées et d'une éprouvette classique

Les résultats montrent que l'extension de la fissure dans l'échantillon classique est deux fois plus rapide que dans l'échantillon optimisé. Les photos de la figure 40 comparent la longueur des fissures dans les deux types d'échantillons selon le déplacement. La longueur de la fissure dans l'échantillon classique est deux fois plus importante que dans l'échantillon optimisé. Pour bien comprendre les phénomènes physiques au niveau du point de fissuration, nous proposons d'étudier le facteur d'intensité de contraintes utilisé en mécanique de la fracture.

3.7. Facteur d'intensité de contrainte (SIF)

Le facteur d'intensité de contraintes (Stress Intensity Factor, SIF) a été mis au point en 1957 par George R. Irwin qui est considéré comme le père de la mécanique de la rupture (Irwin, 1957). Le facteur d'intensité de contrainte est représenté par la variable K . Il s'agit de l'un des paramètres les plus importants et les plus utiles en mécanique de la rupture. Le facteur d'intensité de contrainte décrit l'état de contrainte au niveau de la pointe de fissuration et est lié au taux de croissance de la fissure afin d'établir des critères de rupture.

Ci-après, tous les paramètres ou noms de variables utilisés dans les équations sont définies dans le tableau 8.

Tableau 8. Liste des variables utilisées pour le calcul du SIF

| Variable (unit) | signification |
|-----------------------------------|---|
| σ_{ij} (Pa) | ij^{th} component of the stress tensor |
| σ_I and σ_{II} (Pa) | Principal stresses |
| α (rad) | Principal direction |
| ϵ_{ij} | ij^{th} component of the Green Lagrange strain tensor |
| $U(x, y)$ or U (m) | X displacement field expressed in Cartesian coordinates |
| $V(x, y)$ or V (m) | Y displacement field expressed in Cartesian coordinates |
| $U(r, \theta)$ (m) | X displacement field expressed in polar coordinates |
| $V(r, \theta)$ (m) | Y displacement field expressed in polar coordinates |
| E (pa) | Young modulus = 1.2 Gpa |
| ν | Poisson ratio = 0.35 |
| K_I ($MPa\sqrt{m}$) | stress intensity factor for mode I |
| K_{Ic} ($MPa\sqrt{m}$) | critical K_I |
| P^* (N) | measured force at which the crack begins |
| B (m) | Sample thickness = 6.5 mm |
| W (m) | Sample width = 60 mm |
| a_0 (m) | Initial crack size = 12 mm |

L'équation suivante a été utilisée pour déduire le SIF critique K_{Ic} appliqué en mode I pur (en ouverture seule car le mode mixte I/II prendrait en compte le cisaillement) :

$$K_{Ic} = \frac{P^*}{B\sqrt{W}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

Où $f\left(\frac{a}{W}\right)$ une fonction sans dimension définie comme suit :

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{2 + \frac{a}{W}}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \left[0.886 + 4.64 \left(\frac{a}{W}\right) - 13.32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right]$$

Les résultats pour les échantillons classiques et optimisés ont été comparés et résumés dans les tableaux 9 et 10. Pour les échantillons classiques, la valeur moyenne du SIF critique est $3,42 \pm 0,3 MPa\sqrt{m}$, alors qu'il atteint $4,45 \pm 0,25 MPa\sqrt{m}$ pour les échantillons optimisés. Les échantillons optimisés sont nettement plus solides que les échantillons classiques grâce à une impression adéquate. Les échantillons C-T optimisés ont une SIF jusqu'à 25% supérieure à celle des échantillons classiques. Ce résultat confirme l'effet de renforcement avec un état de contraintes plus précis au niveau de la pointe de la fissuration.

Tableau 9. Résultats pour les échantillons C-T classiques

| sample label | Maximum applied force to Fracture (N) | Displacement (mm) | K_{Ic} (MPa. \sqrt{m}) |
|--------------|---------------------------------------|-------------------|-----------------------------|
| Sample CT 4 | 1409.35 | 2.99 | 3.78 |
| Sample CT 5 | 1187.88 | 2.95 | 3.18 |
| Sample CT 6 | 1232.15 | 1.87 | 3.3 |
| Average | 1276.46 | 2.60 | 3.42 |

Tableau 10. Résultats pour les échantillons C-T optimisés

| sample label | Maximum applied force to Fracture (N) | Displacement (mm) | K_{Ic} (MPa. \sqrt{m}) |
|--------------|---------------------------------------|-------------------|-----------------------------|
| Sample CT 1 | 1743.57 | 4.22 | 4.68 |
| Sample CT 2 | 1562.36 | 2.94 | 4.19 |
| Sample CT 3 | 1671.09 | 3.92 | 4.48 |
| Average | 1659.00 | 3.69 | 4.45 |

3.8. Bilan

À travers la reproduction des directions principales des contraintes provenant d'une étude par simulation numérique et une impression 3D par dépôt de fil chaud, cette étude propose une solution originale de renforcement des matériaux structurés ou architecturés. Cette amélioration de l'architecture à travers l'utilisation de l'ingénierie numérique et d'un procédé additif entre dans l'étude d'un matériau structuré *avancé* dans le sens où il est capable de répondre à une sollicitation mécanique prédéfinie et ainsi d'être fonctionnalisé. La caractérisation mécanique est basée sur une étude comparative entre des échantillons optimisés et des échantillons classiques en utilisant une éprouvette de type Compact Tensile (C-T) dans le cadre d'essais de fracturation en mode I (en ouverture simple par traction).

Les résultats sont analysés par une méthode de corrélation d'image numérique (DIC) permettant de calculer la ténacité à la rupture et les déplacements alors que le facteur d'intensité de contrainte (SIF) aide cette étude à poser les bases de la mécanique de la rupture élastique linéaire (LEFM) appliquée à ce matériau pré-structuré (domaine des matériaux intelligents).

En résumé, les sections précédentes ont montré que :

- Le déplacement est plus grand dans l'échantillon optimisé ;
- L'extension de la fissure entraîne une déformation plastique élevée près des lèvres de la fissure dans l'échantillon optimisé ;
- La fissure se propage beaucoup plus vite dans l'échantillon classique.

En se référant à ces observations, une modification importante du comportement de la fracturation peut être notée. La fracture dans l'échantillon classique montre un comportement « fragile » alors que l'échantillon optimisé montre un comportement renforcé du type « ductile ». En effet, l'éprouvette optimisée a une résistance à la fracture supérieure de 20% par rapport aux éprouvettes classiques, avec également une SIF jusqu'à 25% supérieure. Actuellement, nous avons élargi l'étude à des essais en mode mixte (mode I/II) à travers des éprouvettes de flexion à encoches déportées pour prendre en compte l'effet du cisaillement (figure 41) (stage de Master 2 de M. Pietro LANZILLOTTI) et nous avons également débuté une étude sur le modèle numérique avec Abaqus pour aboutir à un modèle comportemental (thèse de M. Marouene ZOUAOU). Le calcul de l'énergie restituée lors de la fissuration peut être calculée à partir d'une intégrale, l'intégrale J, sur n'importe quel contour entourant la fissure et elle a fait l'objet d'un stage de Master 2 avec M. Adriano LENTI.

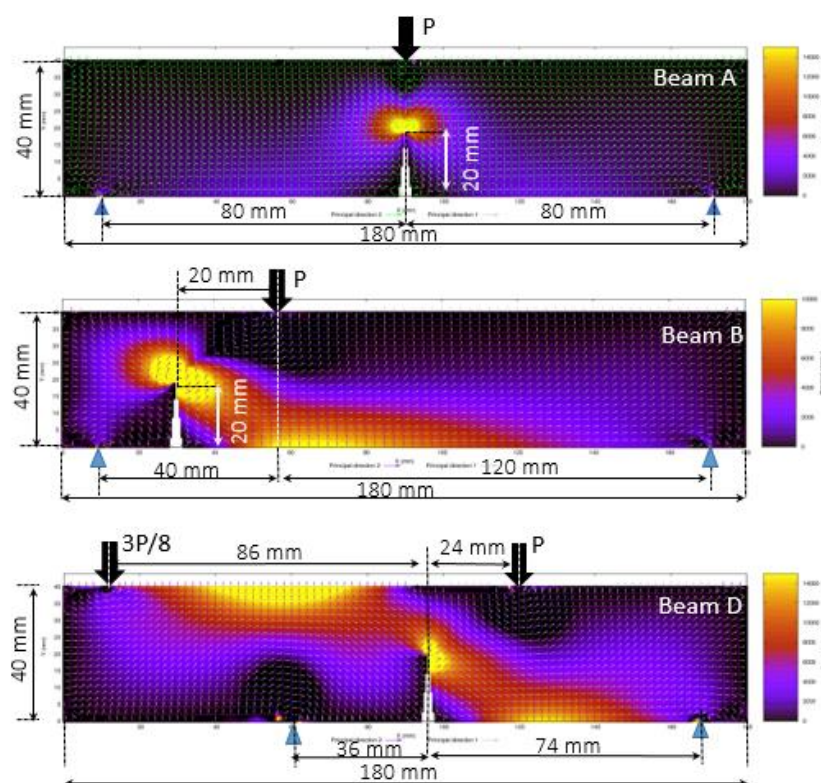


Figure 41. Éprouvettes de flexion en mode mixte I/II

4. Bilan général

Les deux travaux de recherche présentés enrichissent l'intégration des connaissances métiers sur la fabrication additive pour améliorer le matériau structuré par impression 3D. Ainsi, le premier prend en compte les critères d'usage et de fabrication additive, et le second, le dépôt de matière optimisé dépendant des critères précédents. Une première approche Peau et Squelette conduit à l'obtention des critères et un moteur de résolution basé sur une optimisation multicritère propose les solutions optimales utiles au concepteur. Dans cette continuité, le développement du matériau structuré avancé se limite à une condition de fabrication des éprouvettes par FDM et une meilleure compréhension de l'influence des critères de fabrication est primordiale à travers cette approche de DFAM. Les paramètres d'impression 3D utilisés dans le projet de fabrication du matériau structuré peuvent également influencer le comportement physique du composite. Ainsi, la température d'extrusion, la rhéologie du polymère et son influence sur le soudage des filaments avec également la superposition des couches sont des critères à prendre en compte. L'interface entre les filaments fondus ou même les grains fondus dans le cas d'une application métallique influence le comportement mécanique global du produit. À une échelle plus importante, la géométrie du produit joue un rôle dans la compréhension du comportement mécanique du produit. L'expertise proposée tend à définir une ingénierie intégrée capable d'optimiser les solutions de fabrication d'un matériau intelligent structuré par impression 3D. L'ensemble sert à développer un modèle comportemental utilisé en simulation numérique afin de concevoir un produit intégrant le comportement physique de ce matériau structuré pour le renforcement et la fiabilité des systèmes mécaniques. D'autres matériaux architecturés par impression 3D sont en cours d'étude comme les matériaux Auxétiques avec un dépôt de filament polymère ou métallique.



Chapitre IV

Discussion

Sommaire

| | |
|--|-----|
| 1. Introduction | 105 |
| 2. Technique, connaissance et savoir-faire..... | 105 |
| 3. La place de l'humain dans la gestion de la connaissance | 108 |
| 4. Généralisation de la démarche..... | 109 |

Discussion

1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif d'approfondir les réflexions portées par les différents projets initiés et présentés dans les chapitres précédents. Le principe de Fabrication Additive et les méthodes numériques complémentaires ont bouleversé les pratiques de conception et de fabrication d'un produit. Les avantages qui en découlent ont ouvert la voie au développement de produits innovants et à la réduction de la durée du processus de conception. La fabrication directe ou de masse prend forme à travers différents exemples industriels confrontés également à des difficultés de qualification des pièces. Nous constatons que l'impression 3D a trouvé sa place dans les bureaux d'études ou dans la réalisation de moules de fonderie ou d'outillages rapides car ils sont plus facilement intégrables à une chaîne de production. Cependant, la fabrication directe souffre d'une implantation déconnectée d'une production dépendante d'une cadence et d'une configuration encore difficilement adaptable. Certains exemples, souvent dédiés à des produits personnalisés et des petites séries de production, montrent cependant les capacités actuelles qu'offre la fabrication additive professionnelle. Dans une autre mesure, l'impression 3D grand public rend accessible la fabrication d'objets divers chez soi et souvent à travers des applications simples mais utiles pour le particulier (ex. remplacement de petits mécanismes, création d'objets et figurines, ...). Il est encore difficile de mesurer l'influence de ces nouveaux producteurs, leur niveau de compétences en impression 3D dans les technologies utilisées et leur compréhension dans le comportement mécanique des pièces. Ainsi, nous percevons un croisement entre la technique, la connaissance et le savoir-faire mobilisés dans les différents développements du domaine de la Fabrication Additive. L'expert en FA joue un rôle important dans l'intégration des connaissances et doit permettre d'accompagner le concepteur dans la réalisation d'un produit. Comment pouvons-nous prendre en compte la Fabrication Additive dans un processus 4.0 ? Quelles influences auront les démarches proposées et comment vont-elles impacter la place de l'homme dans la société ? Une mutation s'opère progressivement et beaucoup de questions restent en suspens.

2. Technique, connaissance et savoir-faire

Étymologiquement, le mot « technique » est issu du mot grec (« techné ») qui désigne une « production » ou « une fabrication matérielle ». Elle utilise des méthodes issues de connaissances scientifiques ou simplement des méthodes issues d'un savoir-faire artisanal

Discussion

ou industriel. Dans le cas de l'impression 3D, le bouleversement intervient dans l'accessibilité aux technologies et la dématérialisation d'un niveau d'expertise. Vous trouvez facilement un logiciel adapté à un certain niveau de conception (débutant, intermédiaire ou expert) ou même directement votre modèle 3D sur des plateformes dédiées au partage de fichiers (ex. Thingiverse). En conception mécanique, plus exigeante, des connaissances scientifiques de plus haut niveau sont indispensables pour répondre aux spécificités définies dans un cahier des charges. La problématique apparaît dans les nouvelles connaissances qui découlent de la maîtrise des technologies et des structures produites par Fabrication Additive. Même à un niveau mésoscopique, de nombreuses solutions lattices s'offrent au concepteur et au fabricant avec un impact sur le comportement mécanique du produit qui dépendra fortement de la technologie, du matériau et de son usage final. Les connaissances actuelles sont incomplètes et le domaine de la Fabrication Additive souffre d'un manque de données fiables. Ainsi, les entreprises et les laboratoires de recherche caractérisent leurs propres structures selon leur besoin et une application donnée. Dans le cas du grand public, cette démarche est difficilement envisageable car les outils de caractérisations ne sont pas démocratisés et reposent sur un niveau de compétences élevé. Néanmoins, à travers un retour d'expérience empirique et plusieurs itérations, certains utilisateurs obtiennent une pièce fonctionnelle correctement dimensionnée. Nous retrouvons également comme pour les procédés traditionnels un savoir-faire indispensable à la maîtrise d'une technologie d'impression 3D. L'orientation d'une pièce sur un plateau de fabrication ou dans un lit de poudre selon une technologie, une géométrie spécifique et parfois une marque d'imprimante 3D est déterminée sur la base d'un retour d'expérience. Il est aujourd'hui nécessaire d'approfondir la démarche de conception et de fabrication selon des connaissances et un savoir-faire propres aux applications envisagées.

La connaissance peut être tacite ou explicite. Une connaissance tacite est une connaissance difficile à formaliser, relative au vécu personnel (obtenue par expérience). Alors qu'une connaissance explicite est une connaissance clairement énoncée sur un document ou sur un support pédagogique facilement transmissible. La représentation de l'information et de la connaissance à travers des documents n'est bénéfique que si elle est représentée sous une forme compréhensible et exploitable [Bellinger G, 2004]. Ainsi, il existe deux objectifs fondamentaux [Hilléreau M, 2008]:

Discussion

- **Capitaliser la connaissance**, ce qui nécessite d'être en mesure de créer, d'extraire, d'analyser, de structurer et de formaliser la connaissance, puis de pouvoir l'actualiser.
- **Réutiliser la connaissance**, ce qui implique d'avoir des moyens de diffusion, de protection, de recherche et de mise en œuvre.

Les difficultés de gestion de la connaissance émergent lorsque nous essayons de recenser l'ensemble de nos connaissances. Nous ne sommes pas toujours conscients de son existence. [Roucoules L, 1999] indique que la part consciente du savoir peut être assimilée au sommet d'un iceberg. Le savoir-faire est souvent tacite et parfois difficile à formaliser, sans compter la réticence que peuvent avoir certains acteurs de le partager. Nous retrouvons plusieurs normes ISO (Ex. "ISO/ASTM 52910:2018 - Additive Manufacturing -- Design - Requirements, guidelines and recommendations", 2018) qui essaient de recenser les bonnes pratiques mais restent incomplètes au vu des récentes expérimentations et de la croissance des nouvelles technologies de Fabrication Additive. Aujourd'hui, des bases de données peu nombreuses et des informations contradictoires présentes dans la communauté ne nous permettent pas d'avoir accès à des connaissances fiables concernant la FA. De plus, toutes les technologies et matériaux impliqués génèrent de grandes quantités de données sur les propriétés mécaniques, les paramètres de fabrication, les données de test, la simulation et la qualification des pièces. La base de données proposée par GRANTA MI™ ("GRANTA MI:Additive Manufacturing", 2018), qui propose des outils de gestion de données afin de capturer l'historique complet du processus de Fabrication Additive, remplit partiellement sa mission car la géométrie influence le comportement physique du produit.

La capitalisation des nouvelles connaissances et le développement de nouveaux outils qui accompagneraient le concepteur dans sa démarche de conception semblent la solution la plus pertinente si les BDD utilisées viennent à se standardiser. Autant pour l'industriel que pour le grand public, cette avancée enrichirait le domaine de l'ingénierie numérique à travers des modèles comportementaux qui sont actuellement pilotés par différentes initiatives déconnectées. Les hommes et les femmes travaillant sur la conception et la Fabrication Additive sont toujours confrontés à des données contradictoires qui les poussent à engager de nouvelles campagnes de caractérisations.

3. La place de l'humain dans la gestion de la connaissance

La conception d'une pièce impliquant l'utilisation de l'impression 3D est fiable uniquement si nous comprenons les paramètres de fabrication et leurs effets sur les matériaux, afin de pouvoir contrôler les performances, la cohérence et la qualité des pièces. L'intégration de ces nouvelles connaissances doit être contrôlée par l'homme tout en assurant maîtrise et exactitude. Cette démarche prend un sens lorsque l'homme accompagne le développement de la technique moderne dont il se sert dans la perspective d'une utilité. L'objectif est de donner un sens à la construction, l'ordonnancement, l'installation d'une base de connaissances commune de façon cohérente pour répondre à un besoin. La problématique de cette approche repose sur la portée de l'intérêt commun contre l'intérêt personnel. Une organisation à but non lucratif est capable de mettre à disposition une base de données accessible pour tous mais ne regroupera peut-être pas l'ensemble des expertises dans le domaine de la Fabrication Additive. Une organisation privée cultive le secret pour protéger son avance concurrentielle mais ne regroupe pas non plus l'ensemble des expertises. La communauté scientifique regorge de données exploitables mais elles ne convergent pas vers un organisme capable de contrôler l'exactitude des résultats pour ensuite les ordonner dans une base centralisée de connaissances. Nous retrouvons une contradiction bien actuelle dans la définition d'une gestion universelle de la connaissance qui a pour mission de recueillir et utiliser l'ensemble des données afin de produire des résultats plus fiables. Nous pouvons également faire un parallèle avec l'éducation pour le transfert de connaissances dans la formation initiale et continue avec les nouveaux outils pédagogiques numérique qui ne regroupe pas l'ensemble des expertises (ex. Pacte Fabrication Additive qui repose sur une expertise sur la maîtrise des technologies, de l'ingénierie numérique et du comportement des matériaux obtenus par impression 3D). Une filière Fabrication Additive pourrait remplir cette mission de capitalisation des connaissances provenant des méthodes dédiées à la Fabrication Additive. Ainsi, l'utilisateur et sa compréhension de la gestion des connaissances sont en conflit dans le développement du domaine de la Fabrication Additive (comme dans bien d'autres domaines) pour mieux répondre aux besoins de la société. L'intérêt économique et écologique de l'impression 3D reste un élément convergeant qui pousse le développement des méthodes et des technologies portées par les applications liées aux technologies additives métalliques ou polymères.

4. Généralisation de la démarche

Cette dernière section décrit plus précisément le positionnement des projets développés précédemment dans cet environnement global de recherches et d'innovations au service de la société dans le domaine de la Fabrication Additive. Le diagramme ci-dessous (figure 42) propose un modèle idéal qui décrit la configuration actuelle des initiatives portées par ces projets pédagogiques et de recherche.

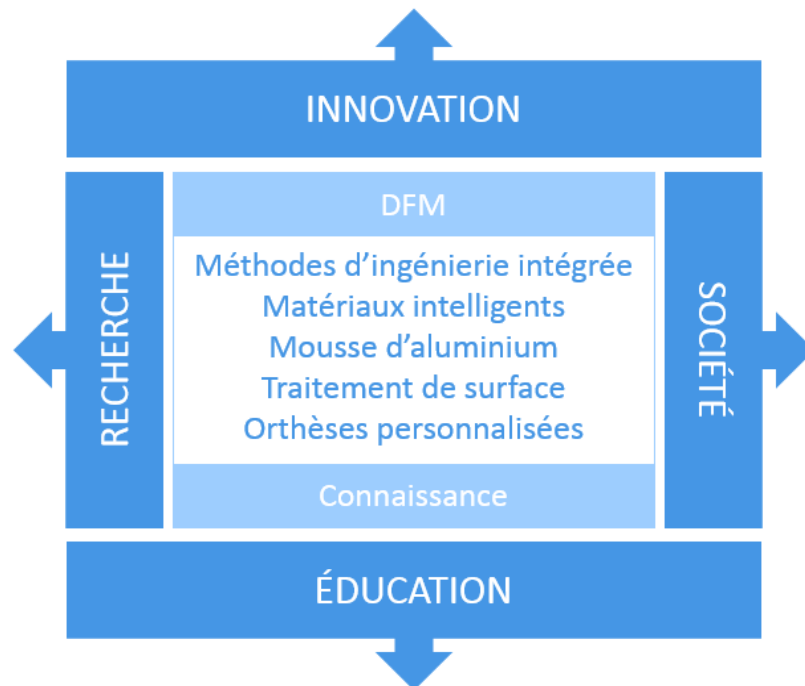


Figure 42. Positionnement des projets développés dans le domaine de la fabrication additive

L'approche est transversale et vient enrichir la recherche, l'innovation, la société avec ses activités (et ses enjeux sociétaux) et l'éducation avec de nouvelles méthodes pédagogiques ainsi que le partage de connaissances. La construction d'une plateforme collaborative de partage de la connaissance qui serait alimentée en permanence par des résultats d'analyses expérimentales et numériques, et par des règles de conception et de fabrication faciliterait les avancées et la standardisation de la fabrication additive. Les projets décrits dans ce manuscrit contribuent au développement du domaine de la Fabrication Additive mais apportent également une valeur ajoutée à de nombreuses activités. Les débouchés scientifiques et technologiques seront exposés dans la section suivante au niveau des perspectives.

Discussion



Conclusion et perspectives

Nous concluons ce manuscrit par un bilan général qui rappelle les activités pédagogiques et de recherche, les projets, leurs apports et leurs limites, puis nous abordons des perspectives possibles dans le cadre de la fabrication additive.

Le chapitre 1 a permis de définir le contexte général dans lequel évoluent les activités et les projets présentés dans ce mémoire. Nous avons parcouru un certain nombre de travaux permettant de définir des opportunités et des verrous propres au domaine étudié. La liberté de conception, la flexibilité et la personnalisation fournis par le principe de Fabrication Additive sont des opportunités qui peuvent être utilisées pour répondre aux besoins de la société avec un impact significatif sur l'économie et l'écologie. Les verrous technologiques et scientifiques montrent qu'il est impératif pour les industriels d'obtenir une meilleure compréhension du comportement physique des structures mécaniques obtenues par impression 3D afin de maîtriser le processus de conception et de fabrication d'un produit. Cette première partie débouche sur les travaux de recherche et la nécessité de développer une méthodologie de conception et de fabrication additive dans la lignée du Design For Additive Manufacturing (DFAM) et également de proposer des structures imprimées en 3D plus adaptées aux sollicitations mécaniques à travers un dépôt de matière structuré. L'ensemble est porté par la nécessité d'aboutir à un modèle numérique capable de prendre en charge des critères d'usage et de fabrication additive, ainsi qu'à un modèle comportemental pour accompagner le concepteur dans ses choix.

Le chapitre 2 a présenté les activités pédagogiques et de recherche ainsi que les responsabilités prises depuis 2013. En particulier, la création d'une plateforme technologique sur la Fabrication Additive a ouvert de nombreuses opportunités pour construire des activités d'enseignement et de recherche tout en développant le réseau académique et professionnel de l'EPF et de l'UTT. L'un des objectifs est de transmettre les bonnes pratiques en ingénierie numérique et en fabrication pour la maîtrise des nouveaux procédés d'impression 3D ainsi que leurs processus de développement (en cohérence avec FabAdd-Académie). Les résultats obtenus grâce aux projets initiés ont progressivement installé une légitimité dans l'environnement Troyen et régional. Le financement régional et son portage par l'EPF dans le cadre d'une mission de création de formations en ligne sur la Fabrication Additive en partenariat avec les établissements d'enseignements Troyens (l'UTT, l'ESTP, l'IUT, et l'école de design) montrent la crédibilité de cette activité. Notre reconnaissance au niveau national à travers le rapport dédié sur la fabrication additive en 2017 et réalisé par le Pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques (Pipame) montre la pertinence du travail accompli depuis mon arrivée en

2013. Une équipe de 8 personnes s'est progressivement mise en place sur le campus de Troyes afin de structurer les projets et d'intégrer des compétences complémentaires. Mes responsabilités en enseignement et en recherche comme le pilotage du Master of Science ICE (Innovation, Creativity, Entrepreneurship) et ma mission de délégué recherche m'ont permis de mesurer les tenants et les aboutissants de la gestion de projets pédagogiques et de recherche.

Dans le chapitre 3, nous avons détaillé deux travaux de recherche majeurs qui ont influencé mon parcours d'enseignant-chercheur. Ces projets n'auraient pas abouti sans la complémentarité des compétences présentes à Troyes en ingénierie numérique, en impression 3D à travers différentes technologies, en optimisation multicritère, en traitement de surfaces, en mécanique de la rupture (compétences du Professeur Naman RECHO et du Dr Ali MAKKE) et en thermodynamique. Le premier travail définit une méthodologie de conception et de fabrication additive afin de maîtriser l'influence des critères d'usage et de fabrication pour guider le concepteur dans sa démarche de conception de produits. Cette approche, basée sur le Design For Additive Manufacturing (DFAM), propose des solutions idéales à travers une optimisation multicritère à deux objectifs, l'optimisation du temps et de la masse. Le second décrit une structuration du dépôt d'un thermoplastique (ABS) avec une technologie FDM. L'originalité de cette recherche repose sur la reproduction des directions principales des contraintes visualisables en simulation numérique afin de déposer les filaments sur les mêmes lignes de forces. Le contrôle de la trajectoire de dépôt à travers un G-Code a abouti à la réalisation d'éprouvettes Compact-Tensile (C-T). Une étude comparative entre des échantillons classiques et optimisées à travers des essais de fracturation en mode I et une observation par corrélation d'images (DIC) montrent que la version optimisée a une ténacité à la fracture supérieure à 20% et un facteur d'intensité de contraintes (SIF) 25% supérieur à la version classique. L'objectif est d'obtenir un modèle comportemental grâce à une meilleure compréhension du comportement mécanique de ce matériau structuré ou fonctionnalisé (sujet de thèse en cours avec Monsieur Marouene ZOUAOUI). L'ensemble enrichit l'intégration des connaissances métiers pour optimiser le processus de conception et de fabrication additive d'un matériau structuré avancé.

Le chapitre 4 a présenté une réflexion sur le positionnement de ces développements dans la société actuelle. Les avantages qu'apportent la fabrication additive dépassent les changements structurels afin de répondre aux nouveaux besoins de la société de consommation. Avec le volume de fabrication, la vitesse d'impression constitue l'un des facteurs clefs de la productivité de la FA et de son adoption massive. La place de l'homme

dans ce processus proche d'une chaîne numérique de plus en plus accessible pose quelques interrogations. Nous remarquons que les connaissances proposées par la communauté scientifiques sont parfois incomplètes, cloisonnées et que la standardisation est en cours d'élaboration pour une meilleure qualification de toutes les étapes qui jalonnent le processus de conception et d'impression 3D.

La méthodologie DFAM proposée dépend des règles et critères de choix liés aux procédés additifs mais également de l'usage du produit qui passe par une définition fonctionnelle de celui-ci. Nous sommes confrontés aux mêmes difficultés de compréhension lors de la mise en place d'un processus de conception et de fabrication additive qui influence la structure et les comportements physiques des matériaux. Il est évident qu'un travail important peut encore être réalisé sur cette partie afin de définir un modèle comportemental. Nous pouvons citer trois sujets de recherche importants :

- **Les modèles comportementaux**, qui doivent prédire le comportement des structures composites fabriquées par un procédé additif. La représentation du comportement physique est extrêmement complexe et une homogénéisation est envisageable mais la compréhension des phénomènes aux niveaux micro, méso et macroscopique nécessite encore de nombreux essais mécaniques et thermiques. L'anisotropie et les singularités des matériaux, dépendant de la direction de fabrication et du dépôt de filaments ou de la fusion d'un cordon couche par couche, complexifient la représentation du modèle comportemental. La thèse de M. Marouene ZOUAOUI étudie actuellement cette orientation.
- **Les méthodes d'aide à la conception**, qui doivent prendre en compte les règles et les critères d'usage et de fabrication à travers une méthodologie générique comportant une optimisation multicritère basée sur toutes les technologies d'impression 3D. Il nous semble nécessaire d'apporter un accompagnement dès la définition du produit bien avant une modélisation 3D qui induirait une prise de décisions parfois subjective. Elles aideraient le concepteur dans sa prise de décisions afin de définir la forme de son produit ainsi que l'optimisation de l'orientation, de la masse et du temps de fabrication. La thèse de Mme Elnaz ASADOLLAHI YAZDI a lancé cette piste de recherche.
- **Les méthodes de génération de trajectoires**, qui regroupent un grand nombre de parcours de remplissages comme les treillis ou les nids d'abeille selon les procédés additifs métalliques ou polymères. Il est en effet observé qu'elles ne sont pas toujours optimisées aux efforts physiques supportés par la géométrie ou la structure composite elle-même. Ce point est un constat qui a été utilisé pour définir le projet sur le matériau

intelligent ou la structure avancée par FDM présentée dans ce mémoire. Les deux stages de Master 2 ont étudié l'élaboration de cette méthode de génération de trajectoires.

Perspectives :

Les travaux initiés par le Pacte Grandes Écoles fabrication additive reposent actuellement sur une approche multi-établissements qui débouchera sur des programmes d'enseignement croisés. L'approche par compétences permettra de répondre aux besoins du marché afin d'aboutir à plusieurs scénarios d'enseignement qui correspondront aux expertises des établissements d'enseignement Troyens. En 2020, plusieurs parcours devront être définis avec leurs organisations multisites. Les nouveaux outils pédagogiques seront utilisés pour trouver un compromis entre les connaissances accessibles à travers une plateforme sur Internet et les cours ainsi que les travaux pratiques qui seront dispensés dans les établissements ou dans les entreprises.

Pour les travaux de recherche, il existe une continuité entre l'approche DFAM proposée et le projet de développement d'un matériau structuré ou architecturé. Ce dernier fait l'objet d'une attention particulier car nous sommes en train de définir son modèle comportemental avec Abaqus grâce aux travaux de M. Marouene ZOUAOUI. Il est enrichi par d'autres résultats provenant d'essais de flexion pour prendre en compte les efforts de cisaillements. L'objectif est de tendre vers la réalisation d'une géométrie en 3 dimensions car nos éprouvettes sont actuellement une représentation projetée en 2D des lignes de force. La reproduction du champ de contraintes en 2,5D (2D et demi) ou pseudo 3D pour imprimer des pièces complexes prendraient également en charge les contraintes mécaniques internes au matériau anisotrope. Or, établir le champ de contraintes au voisinage d'une entaille dans un milieu tridimensionnel pose encore quelques difficultés de résolution (El Kabir et al., 2016; Yao et al., 2016) et particulièrement lorsque le matériau présente un comportement anisotrope. À partir de la formulation du champ de contraintes en milieu bidimensionnel anisotrope au voisinage d'une entaille en V (Cheng et al., 2015; Li et al., 2001), nous nous proposons d'étendre la solution au milieu tridimensionnel afin d'appliquer la technologie d'impression 3D.

L'installation de l'imprimante 3D métallique (Metal X, Markforged) à l'EPF de Troyes ouvre des perspectives afin de transférer la méthode d'optimisation du dépôt de matière à la réalisation d'éprouvettes et à des applications industrielles. La technologie d'impression métallique MIM ou PIM et ses performances restent à étudier et les prochains essais de caractérisations doivent venir enrichir les connaissances et les projets présentés. Le projet

de mousse d'aluminium pour le stockage d'énergie thermique peut également se développer grâce à la fabrication directe de nouvelles structures ouvertes comportant des éléments périodiques optimisés topologiquement. La réflexion d'une approche hybride ou multi-procédés pour concevoir une pièce fait partie de notre feuille de route afin d'élargir les avantages et les complémentarités que peut procurer la fabrication additive. L'ensemble pourrait aboutir à une plateforme collaborative de gestion de la connaissance au service de la fabrication additive et de la société.

Ainsi, de nouveaux objectifs scientifiques et technologiques peuvent être détaillés ci-dessous :

- **La compréhension approfondie du comportement physique du matériau structuré avancé** : l'étude des phénomènes physiques qui opèrent au niveau de la pointe de fissuration des éprouvettes de fracturation est très complexe à travers une structure composite. Il est important de finaliser l'étude dédiée aux éprouvettes de flexion en mode mixte I/II pour prendre en compte le comportement en cisaillement. Le facteur d'intensité de contrainte (SIF) et le taux de restitution d'énergie (l'intégrale J) mesurés aux alentours de la pointe de fissuration vont nous permettre d'approfondir notre compréhension des phénomènes qui gouvernent la propagation de la fissuration. Cette étape est également nécessaire afin de définir le modèle comportemental sur Abaqus. La technique de corrélation d'images utilisée précédemment se limite à un niveau d'échelle et une résolution d'images trop faibles pour étudier précisément l'intensité de contraintes à la pointe de la fissuration. L'utilisation d'un micro-mouchetis, d'une micromachine de traction et d'un microscope électronique à balayage pourrait nous permettre de mesurer le champ de déformation à une échelle plus fine. Le dépôt de nano-jauges est également une technique qui permettrait de suivre précisément les déformations à la surface des échantillons. L'étude par corrélation d'images se limitant à une mesure de surface, nous pouvons également proposer l'utilisation d'un tomographe pour approfondir la compréhension du faciès de fissuration, le décollement des filaments, le délaminage des couches et la porosité ou singularité (Je suis porteur d'un projet déposé en 2020 au Fond Régional de Coopération pour la Recherche (FRCR) avec un budget prévisionnel d'1,4 M€ qui propose d'acheter un tomographe). La microstructure des pièces métalliques par SLM, la spécificité de la fusion des grains et le balayage du cordon de fusion pourraient également être approfondis grâce à l'utilisation d'un tomographe.

- **La modélisation d'un matériau structuré en 3 dimensions :** le passage à la génération d'une trajectoire de fabrication en pseudo-3D pour réaliser des pièces complexes nécessite d'étendre l'étude du champ de contraintes par EF en milieu bidimensionnel anisotrope. La reproduction de couches alternant différentes directions principales de contraintes aboutira au développement d'un nouveau logiciel de découpage car la différenciation d'une trajectoire pour chaque couche n'est pas prise en charge par les logiciels actuels. Cette structure complexe sera étudiée avec Abaqus pour enrichir le modèle comportemental en cours d'étude.
- **Le développement d'un outil générique d'aide à la conception intégrée :** l'optimisation développée avec un algorithme génétique multi-objectifs et son moteur de résolution utilisés dans la démarche précédente de DFAM peuvent être enrichis par d'autres paramètres de fabrication additive. L'objectif serait d'aboutir à un modèle générique afin de proposer aux concepteurs les meilleures solutions pour optimiser le temps de fabrication et la masse du produit. Cette étape nécessite de répertorier par exemple les paramètres du procédé de fabrication Selective Laser Melting (SLM) pour aboutir à de nouveaux résultats. Cette approche peut être couplée au matériau structuré qui propose un renforcement des pièces fabriquées par FDM et également des post-traitements comme le SMAT qui réduisent la rugosité des pièces et qui augmentent la dureté des pièces fabriquées par SLM.

Ces voies de recherche qui rejoignent sur certains aspects la modélisation numérique et l'approche DFAM citées ci-dessus nous semblent originaux. J'ai identifié d'autres perspectives en cours d'étude comme la réalisation de matériaux Auxétiques par fabrication additive polymère et métallique qui fait appel aux expertises présentées dans ce mémoire. Mon échange international à l'université de Clarkson (NY-USA) pour une durée de 6 mois (Août 2019 – Janvier 2020) afin d'interagir sur un projet de recherche lié à la mesure de la qualité d'impression 3D par dépôt de fil chaud avec le Professeur Cetin CETINKAYA a contribué à ma compréhension des comportements physiques in situ, de l'influence de l'interface des couches à l'influence des filaments, dans le but d'évaluer et de développer des méthodes d'amélioration de la durabilité des structures et des matériaux produits par fabrication additive.

Bibliographie:

“3D Printer Landscape: The View from 30,000 Feet > ENGINEERING.com”. (n.d.) ,

available at:

<http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/3916/3D-Printer-Landscape-The-View-from-30000-Feet.aspx> (accessed 12 December 2014).

“7 Issues to Look Out for in Metal 3D Printing”. (2017). , available at:

<https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/15202/7-Issues-to-Look-Out-for-in-Metal-3D-Printing.aspx> (accessed 4 January 2019).

Abramovitch, H., Burgard, M., Edery-Azulay, L., Evans, K.E., Hoffmeister, M., Miller, W., Scarpa, F., et al. (2010), “Smart tetrachiral and hexachiral honeycomb: Sensing and impact detection”, *Composites Science and Technology*, Vol. 70 No. 7, pp. 1072–1079.

Ahn, S.-H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S. and Wright, P.K. (2002), “Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS”, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 8 No. 4, pp. 248–257.

Anderson, C. (2004), “The long tail”, *Wired Magazine*, Vol. 12 No. 10, pp. 170–177.

Andreas Öchsner, Holm Altenbach and Lucas F. M. da Silva. (2012), *Advanced Structured Materials*, Vol. 16, available at: <http://www.springer.com/series/8611> (accessed 22 August 2018).

Aoussat, A., Duchamp, R. and Dubois, P. (2000), “Prototypage rapide - Généralités”, *Techniques de l'Ingénieur*, Vol. BM7017, available at: A:\AI CAO.PLM\Thèse\Recherches\Biblio-Web\Thèse\Prototypage-Imprimante 3D-frittage\Prototypage rapide AOUSSAT.doc.

Asadollahi-Yazdi, E., Gardan, J. and Lafon, P. (2016), “Integrated Design in Additive Manufacturing Based on Design for Manufacturing”, *World Academy of Science*,

- Engineering and Technology, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, Vol. 10 No. 6, pp. 1040–1047.
- Asadollahi-Yazdi, E., Gardan, J. and Lafon, P. (2017), “Integrated Design for Additive Manufacturing Based on Skin-Skeleton Approach”, *Procedia CIRP*, Vol. 60, pp. 217–222.
- Asadollahi-Yazdi, E., Gardan, J. and Lafon, P. (2018), “Toward integrated design of additive manufacturing through a process development model and multi-objective optimization”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, available at:<https://doi.org/10.1007/s00170-018-1880-6>.
- Ashby, M. (2000), “Choix des matériaux en conception mécanique”, *DUNOD*.
- Ashby, M., Brechet, Y., Cebon, D. and Salvo, L. (2004), “Selection Strategies For Materials and Processes”, *Materials and Design*, Vol. 25, pp. 51–67.
- Baich, L., Manogharan, G. and Marie, H. (2015), “Study of infill print design on production cost-time of 3D printed ABS parts”, *International Journal of Rapid Manufacturing*, Vol. 5 No. 3–4, pp. 308–319.
- Barlier, C. (2003), “Le Prototypage Rapide dans la filière numérique de conception de produit”.
- Baumers, M., Dickens, P., Tuck, C. and Hague, R. (2016), “The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push”, *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 102, pp. 193–201.
- Beaman, J.J., Barlow, J.W., Bourell, D.L., Crawford, R.H., Marcus, H.L. and McAlea, K.P. (1997), “Solid freeform fabrication: a new direction in manufacturing”, *Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA*, Vol. 2061, pp. 25–49.

- Bernard, A. and Taillandier, G. (1998), “Le prototypage rapide”, *Hermès Editions, ISBN*, pp. 2–86601.
- Blaber, J., Adair, B. and Antoniou, A. (2015), “Ncorr: open-source 2D digital image correlation matlab software”, *Experimental Mechanics*, Vol. 55 No. 6, pp. 1105–1122.
- Boothroyd, G., Dewhurst, P. and Knight, W. (2001), “Product Design for Manufacture and Assembly”, *Revised and Expanded*, Vol. Seconde édition.
- Bourell, D.L., Leu, M.C. and Rosen, D.W. (2009), “Roadmap for additive manufacturing: identifying the future of freeform processing”, *The University of Texas, Austin*.
- Campbell, I., Bourell, D. and Gibson, I. (2012), “Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age”, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 18 No. 4, pp. 255–258.
- Cantrell, J.T., Rohde, S., Damiani, D., Gurnani, R., DiSandro, L., Anton, J., Young, A., et al. (2017), “Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts”, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 23 No. 4, pp. 811–824.
- Catherin, J.-Y. (2008), “Fabrication additive : du prototypage rapide à la pièce ‘bonne matière’”, *Micronora Informations, Revue Du Salon International Des Microtechniques*, Vol. n°112, available at: A:\AI CAO.PLM\Thèse\Recherches\Biblio-Webo Thèse\Prototypage-Imprimante 3D-frittage\Fabrication additive.pdf.
- Cheng, C.Z., Zhou, W., Niu, Z.R. and Recho, N. (2015), “Stress singularity analysis for orthotropic V-notches in the generalised plane strain state”, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 38 No. 8, pp. 881–896.
- Chua, C., Leong, K. and Lim, C. (2010), “Rapid prototyping: Principles and applications”, *World Scientific Publishing - Third Edition*.

- Classification, A.S. of M.E.S.C.B. and Qualities, D. of S. (2003), *Surface Texture: Surface Roughness, Waviness and Lay*, Amer Society of Mechanical.
- Crump, S.S. (1992), *Apparatus and Method for Creating Three-Dimensional Objects*, Google Patents, available at: <http://www.google.com/patents/US5121329> (accessed 17 December 2014).
- Crump, S.S. (1994), *Modeling Apparatus for Three-Dimensional Objects*, Google Patents, available at: <http://www.google.com/patents/US5340433> (accessed 17 December 2014).
- De Rosnay, J. (2007), “2020 : Les Scénarios du futur, Comprendre le monde qui vient”, *Des Idées et Des Hommes*, available at: A:\AI CAO.PLM\Thèse\Recherches\Biblio-Webo Thèse\Prototypage-Imprimante 3D-frittage\Prototypage et MUP.pdf.
- De Rosnay, J. and Revelli, C. (2005), “La révolte du pronétariat, Des mass média aux média des masses”, *Fayard*, available at: A:\AI CAO.PLM\Thèse\Recherches\Biblio-Webo Thèse\Prototypage-Imprimante 3D-frittage\Pronetariat-Imprimante 3D MUP et Futur.pdf.
- Deckard, C.R. and McClure, P.F. (1988), “Selective laser sintering”.
- Dolenc, A. (1994), “Overview of Rapid Prototyping Technologies in Manufacturing”, *Helsinki University of Technologie, National Technical Information Service*, Vol. VA 22161.
- Duro-Royo, J., Mogas-Soldevila, L. and Oxman, N. (2015), “Flow-based fabrication: An integrated computational workflow for design and digital additive manufacturing of multifunctional heterogeneously structured objects”, *Computer-Aided Design*, Vol. 69, pp. 143–154.

- El Kabir, S., Pitti, R.M., Recho, N., Lapusta, Y. and Dubois, F. (2016), “Numerical study of crack path by MMCG specimen using M integral”, *Frattura Ed Integrità Strutturale*, Vol. 10 No. 35, pp. 64–73.
- “EOS”. (2018). , available at: <http://www.eos.info>.
- Es-Said, O.S., Foyos, J., Noorani, R., Mendelson, M., Marloth, R. and Pregger, B.A. (2000), “Effect of layer orientation on mechanical properties of rapid prototyped samples”, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 15 No. 1, pp. 107–122.
- Fatigue, A.C.E. on and Fracture. (2011), *Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*, ASTM International.
- Futur de La Fabrication Additive PIPAME*. (2017), , Pôle interministériel de prospective et d’anticipation des mutations économiques, available at: <https://www.google.com/search?q=Futur+de+la+fabrication+additive+PIPAME&oq=Futur+de+la+fabrication+additive+PIPAME&aqs=chrome..69i57.3927j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8> (accessed 23 March 2019).
- Galantucci, L.M., Bodi, I., Kacani, J. and Lavecchia, F. (2015), “Analysis of dimensional performance for a 3D open-source printer based on fused deposition modeling technique”, *Procedia CIRP*, Vol. 28, pp. 82–87.
- Galantucci, L.M., Lavecchia, F. and Percoco, G. (2008), “Study of compression properties of topologically optimized FDM made structured parts”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 57 No. 1, pp. 243–246.
- Gardan, J. (2016), “Additive manufacturing technologies: state of the art and trends”, *International Journal of Production Research*, Vol. 54 No. 10, pp. 3118–3132.
- Gardan, J. (2019), “Smart materials in additive manufacturing: state of the art and trends”, *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 14 No. 1, pp. 1–18.

- Gardan, J., Makke, A. and Recho, N. (2016a), “A Method to Improve the Fracture Toughness Using 3D Printing by Extrusion Deposition”, *Procedia Structural Integrity*, Vol. 2, pp. 144–151.
- Gardan, J., Makke, A. and Recho, N. (2016b), “A Method to Improve the Fracture Toughness Using 3D Printing by Extrusion Deposition”, *Procedia Structural Integrity*, Vol. 2, pp. 144–151.
- Gardan, J., Makke, A. and Recho, N. (2018a), “Improving the fracture toughness of 3D printed thermoplastic polymers by fused deposition modeling”, *International Journal of Fracture*, Vol. 210 No. 1–2, pp. 1–15.
- Gardan, J., Makke, A. and Recho, N. (2018b), “Fracture Improvement by Reinforcing the Structure of Acrylonitrile Butadiene Styrene Parts Manufactured by Fused Deposition Modeling”, *3D Printing and Additive Manufacturing*, available at:<https://doi.org/10.1089/3dp.2017.0039>.
- Gardan, J. and Matta, N. (2017), “Enhancing Knowledge Management into Systems Engineering through New Models in SysML”, *Procedia CIRP*, Vol. 60, pp. 169–174.
- Gardan, J., Nguyen, D.C., Roucoules, L. and Montay, G. (2016), “Characterization of Wood Filament in Additive Deposition to Study the Mechanical Behavior of Reconstituted Wood Products”, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, Vol. 11 No. 4, p. 8.
- Gardan, J. and Roucoules, L. (2009), “Une application à l’usage du bois en conception de produit”, *19ème Congrès Français de Mécanique, Marseille*.
- Gardan, J. and Roucoules, L. (2010), “Characterization of beech wood pulp towards sustainable rapid prototyping”, *IDMME-Virtual Concept 2010*, Vol. 3, Springer verlag, p. 6p.

- Gardan, J. and Roucoules, L. (2011), “Characterisation of beech wood pulp towards sustainable rapid prototyping”, *International Journal of Rapid Manufacturing*, Vol. 2 No. 4, pp. 215–233.
- Gardan, J. and Roucoules, L. (2014), “3D Printing device adaptable to Computer Numerical Control (CNC)”, presented at the Conference: AEFA’14, 19th European Forum on Rapid Prototyping and Manufacturing, At Paris, available at: https://www.researchgate.net/publication/263361941_3D_Printing_device_adaptable_to_Computer_Numerical_Control_CNC (accessed 16 May 2016).
- Gardan Julien. (2011), “Application à l’usage d’un dérivé du bois en prototypage rapide pour l’émergence de produits ‘grand public’”, *Thèse Université de Technologies de Troyes*.
- Gardan, N., Schneider, A. and Gardan, J. (2015), “Material and process characterization for coupling topological optimization to additive manufacturing”, *Computer-Aided Design and Applications*, Vol. 0 No. 0, pp. 1–11.
- Gates, T. and Hinkley, J. (2003), “Computational Materials: Modeling and Simulation of Nanostructured Materials and Systems”, *44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, presented at the 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Norfolk, Virginia, available at: <https://doi.org/10.2514/6.2003-1534>.
- Geoffroy, M., Gardan, J., Goodnough, J. and Mattie, J. (2018), “Cranial Remodeling Orthosis for Infantile Plagiocephaly Created Through a 3D Scan, Topological Optimization, and 3D Printing Process”, *JPO: Journal of Prosthetics and Orthotics*.
- “GRANTA MI: Additive Manufacturing”. (n.d.). , available at: <http://www.grantadesign.com/products/mi/am.htm> (accessed 14 January 2019).

- Gupta, S.K., Regli, W.C., Das, D. and Nau, D.S. (1995), “Current Trends and Future Challenges in Automated Manufacturability Analysis”, *Technical Research Report TR-95-16, Institute for Systems Research*.
- Gupta, S.K., Regli, W.C., Das, D. and Nau, D.S. (1997), “Automated Manufacturability Analysis : A Survey”, *Research in Engineering Design*, Vol. 9, pp. 168–190.
- Haggi, M., Dridi, M., Plain, J., Marguet, S., Perez, H., Schatz, G.C., Wiederrecht, G.P., et al. (2012), “Spatial confinement of electromagnetic hot and cold spots in gold nanocubes”, *Acs Nano*, Vol. 6 No. 2, pp. 1299–1307.
- Harilal, R., Vyasrayani, C.P. and Ramji, M. (2015), “A linear least squares approach for evaluation of crack tip stress field parameters using DIC”, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 75, pp. 95–102.
- Hubert, C., Rumyantseva, A., Lerondel, G., Grand, J., Kostcheev, S., Billot, L., Vial, A., et al. (2005), “Near-field photochemical imaging of noble metal nanostructures”, *Nano Letters*, Vol. 5 No. 4, pp. 615–619.
- Hull, C.W. (1986), *Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography*, Google Patents, available at:
<http://www.google.com/patents/US4575330> (accessed 15 December 2014).
- “Hype Cycle for 3D Printing”. (2018), , 12 July, available at:
<https://www.gartner.com/doc/3759564/hype-cycle-d-printing-> (accessed 11 December 2018).
- Irwin, G.R. (1957), “Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate”, *J. Appl. Mech.*
- “ISO/ASTM 52910:2018 - Additive manufacturing -- Design -- Requirements, guidelines and recommendations”. (n.d.) , available at: <https://www.iso.org/standard/67289.html> (accessed 14 January 2019).

- Jin, Y., He, Y., Fu, J., Gan, W. and Lin, Z. (2014), "Optimization of tool-path generation for material extrusion-based additive manufacturing technology", *Additive Manufacturing*, Vol. 1, pp. 32–47.
- Julien Gardan. (2017), "Method for characterization and enhancement of 3D printing by binder jetting applied to the textures quality", *Assembly Automation*, Vol. 37 No. 2, pp. 162–169.
- Kaveh, M., Badrossamay, M., Foroozmehr, E. and Etefagh, A.H. (2015), "Optimization of the printing parameters affecting dimensional accuracy and internal cavity for HIPS material used in fused deposition modeling processes", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 226, pp. 280–286.
- Koren, Y. (2010), *The Global Manufacturing Revolution: Product-Process-Business Integration and Reconfigurable Systems*, Vol. 80, John Wiley & Sons.
- Kumke, M., Watschke, H. and Vietor, T. (2016), "A new methodological framework for design for additive manufacturing", *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 11 No. 1, pp. 3–19.
- Lanzillotti, P., Gardan, J., Makke, A. and Recho, N. (2018), "Strengthening in Fracture Toughness of a Smart Material Manufactured by 3D Printing", presented at the INCOM 2018, Procedia elsevier, June, Bergame, Italy.
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T. and Hoffmann, M. (2014), "Industry 4.0", *Business & Information Systems Engineering*, Vol. 6 No. 4, pp. 239–242.
- Laverne, F., Segonds, F., Anwer, N. and Le Coq, M. (2014), "DFAM in the design process: A proposal of classification to foster early design stages", *CONFERE, Sibenik, Croatia*.
- Li, J., Zhang, X.-B. and Recho, N. (2001), "Stress singularities near the tip of a two-dimensional notch formed from several elastic anisotropic materials", *International Journal of Fracture*, Vol. 107 No. 4, pp. 379–395.

- Li, Y., Yang, C., Zhao, H., Qu, S., Li, X. and Li, Y. (2014), “New developments of Ti-based alloys for biomedical applications”, *Materials*, Vol. 7 No. 3, pp. 1709–1800.
- Malone, E. and Lipson, H. (2007), “Fab@Home : the personal desktop fabricator kit.”, *Mechanical and Aerospace Engineering, Cornell University, Rapid Prototyping Journal*, Vol. Emerald Group Publishing.
- Mao, M., He, J., Li, X., Zhang, B., Lei, Q., Liu, Y. and Li, D. (2017), “The Emerging Frontiers and Applications of High-Resolution 3D Printing”, *Micromachines*, Vol. 8 No. 4, p. 113.
- Mellor, S., Hao, L. and Zhang, D. (2014), “Additive manufacturing: A framework for implementation”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 149, pp. 194–201.
- Merabtine, A., Gardan, N., Gardan, J., Badreddine, H., Zhang, C., Zhu, F. and Gong, X.-L. (2018), “Experimental and numerical thermal analysis of open-cell metal foams developed through a topological optimization and 3D printing process”, *The European Physical Journal Applied Physics*, available at: DOI: 10.1051/epjap/2018180060.
- Miller, W., Smith, C.W., Scarpa, F. and Evans, K.E. (2010), “Flatwise buckling optimization of hexachiral and tetrachiral honeycombs”, *Composites Science and Technology*, Vol. 70 No. 7, pp. 1049–1056.
- Oxman, N. (2011), “Variable property rapid prototyping: inspired by nature, where form is characterized by heterogeneous compositions, the paper presents a novel approach to layered manufacturing entitled variable property rapid prototyping”, *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 6 No. 1, pp. 3–31.
- Pan, B., Xie, H., Guo, Z. and Hua, T. (2007), “Full-field strain measurement using a two-dimensional Savitzky-Golay digital differentiator in digital image correlation”, *Optical Engineering*, Vol. 46 No. 3, p. 033601.

- Pandey, P.M., Venkata Reddy, N. and Dhande, S.G. (2003), “Improvement of surface finish by staircase machining in fused deposition modeling”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 132 No. 1, pp. 323–331.
- Pelaingre, C., Velnom, L., Barlier, C. and Levailant, C. (2003), “A cooling channels innovating design method for rapid tooling in thermoplastic injection molding”, *VRAP 1st International–Conference on Advanced Research In Virtual and Rapid Prototyping*.
- Petrovic, V., Vicente Haro Gonzalez, J., Jorda Ferrando, O., Delgado Gordillo, J., Ramon Blasco Puchades, J. and Portoles Grinan, L. (2011), “Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies”, *International Journal of Production Research*, Vol. 49 No. 4, pp. 1061–1079.
- Ponche, R. (2013), *Méthodologie de Conception Pour La Fabrication Additive, Application à La Projection de Poudres*, PhD Thesis, Ecole Centrale de Nantes (ECN).
- Prall, D. and Lakes, R.S. (1997), “Properties of a chiral honeycomb with a Poisson’s ratio of—1”, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 39 No. 3, pp. 305–314.
- Reddy, N. and Pandey, P.M. (2005), “Enhancement of surface finish in fused deposition modelling”, *Virtual Modelling and Rapid Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping Proc. 2nd Int. Conf. on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, 28 Sep-1 Oct 2005, Leiria, Portugal*, CRC Press, p. 461.
- Rosen, D.W. (2014), “Research supporting principles for design for additive manufacturing: This paper provides a comprehensive review on current design principles and strategies for AM”, *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 9 No. 4, pp. 225–232.
- Roucoules, L., Skander, A. and Eynard, B. (2004), “XML-based knowledge management for DFM”, *International Journal of Agile Manufacturing*, Vol. Vol 7, n°1, pp. 71–76.

- Sames, W.J., List, F.A., Pannala, S., Dehoff, R.R. and Babu, S.S. (2016), “The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing”, *International Materials Reviews*, Vol. 61 No. 5, pp. 315–360.
- Schneider, A., Gardan, J., Gardan, N. and others. (2013), “Characterization of an optimized model manufactured by rapid prototyping”, *Characterization of an Optimized Model Manufactured by Rapid Prototyping*, Vol. 21ème Congrès Français de Mécanique, available at: <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00917157/> (accessed 25 June 2014).
- Sells, E., Smith, Z., Bailard, S., Bowyer, A. and Olliver, V. (2010), “RepRap: The Replicating Rapid Prototyper : Maximizing Customizability by Breeding the Means of Production”, *Social Science Research Network*.
- 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*, Vol. 19 No. 9–10, pp. 1117–1124.
- Skander, A., Roucoules, L. and Meyer, J.S.K. (2008), “Design and manufacturing interface modelling for manufacturing processes selection and knowledge synthesis in design”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 37 No. 5–6, pp. 443–454.
- SmarTech Markets. (2019). “2019 Additive Manufacturing Market Outlook and Summary of Opportunities”, *SmarTech Markets Publishing*, available at: <https://www.smartechpublishing.com/reports/2019-additive-manufacturing-market-outlook/> (accessed 16 December 2018).
- Sossou, G., Demoly, F., Montavon, G. and Gomes, S. (2018), “An additive manufacturing oriented design approach to mechanical assemblies”, *Journal of Computational Design and Engineering*, Vol. 5 No. 1, pp. 3–18.

- Stampfl, J. and Hatzenbichler, M. (2014), “Additive Manufacturing Technologies”, *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, Springer, pp. 20–27.
- Thrimurthulu, K., Pandey, P.M. and Reddy, N.V. (2004), “Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44 No. 6, pp. 585–594.
- Vahabli, E. and Rahmati, S. (2017), “Hybrid estimation of surface roughness distribution in FDM parts using analytical modeling and empirical investigation”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 88 No. 5–8, pp. 2287–2303.
- Vesenjak, M., Krstulović-Opara, L., Ren, Z. and Domazet, Ž. (2010), “Cell shape effect evaluation of polyamide cellular structures”, *Polymer Testing*, Vol. 29 No. 8, pp. 991–994.
- Wohlers, T. and Caffrey, T. (2013), “Additive manufacturing and 3D printing state of the industry annual worldwide progress report. 2014”, *Wohlers Associates*.
- Wohlers, T., Caffrey, T. and Campbell, I. (2016), “Wohlers Report 2016: 3D printing and additive manufacturing state of the industry annual worldwide progress report. Wohlers Associates”, *Inc, Fort Collins, Colorado*.
- Wu, W., Geng, P., Li, G., Zhao, D., Zhang, H. and Zhao, J. (2015), “Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS”, *Materials*, Vol. 8 No. 9, pp. 5834–5846.
- Xiaomao, H., Chunsheng, Y. and Yongjun, H. (2011), “Tool path planning based on endpoint build-in optimization in rapid prototyping”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 225 No. 12, pp. 2919–2926.

- Xu, X., Vallabh, C.K.P., Cleland, Z.J. and Cetinkaya, C. (2017), “Phononic Crystal Artifacts for Real-Time In Situ Quality Monitoring in Additive Manufacturing”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 139 No. 9, p. 091001.
- Yao, S.L., Cheng, C.Z., Niu, Z.R. and Recho, N. (2016), “Singularity analysis for 2D and 3D thermoelastic media containing V-notches”, *Journal of Thermal Stresses*, Vol. 39 No. 11, pp. 1356–1366.
- Zhang, C., Gardan, J., Zhu, F., Badreddine, H. and Gong, X. (2017), “Thermal behavior analysis of open-cell metal foams manufactured by rapid tooling”, *Journal of Porous Media*, Vol. 20 No. 12, available at:
<http://www.dl.begellhouse.com/journals/49dcde6d4c0809db,421e497644793a9d,4257c77731acc54c.html> (accessed 12 December 2017).
- Zhang, Y. and Bernard, A. (2013), “Generic build time estimation model for parts produced by SLS”, *High Value Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping. Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, pp. 43–48.
- Zhao, Z. and Shah, J.J. (2002), “A normative DFM Framework Based On Benefit-Cost Analysis”, *Design Engineering Technical Conferences - Design For Manufacturing*, Vol. DETC2002/DFM-34176, Montreal, Canada, ASME.



Annexe A

Curriculum Vitae détaillé

1. Généralités :

| | |
|---------------------------|--------------------------------------|
| État civil | |
| Nom | Gardan |
| Prénom | Julien |
| Date et lieu de naissance | 13 mai 1979 à St Martin D'Hères (38) |
| Situation familiale | Marié, 2 enfants |

| | |
|------------------------------|--|
| Coordonnées professionnelles | |
| Adresse | EPF, Campus de Troyes 2 Rue Fernand Sastre 10 430 Rosières-Pres-Troyes |
| Numéro de téléphone fixe | 03 25 70 73 36 |
| Numéro du téléphone portable | 06 88 89 33 71 |
| E-mail | julien.gardan@epf.fr |

Diplômes

| | |
|------|---|
| 2011 | Docteur de l'Université de Technologie de Troyes. Laboratoire de recherche LASMIS (Laboratoire des Systèmes Mécaniques et d'Ingénierie Simultanée) de l'Institut Charles Delaunay (ICD) de l'UTT à Troyes (10). Spécialité : Systèmes Mécaniques et Matériaux (SMM) appliqués au prototypage rapide et à la conception CAO. Directeur de thèse : Lionel Roucoules. Articles : (Gardan and Roucoules, 2009, 2010, 2011; Gardan Julien, 2011) |
| 2005 | Master IPAO (Ingénierie Production Assistées par Ordinateur), axé conception assistée par ordinateur (CAO), simulation numérique, fabrication et nouvelles technologies (impression 3D, scanner 3D, IHM, immersion virtuelle...) à l'IFTS (Institut de Formation Technique Supérieur) à Charleville-Mézières (08) |
| 2003 | Licence génie des matériaux à l'IFTS (Institut de Formation Technique Supérieur) à Charleville-Mézières (08) |
| 2002 | Deug STPI (Sciences et Techniques Pour l'Ingénieur) à l'IFTS (Institut de Formation Technique Supérieur) à Charleville-Mézières (08) |

Compétences

| | |
|------------------------------------|--|
| Fabrication Additive | Durabilité des matériaux et des structures par Fabrication Additive / Matériaux fonctionnalisés par Fabrication Additive |
| Conception Assistée par Ordinateur | Modélisation volumique et surfacique, gestion de la connaissance dans CATIA V5 |
| Design For Manufacturing | Intégration des connaissances en fabrication additive dans la conception de produits |
| Ingénierie système | Méthodologie de gestion des systèmes complexes |

Loisirs

Tennis, course à pied, vélo.

2. Parcours professionnel

- Depuis 2018 - **Délégué Recherche de l'EPF** sur le campus de Troyes et animateur de la thématique « Fabrication Additive » de l'Institut des Services pour l'Usine du Futur Troyen (ISIFT). **Chef de projet de FabAdd-Académie** (Pacte Grandes Écoles) : www.fabadd-academie.fr
- Depuis 2013 - **Enseignant Chercheur à l'EPF** école d'ingénieur-e-s sur le site de Troyes. **Rattaché à l'ICD/LASMIS** (Institut Charles Delaunay) de **l'Université de Technologie de Troyes** depuis décembre 2014 Spécialité : Fabrication Additive. Responsable de l'ingénierie système sur le site de Troyes. Responsable du Msc Innovation Creativity Entrepreneurship (ICE).
- 2011-2015 - **Gérant de la Sarl AZTECH**. Recherche et développement en ingénierie numérique et matériaux : www.aztech-innovation.com. Développement d'un dispositif de prototypage rapide breveté soutenu par OSEO.
- 2007-2011 - **Directeur des opérations** de la société **Arduinnova** dans les Ardennes (08) www.arduinnova.com.

3. Activités pédagogiques d'enseignement

J'ai différentes responsabilités pédagogiques sur le campus de Troyes :

- Responsable de l'Ingénierie Système, qui implique la coordination des cours et des projets au sein du cycle Licence et du cycle Master et la gestion des moyens associés (contenu pédagogique, coordination des projets, et logiciel de CAO). L'enseignement des modules de conception mécanique sur CATIA V5 fait également parti de cette mission.
- Responsable du TechLab Fabrication Additive, qui a une double mission, pédagogique et recherche, pour initier de nouveaux projets innovants ou développer des projets stratégiques (ex. matériaux intelligents, orthèses personnalisées). Huit étudiants (TechLab Manager) sont impliqués pour développer et maintenir cette plateforme. Je suis à l'initiative de la création de cette plateforme technologique avec le soutien de Monsieur Jean-Michel NICOLLE (Directeur général de l'EPF).
- Responsable du Master of Science « Innovation Creativity Entrepreneurship » (Msc ICE) en collaboration avec l'École Supérieur de Commerce de Troyes. Cette

formation est accréditée par la Conférence des Grands Écoles (CGE) et enseignée entièrement en anglais avec une ouverture vers des étudiants internationaux. Cette responsabilité implique la création d'un syllabus comportant les modules d'enseignement, la définition et le suivi des projets incubés, la validation des stages, la promotion de la formation et le recrutement des étudiants (Ingénieurs EPF ou candidats internationaux d'environ 4 ou 5 par an provenant de Biélorussie, d'Afrique du sud, de Chine et d'Argentine...). Cette responsabilité est complémentaire à mon expérience d'entrepreneur pendant 9 ans et le pilotage de projets innovants. Je fais parti de cette aventure depuis sa création en 2013.

Mes enseignements contiennent 260 heures équivalent TD par an (de la 1^{ère} à la 5^{ème} année du cursus). Ils comportent des travaux pratiques en CAO (Surfacique, Volumique, Paramétrage), des cours magistraux en ingénierie système, des projets de sciences pour l'ingénieur et des projets appliqués.

Je suis également porteur d'un projet sur l'élaboration d'une formation sur la fabrication additive menée par l'EPF, en partenariat avec l'UTT, l'ESTP, l'ESC et l'IUT de Troyes (URCA), et en lien avec le tissu industriel local. Le projet consiste à mettre en place une mission d'ingénierie pédagogique permettant de procéder à l'analyse précise des besoins en formation des entreprises et des établissements d'enseignements locaux afin de proposer des formations en ligne (MOOC – Massive Open Online Course) et des événements sur la Fabrication Additive et des méthodes complémentaires. Cette action s'appelle aujourd'hui FabAdd-Académie (www.fabadd-academie.fr) et est financée par la région Grand Est sur la base d'un dispositif nommé « Pacte Grands Écoles » et un regroupement d'établissements supérieurs Champardennais (ESR).

4. Responsabilités collectives

Responsabilités et animation

- Depuis 2019 - **Responsable de FabAdd-Académie** : FabAdd-Académie est une action portée par 5 établissements d'enseignement supérieur Troyens destinée à fédérer les formations sur la fabrication additive. Cette action collective publie des formations en ligne et organise des événements afin de transmettre des connaissances indispensables à la montée en compétences des étudiants et des entreprises sur le processus de conception et de Fabrication Additive.

- Depuis 2018 - **Délégué recherche de l'EPF** sur le campus de Troyes qui a pour mission de représenter la recherche de l'EPF auprès de ses partenaires industriels et académiques, et d'accompagner les cinq Enseignants-Chercheurs et un ingénieur de recherche dans leurs projets sous la direction de Monsieur Olivier HORNER (Directeur de la recherche de l'EPF). Je participe également au CoDir de l'Institut Charles Delaunay de l'UTT dans le cadre de cette mission.
- Depuis 2018 – **Animation de la thématiques « Procédés et Matériaux Avancés »** de l'Institut Services et Industries du Futur Troyes (ISIFT) qui a pour mission la mise en place d'une collaboration entre plusieurs établissements d'enseignement supérieur, le développement de projets de recherche et la mutualisation de moyens.
- Depuis 2013
 - **Responsable et porteur de projet de la plateforme de Fabrication Additive** de l'EPF de Troyes (TechLab Fabrication Additive). Développement de la stratégie de cette plateforme technologique comportant cinq technologies différentes d'impression 3D (polymère, résine et métallique).
 - **La définition et la gestion de projets de recherche et d'innovation** : Dans le cadre de mes activités, je suis amené à piloter des projets proposés par des entreprises, des laboratoires ou initiés par l'EPF. Nous pouvons citer certains projets comme le développement d'orthèses personnalisées (Geoffroy et al., 2018) en partenariat avec le BCIT (British Columbia Institute of Technology de Vancouver) et la société NEUT, la collaboration en transfert de technologies avec la société Axon'Cable ou notre engagement dans la réalisation de dispositifs personnalisés pour l'association d'hémiplégie. Le principalement projet porté par mes activités est actuellement notre travail sur le développement d'un « matériau intelligent » ou « matériau fonctionnalisé » impliquant un dépôt spécifique en impression 3D et une structuration de la matière. Je participe également à un projet de recherche sur le traitement de surface de pièces métalliques imprimées en 3D a été défini à travers les compétences du Dr Mahdi Chemkhi et aux activités antérieures de l'ICD-LASMIS sur le SMAT (Surface Mechanical Attrition Treatment).

J'ai également participé au conseil de perfectionnement de l'EPF de 2016 à 2018.

Actuellement, l'équipe de l'EPF de Troyes est composée de cinq enseignants-chercheurs dont deux dédiés à la fabrication additive et un ingénieur de recherche impliqué à 25% sur les

activités d'impression 3D. Mon rattachement à l'ICD-LASMIS implique une collaboration élargie avec mes collègues chercheurs (optimisation et Design For Additive Manufacturing, mousse métallique pour le stockage de l'énergie, dispositif rotatif d'impression 3D, traitement de surface SMAT).

Organisateur et co-organisation de journées

- Les tables rondes de FabAdd-Académie, 2ème Edition, « Formations pour la Fabrication Additive » et « Impression 3D de bâtiment 4.0 », 3 Juin 2020 à Troyes.
- Symposium Platinum 3D, atelier « Formation et Fabrication Additive », 17 Octobre 2019.
- Les tables rondes de FabAdd-Académie, 1ère Edition, « De l'ingénierie numérique à la Fabrication Additive », inauguration de l'action collective, 2 juillet 2019 à Troyes.
- Symposium Platinum 3D, atelier « Impact de la Fabrication Additive sur les flux logistiques », 25 Octobre 2018.
- Colloque « Enseigner l'industrie du futur », Nanterre, 29 et 30 Novembre 2018.
- Journée d'échanges avec la société ADOVA, Institut Services et Industries du Futur Troyes (ISIFT), Rosières-Près-Troyes, 18 Septembre 2018.

5. Activités de recherche et d'encadrement doctorale

Direction de thèses et stages d'ingénieurs

Un projet scientifique a été développé pour améliorer la résistance à la rupture de pièces fabriquées par impression 3D à travers un dépôt spécifique de la matière. Le projet a été identifié dans la thématique « Smart Materials » ou « Matériaux Fonctionnalisés » sur la base des matériaux avancés structurés [ACL 5] et a fait l'objet d'une étude préliminaire (Gardan, 2016; Gardan et al., 2018a; Gardan, Makke, et al., 2016b) avant d'être introduit dans des stages de niveau Master [M 1] et à travers un nouveau sujet de thèse SMAM « Smart Material in Additive Manufacturing ».

J'ai co-encadré 1 thèse soutenue et je co-encadre actuellement deux thèses avec le Professeur Pascal Lafon (ICD/LASMIS de l'Université de Technologies de Troyes, UTT) et Monsieur Sihao Cheng (Université de Technologies de Belfort Montbeliard, UTBM). Je co-encadre un Post-Doc, le Dr Mohamed Ali BOUAZIZ, depuis Septembre 2019 avec un Enseignant-Chercheur de l'EPF, le Dr Joseph MARAE DJOUDA:

- De 2015 à 2018, Mme Elnaz Asadollahiyazdi, Bourse Essaimage de la région Grand Est réalisée à Troyes en relation étroite avec l'UTT, « Integrated design of Additive Manufacturing based on Design For Manufacturing and skin-skeleton models », soutenue le 21 septembre 2018.
- De 2018 à 2021, M Marouene Zouaoui, Bourse ministérielle et Feder de l'UTT réalisée à Troyes, SMAM « Smart Material in Additive Manufacturing ».
- De 2018 à 2021, M Cheng Chang, Bourse CSC des Ut, China Scholarship Council, réalisée à l'UTT, Développement des procédés de Fabrication Additive de pièces à gradients de composition.
- De septembre 2019 à Juin 2020, M Mohamed Ali BOUAZIZ, Bourse Jeune Cherche de la région Grand Est, Étude de la ténacité à la fracture du matériau structuré au niveau macroscopique à travers un micro-mouchetis et une corrélation d'images.

| Doctorant(e) et Post-Doc | Directeur de thèse | Encadrement | Devenir | Sujet de thèse | Articles |
|----------------------------------|--|-------------|--------------------------|--|--|
| Mme Elnaz Asadollahiyazdi | M. Pascal Lafon et M Julien Gardan | 50 % | ATER Université de Nancy | Integrated Design of Additive Manufacturing based on Design fo Manufacturing and Skin-skeleton Models | (Asadollahi-Yazdi et al., 2016, 2017, 2018) |
| M. Marouene Zouaoui | M. Pascal Lafon et M. Julien Gardan | 50 % | N/A | Smart Material in Additive Manufacturing | [C-ACTI 7] |
| M. Cheng Chang | M. Siaho Deng et M Julien Gardan | 50 % | N/A | Développement des procédés de fabrication additive de pièces à gradients de composition | [ACL 16] |
| Dr. Mohamed Ali BOUAZIZ | M. Joseph Marae Djouda et M. Julien Gardan | 20% | N/A | Étude de la ténacité à la fracture du matériau préstructuré au niveau macroscopique à travers un micro-mouchetis et une corrélation d'images | 1 article soumis dans Additive Manufacturing |

Depuis 2013, j'ai encadré deux stages d'ingénieurs provenant de l'école polytechnique de Turin sur une période de 6 mois au sein de l'EPF de Troyes.

| Stagiaire | Tuteur | Université | Devenir | Sujet | Articles |
|------------------------------|------------------|------------------------|-----------------------|---|-----------------------------------|
| M. Pietro Lanzillotti | M. Julien Gardan | Polytechnique de Turin | Ingénieur chef SAFRAN | Enhancement of fracture toughness in additive manufacturing specimens | (Lanzillotti et al., 2018)[ACL 5] |
| M. Adriano Lenti | M. Julien Gardan | Polytechnique de Turin | N/A | Study of smart material anisotropic in fracture mechanics | 1 article en cours de rédaction |

D'autres projets connexes ont été réalisés, notamment sur l'optimisation topologique de pièces réalisées par fabrication additive avec la prise en compte des contraintes de fabrication (Gardan et al., 2015), l'étude d'outillage rapide pour la réalisation et la caractérisation d'une mousse d'aluminium pour le stockage d'énergie (Merabtine et al., 2018; Zhang et al., 2017), l'optimisation d'un procédé d'impression 3D par projection de liant (Julien Gardan, 2017), la participation à la caractérisation d'un procédé d'impression 3D rotatif avec le Dr Adragna et le Dr Chemkhi, et une proposition sur l'intégration de connaissances en ingénierie numérique et en ingénierie système (Gardan and Matta, 2017).

6. Valorisation de la recherche

Contrats industriels, PME, et association

Nous avons développé des relations avec différentes entreprises comme Axon'Cable (ETI, Montmirail) à travers un premier projet qui avait pour objectif d'étudier l'influence d'un traitement de surface SMAT sur les caractéristiques mécaniques des pièces réalisées en SLM (Selective Laser Melting). Une discussion est en cours pour prolonger le projet à travers une bourse CIFRE. Concernant le développement de nos travaux sur les orthèses personnalisées par impression 3D, nous avons tissé des collaborations avec la société NEUT (Orthésiste à Rosières-Pres-Troyes) et l'association d'hémiplégie. Dans notre mission d'accompagnement des projets innovants, nous avons également travaillé avec la société Remy (développement d'une machine « espresso » pour la cosmétique) ou la société SnapShot (développement d'une base rotative pour les smartphones) incubés à la technopole de l'Aube pour concevoir leurs premiers prototypes. Depuis 2018, ma mission en tant que délégué recherche de l'EPF sur le campus de Troyes implique la valorisation des compétences de recherche et de nos moyens.

Projets régionaux, nationaux, européens, internationaux

Je participe depuis 2020 au développement de la filière Fabrication Additive AddAGE porté par INORI SAS et le Professeur Claude Barlier. Nous sommes également partenaires de l'ISIFT (Institut des Services pour l'Industrie du Futur Troyen) dans le cadre des thématiques de la Stratégie de Spécialisation Intelligente S3 et avec le Schéma régional de développement économique, d'innovation et d'internationalisation SRDEII. J'anime la thématique « Procédés et Matériaux Avancés » identifiée parmi d'autres. Dans les autres projets régionaux, j'ai obtenu une bourse ESSAIMAGE en 2015 pour le financement de la thèse de Mme Asadollahiyazdi. Depuis 2014 et concernant les investissements nécessaires au développement de la plateforme de Fabrication Additive de l'EPF de Troyes, nous avons également fait appel à la région Grand Est (GE), au Conseil Départemental (CD10) et la Métropole de Troyes (TCM). Nous avons participé à un appel à projet de type France-Canada pour financer notre collaboration avec le BCIT de Vancouver qui n'a pas été financé. En partenariat avec l'Université Québec Trois-Rivières (UQTR), nous avons obtenu une bourse Mitacs Globalink pour l'accompagnement d'une thèse qui n'a pas abouti à la suite de difficultés d'obtention de visa pour le doctorant. Chaque financement fait également appel aux fonds propres de la fondation EPF :

| Type de financement | Montant de la subvention | Coût final (Fondation EPF) |
|---------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Bourse régional | | |
| - ESSAIMAGE | 110 K€ | 120 K€ |
| - Pacte Grands Écoles* | 114 400 € | 143 K€ (5720 € / École) |
| - ESR Champardennais* | 17 K€ | 4 K€ |
| - Aide Jeune Chercheur | 20 K€ | 40 K€ |
| Bourse Mitacs Globalink | 4 K€ | 0 K€ |
| Subvention GE, CD10 et TCM | | |
| - Scanner 3D | 15 K€ | 25 K€ |
| - Logiciel de reconstruction 3D | 20 K€ | 25 K€ |
| - Imprimantes 3D FDM | 24 K€ | 30 K€ |
| - Imprimante 3D Métallique | 70 K€ | 134 K€ |
| TOTAL | 394 000 € | 521 000 € |

*Le Pacte Grands Écoles correspond à un soutien de la Région Grand Est afin de développer des formations sur la fabrication additive en partenariat avec des établissements d'enseignements Troyens (§4) : FabAdd-Académie. L'action est également soutenue par l'ESR Champardennais (regroupement des établissements supérieurs champardennais).

7. Rayonnement

Mobilité et invitations

- De Juillet 2019 à Janvier 2020 – Période de 6 mois comme chercheur invité à l'université de Clarkson (État de New York) - Mission d'enseignement et de recherche.

- Du 23 au 28 Octobre 2017 – Séminaire sur la Fabrication Additive à Shanghai dans le cadre d'un partenariat entre les UTs - Invitation de l'université de Shanghai.
- Du 10 au 15 Août 2016 – Réunion sur la collaboration avec le BCIT à Vancouver dans la continuité du projet d'orthèses personnalisées – Visite.
- Du 13 au 31 Juillet 2015 – Séjour collaboratif au BCIT à Vancouver pour démarrer le projet sur la conception et l'impression 3D d'orthèses personnalisées– Invitation du laboratoire MAKE+ au BCIT.
- Toutes les conférences mentionnées (ECF21, CIRP, AEPR et CFM) contribuent au rayonnement des travaux de recherche.

Collaboration internationale

Ma dernière activité de recherche est une expérience à l'international aux États-Unis qui s'est déroulée au sein du laboratoire de recherche de photo-acoustique (Photo-Acoustics Research Laboratory) du Professeur Cetin Cetinkaya à Clarkson University (Postdam, État de New York, USA) pendant 6 mois, de juillet 2019 à janvier 2020. Cette expérience stimulante s'est organisée autour d'un projet de recherche dédié à la qualification d'un artefact imprimé en 3D par dépôt de fil chaud, d'heures d'enseignements et un accès à l'ensemble des cours proposés par Clarkson. L'objectif du projet de recherche était de confronter les résultats obtenus par des mesures non-destructives par ultrason dans le domaine d'étude de la propagation d'ondes avec la définition d'un modèle comportemental par simulation numérique.

J'ai également développé un partenariat avec le BCIT de Vancouver et plus précisément le laboratoire MAKE + spécialisé dans la conception de dispositifs médicaux. Ce partenariat porte sur la conception et la fabrication additive d'orthèses personnalisées de type AFO (Ankle Foot Orthosis) et d'un casque de correction de la plagiocéphalie infantile (Geoffroy et al., 2018). Je me suis rendu à Vancouver à deux reprises pour développer ce partenariat (un séjour de 3 semaines en 2015, puis 1 journée de travail en 2017). Nous avons également reçu notre partenaire (Mme Johanne Mattie) à Troyes en Juillet 2017. Un partenariat entre l'EPF et Polytechnique de Turin a vu le jour en 2017 avec l'accueil d'étudiants en stage de master [M 1] depuis 2013.

Examineur pour une thèse et rapporteur pour plusieurs revues

Thèse de M Feng ZHU à l'Université de Technologie de Troyes, « Experimental and Numerical Study of Metal Foam Composites in Innovative Application of Thermal Energy Storage », examinateur, directeur de thèse M. GONG Xiao-Lu, Mars 2017

Revue Journal of Manufacturing and Materials Processing le 07 Septembre 2018.

Revue Rapid Prototyping Journal le 11 Novembre 2015.

Expertise

ANR 2018 - Membre du comité d'évaluation « CE06 - Polymères, composites, physique et chimie de la matière molle »

Autres

Depuis 2018, membre du comité individuel de suivi des doctorants de l'UTT.

8. Synthèse des activités de recherche

Cette synthèse décrit les activités pédagogiques et de recherche, les projets, leurs apports et leurs limites, puis nous abordons des perspectives possibles dans le cadre de mes activités dans le domaine de la Fabrication Additive.

La liberté de conception, la flexibilité et la personnalisation fournis par le principe de Fabrication Additive sont des opportunités qui peuvent être utilisées pour répondre aux besoins de la société avec un impact significatif sur l'économie et l'écologie. Les verrous technologiques et scientifiques montrent qu'il est impératif pour les industriels d'obtenir une meilleure compréhension du comportement physique des structures mécaniques obtenues par impression 3D afin de maîtriser le processus de conception et de fabrication d'un produit. Cette première partie débouche sur les travaux de recherche et la nécessité de développer une méthodologie de conception et de Fabrication Additive dans la lignée du Design For Additive Manufacturing (DFAM) et également de proposer des structures imprimées en 3D plus adaptées aux sollicitations mécaniques à travers un dépôt de matière structurée. L'ensemble est porté par la nécessité d'aboutir à un modèle numérique capable de prendre en charge des critères d'usage et de fabrication additive, ainsi qu'à un modèle comportemental pour accompagner le concepteur dans ses choix.

Les activités pédagogiques et de recherche, ainsi que les responsabilités prises depuis 2013, ont débutés par la création d'une plateforme technologique sur la Fabrication Additive qui a ouvert de nombreuses opportunités pour construire des activités d'enseignement et de recherche tout en développant le réseau académique et professionnel de l'EPF et de l'UTT. L'un des objectifs est de transmettre les bonnes pratiques en ingénierie numérique et en fabrication pour la maîtrise des nouveaux procédés d'impression 3D ainsi que leurs processus

de développement. Les résultats obtenus grâce aux projets initiés ont progressivement installé une légitimité dans l'environnement Troyen et régional. Le financement régional et son portage par l'EPF dans le cadre d'une mission de création de formations initiales et continues sur la Fabrication Additive (FabAdd-Académie) en partenariat avec les établissements d'enseignements Troyens (l'UTT, l'ESTP, l'IUT, et l'école de design) montrent la crédibilité de cette activité. Notre reconnaissance au niveau national à travers le rapport dédié sur la fabrication additive en 2017 et réalisé par le Pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques (Pipame), qui nous identifie comme centre de compétences sur la Fabrication Additive, montre la pertinence du travail accompli depuis mon arrivée en 2013. Une équipe de 4 personnes s'est progressivement mise en place sur le campus de Troyes depuis mon arrivée à l'EPF afin de structurer les projets et d'intégrer des compétences complémentaires sur la Fabrication Additive. Mes responsabilités en enseignement et en recherche comme le pilotage du Master of Science ICE (Innovation, Creativity, Entrepreneurship) et ma mission de délégué recherche m'ont permis de mesurer les tenants et les aboutissants de la gestion de projets pédagogiques et de projets de recherche.

Deux travaux de recherche majeurs ont influencé mon parcours d'enseignant-chercheur. Ces projets n'auraient pas abouti sans la complémentarité des compétences présentes à Troyes en ingénierie numérique, en impression 3D à travers différentes technologies, en optimisation multicritères, en traitement de surfaces, en mécanique de la rupture. Le premier travail définit une méthodologie de conception et de fabrication additive afin de maîtriser l'influence des critères d'usage et de fabrication pour guider le concepteur dans sa démarche de conception de produits. Cette approche basée sur le Design For Additive Manufacturing (DFAM) propose les solutions optimales à travers une optimisation multicritère à deux objectifs, l'optimisation du temps et de la masse. Le second décrit une structuration du dépôt d'un filament thermoplastique (ABS - Acrylonitrile Butadiène Styrene) avec une technologie d'impression 3D FDM (Fused Deposition Modeling) proposé conjointement avec le Dr Ali MAKKE et le Professeur Naman RECHO. L'originalité de cette recherche repose sur la reproduction des directions principales des contraintes observables en simulation numérique afin de déposer les filaments sur les mêmes lignes de forces (Fig 1.). Le contrôle de la trajectoire de dépôt à travers un G-Code a abouti à la réalisation d'éprouvettes Compact-Tensile (C-T) utilisé dans le domaine de la mécanique de la rupture. Une étude comparative entre des échantillons classiques et optimisées à travers des essais de fracturation en mode I (ouverture seule en traction) et une observation par corrélation d'images (DIC - Digital Image Correlation) montrent que la version optimisée a une ténacité à la fracture supérieure à 20% et un facteur d'intensité de contraintes (SIF - Stress

Intensity Factor) 25 % supérieur à la version classique. L'objectif est d'obtenir un modèle comportemental grâce à une meilleure compréhension du comportement mécanique de ce « matériau intelligent » ou fonctionnalisé. L'ensemble enrichit l'intégration des connaissances métiers pour optimiser le processus de conception et de fabrication additive d'un matériau structuré. Ainsi, dans l'ensemble des « matériaux intelligents », qui rassemble des matériaux réactifs à un stimulus extérieur et les matériaux pré-structurés avancés [ACL 6], mes travaux de recherche se sont orientés vers cette seconde thématique afin d'élaborer des matériaux structurés avancés qui répondent à une sollicitation prédéfinie.

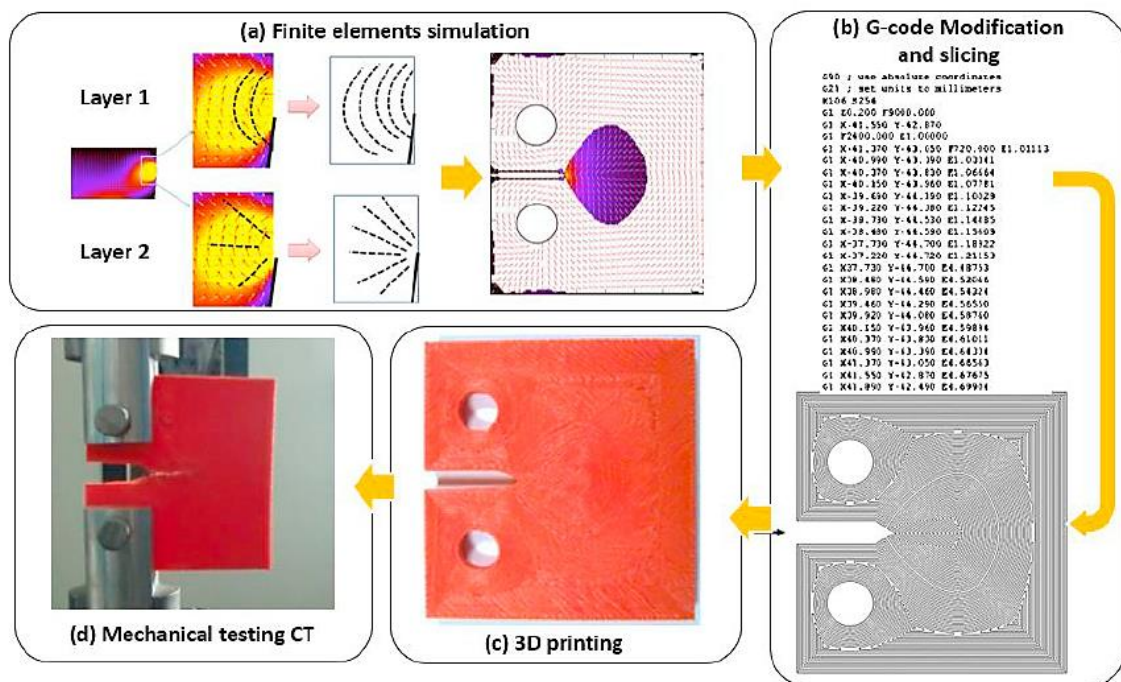


Fig. 1 Méthode de renforcement d'un matériau structuré par impression 3D (Gardan, Makke, et al., 2016a)

Dans la lignée de travaux de caractérisations mécaniques développés, une méthodologie de DFAM a émergé afin de maîtriser les règles de conception utilisées dans la définition des matériaux structurés et les critères liés aux procédés additifs mais également d'usage du produit qui passe par une définition fonctionnelle de celui-ci. Nous sommes confrontés aux mêmes difficultés de compréhension lors de la mise en place d'un processus de conception et de fabrication additive qui influence la structure et les comportements physiques des matériaux. Il est évident qu'un travail de recherche peut encore être réalisé sur cette partie afin de définir une méthodologie avancée. Nous pouvons citer trois sujets de recherche importants :

- **Les modèles comportementaux**, qui doivent prédire le comportement des structures composites fabriquées par un procédé additif. La représentation du comportement

physique est extrême complexe et une homogénéisation est envisageable mais la compréhension des phénomènes aux niveaux micro, méso et macroscopique nécessite encore de nombreux essais de caractérisations mécaniques et thermiques. L'anisotropie et les singularités des matériaux, dépendants de la direction de fabrication et du dépôt de filaments ou de la fusion d'un cordon couche par couche, complexifient la représentation du modèle comportemental. La thèse de M. Marouene ZOUAOUI étudie actuellement cette orientation.

- **Les méthodes d'aide à la conception**, qui doivent prendre en compte les règles et les critères d'usage et de fabrication à travers une méthodologie générique comportant une optimisation multicritère basée sur toutes les technologies d'impression 3D. Il nous semble nécessaire d'apporter un accompagnement dès la définition du produit bien avant une modélisation 3D qui induirait une prise de décisions parfois subjective. Elles aideraient le concepteur dans sa prise de décisions afin de définir la forme de son produit ainsi que l'optimisation de l'orientation, de la masse et du temps de fabrication. La thèse de la Dr Elnaz ASADOLLAHI YAZDI a lancé cette piste de recherche.
- **Les méthodes de génération de trajectoires**, qui regroupent un grand nombre de parcours de remplissages comme les treillis ou les nids d'abeille selon les procédés additifs métalliques ou polymères. Il est en effet observé qu'elles ne sont pas toujours optimisées aux efforts physiques supportés par la géométrie ou la structure composite elle-même. Ce point est un constat qui a été utilisé pour définir le projet sur le matériau intelligent ou la structure avancée par FDM présentée dans cette synthèse. Les deux stages de Master ont étudié l'élaboration de cette méthode de génération de trajectoires.

Projet de recherche :

Pour les travaux de recherche, il existe une continuité entre l'approche DFAM proposée et le projet de développement d'un « matériau intelligent » (matériau structuré ou architecturé). Ce dernier fait l'objet d'une attention particulier car nous sommes en train de définir son modèle comportemental avec Abaqus grâce aux travaux de M. Marouene ZOUAOUI (thèse 2018-2021). Il est enrichi par d'autres résultats provenant d'essais de flexion pour prendre en compte les efforts de cisaillements. L'objectif est de tendre vers la réalisation d'une géométrie en 3 dimensions car nos éprouvettes sont actuellement une représentation projetée en 2D des lignes de force. La reproduction du champ de contraintes en 2,5D (2D et demi) ou pseudo 3D pour imprimer des pièces complexes prendraient également en charge les contraintes mécaniques

internes au matériau anisotrope. Or, établir le champ de contraintes au voisinage d'une entaille dans un milieu tridimensionnel pose encore quelques difficultés de résolution et particulièrement lorsque le matériau présente un comportement anisotrope. À partir de la formulation du champ de contraintes en milieu bidimensionnel anisotrope au voisinage d'une entaille en V, nous proposons d'étendre la solution au milieu tridimensionnel afin d'appliquer la technologie d'impression 3D.

L'installation d'une imprimante 3D métallique (Metal X, Markforged) à l'EPF de Troyes ouvre des perspectives afin de transférer la méthode d'optimisation du dépôt de filament ou la réalisation de matériaux structurés à des applications industrielles. La technologie d'impression métallique Metal Injection Molding (MIM) et ses performances restent à étudier et les prochains essais de caractérisations doivent venir enrichir les connaissances et les projets présentés. Le projet de mousse d'aluminium pour le stockage d'énergie thermique peut également se développer grâce à la fabrication directe de nouvelles structures poreuses. La réflexion d'une approche hybride ou multi-procédés pour concevoir une pièce fait partie de notre feuille de route afin d'élargir les avantages et les complémentarités que peut procurer la fabrication additive. L'ensemble pourrait aboutir à une plateforme collaborative de gestion de la connaissance au service de la fabrication additive et de la société qui rentrerait dans les objectifs du collectif de FabAdd-Académie.

Ainsi, de nouveaux objectifs scientifiques et technologiques peuvent être détaillés ci-dessous :

- **La compréhension approfondie du comportement physique du matériau structuré** : L'étude des phénomènes physiques qui opèrent au niveau de la pointe de fissuration des éprouvettes de fracturation est très complexe à travers une structure composite. Il est important de finaliser l'étude dédiée aux éprouvettes de flexion en mode mixte I/II pour prendre en compte le comportement en cisaillement. Le facteur d'intensité de contrainte (SIF) et le taux de restitution d'énergie (l'intégrale J) mesurés aux alentours de la pointe de fissuration vont nous permettre d'approfondir notre compréhension des phénomènes qui gouvernent la propagation de la fissuration. Cette étape est également nécessaire afin de définir le modèle comportemental sur Abaqus. La technique de corrélation d'images utilisée précédemment se limite à un niveau d'échelle et une résolution d'images trop faibles pour étudier précisément l'intensité de contraintes à la pointe de la fissuration. L'utilisation d'un micro-mouchetis proposée par le Dr Joseph MARAE DJOUDA (codirection de Post-Doc de 2019 à 2020), d'une micromachine de traction et d'un microscope électronique à balayage pourrait nous

permettre de mesurer le champ de déformation à une échelle plus fine. Le dépôt de nano-jauges est également une technique qui permettrait de suivre précisément les déformations à la surface des échantillons. L'étude par corrélation d'images se limitant à une mesure de surface, nous pouvons également proposer l'utilisation d'un tomographe pour approfondir la compréhension du faciès de fissuration, le décollement des filaments et le délaminage des couches. La microstructure des pièces métalliques par SLM, la spécificité de la fusion des grains et le balayage du cordon de fusion pourraient également être approfondies grâce à l'utilisation d'un tomographe. Je suis porteur d'un projet déposé en 2020 au Fond Régional de Coopération pour la Recherche (FRCR) proposé par la Région Grand Est, où le consortium (EPF, UTT, Université de Lorraine et Université de Reims) souhaite investir dans un tomographe dédié à cette piste de recherche avec un budget prévisionnel 1,4 M€. L'étude du comportement des matériaux structurés à différentes échelles apporterait de nombreuses informations afin de comprendre le comportement physique de la structure multicouches.

- **La modélisation d'un matériau structuré en 3 dimensions :** Le passage à la génération d'une trajectoire de fabrication en pseudo-3D pour réaliser des pièces complexes nécessite d'étendre l'étude du champ de contraintes par EF en milieu bidimensionnel anisotrope. La reproduction de couches alternant différentes directions principales de contraintes aboutira au développement d'un nouveau logiciel de découpage car la différenciation d'une trajectoire pour chaque couche n'est pas prise en charge par les logiciels actuels. Cette structure complexe sera étudiée avec Abaqus pour enrichir le modèle comportemental en cours d'étude. La méthode peut être confrontée à d'autres matériaux pré-structurés.
- **Le développement d'un outil générique d'aide à la conception intégrée :** l'optimisation développée avec un algorithme génétique multi-objectifs et son moteur de résolution utilisés dans la démarche précédente de DFAM peuvent être enrichis par d'autres paramètres de fabrication additive. L'objectif serait d'aboutir à un modèle générique afin de proposer aux concepteurs les meilleures solutions pour optimiser le temps de fabrication et la masse du produit. Cette étape nécessite de répertorier par exemple les paramètres du procédé de fabrication Selective Laser Melting (SLM) pour aboutir à de nouveaux résultats. Cette approche peut être couplée au matériau structuré qui propose un renforcement des pièces fabriquées par FDM et également des post-traitements comme le SMAT (grenailage ultrasonique) qui réduisent la rugosité des pièces et qui augmentent la dureté des pièces fabriquées par SLM.

Ces voies de recherche qui rejoignent sur certains aspects la modélisation numérique et l'approche DFAM citées ci-dessus nous semblent particulièrement vierge de tous travaux. Ma récente expérience internationale à Clarkson University m'a également permis d'échanger avec de nouveaux chercheurs et un corps d'enseignants qui utilisent d'autres méthodes et qui évoluent dans un environnement différent. Ainsi, l'expertise dédiée aux mesures non-destructives par ultrasons appliquée aux structures filamenteuses par impression 3D polymère accentue ma compréhension à différentes échelles de l'influence des interfaces, entre les couches et les filaments soudés, sur l'intégrité mécanique des pièces. Mon expérience en tant qu'entrepreneur et chef d'entreprise m'apportent parfois une vision différente dans le management de projets.

9. Liste des publications et communications

Articles dans des revues internationales avec comité de lecture – SCOPUS

- [ACL 1] J. Gardan, D.C. Nguyen, L. Roucoules, G. Montay, Characterization of Wood Filament in Additive Deposition to Study the Mechanical Behavior of Reconstituted Wood Products, *J. Eng. Fibers Fabr.* 11 (2016) 8.
- [ACL 2] J. Gardan, A. Makke, N. Recho, Improving the fracture toughness of 3D printed thermoplastic polymers by fused deposition modeling, *Int. J. Fract.* 210 (2018) 1–15. doi.org/10.1007/s10704-017-0257-4
- [ACL 3] J. Gardan, A. Makke, N. Recho, Fracture Improvement by Reinforcing the Structure of Acrylonitrile Butadiene Styrene Parts Manufactured by Fused Deposition Modeling, *3D Print. Addit. Manuf.* (2018). doi:10.1089/3dp.2017.0039.
- [ACL 4] J. Gardan, Additive manufacturing technologies: state of the art and trends, *Int. J. Prod. Res.* 54 (2016) 3118–3132. doi:10.1080/00207543.2015.1115909.
- [ACL 5] P. Lanzillotti, J. Gardan, A. Makke, N. Recho, Enhancement of fracture toughness under mixed mode loading of ABS specimens produced by 3D printing, *Rapid Prototyping Journal*, Emerald, 2019, doi: 10.1108/RPJ-09-2018-0247.
- [ACL 6] J. Gardan, Smart materials in additive manufacturing: state of the art and trends, *Virtual Phys. Prototyp.* 14 (2018) 1–18. doi:10.1080/17452759.2018.1518016.
- [ACL 7] E. Asadollahi-Yazdi, J. Gardan, P. Lafon, Toward integrated design of additive manufacturing through a process development model and multi-objective optimization, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* (2018). doi:10.1007/s00170-018-1880-6.

- [ACL 8] E. Asadollahi-Yazdi, J. Gardan, P. Lafon, Multi-Objective Optimization Approach in Design For Additive Manufacturing for Fused Deposition Modeling, *Rapid Prototyping Journal, Emerald* (2019). doi:10.1108/RPJ-07-2018-0186.
- [ACL 9] N. Gardan, A. Schneider, J. Gardan, Material and process characterization for coupling topological optimization to additive manufacturing, *Comput.-Aided Des. Appl.* 0 (2015) 1–11. doi:10.1080/16864360.2015.1059192.
- [ACL 10] C. Zhang, J. Gardan, F. Zhu, H. Badreddine, X. Gong, Thermal behavior analysis of open-cell metal foams manufactured by rapid tooling, *J. Porous Media.* 20 (2017). DOI: 10.1615/JPorMedia.v20.i12.30
- [ACL 11] A. Merabtine, N. Gardan, J. Gardan, H. Badreddine, C. Zhang, F. Zhu, X.-L. Gong, Experimental and numerical thermal analysis of open-cell metal foams developed through a topological optimization and 3D printing process, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* (2018). DOI: 10.1051/epjap/2018180060.
- [ACL 12] J. Gardan, Method for characterization and enhancement of 3D printing by binder jetting applied to the textures quality, *Assem. Autom.* 37 (2017) 162–169. doi:10.1108/AA-01-2016-007.
- [ACL 13] J. Gardan, Definition of users' requirements in the customized product design through a user-centered translation method, *Int J Interact Des Manuf, Springer*, (2015) 1–9. doi:10.1007/s12008-015-0275-2
- [ACL 14] M. Geoffroy, J. Gardan, J. Goodnough, J. Mattie, Cranial Remodeling Orthosis for Infantile Plagiocephaly Created Through a 3D Scan, Topological Optimization, and 3D Printing Process, *JPO J. Prosthet. Orthot.* (2018). doi: 10.1097/JPO.0000000000000190
- [ACL 15] Marae Djouda, J., Panicaud, B., Gaslain, F., Beal, J., Madi, Y., Montay, G., Le Joncour, L., Gardan, J., Recho, N., Crépin, J., Maurer, T., 2019. Local microstructural characterization of an aged UR45N rolled steel: Application of the nanogauges grating coupled EBSD technique. *Materials Science and Engineering: A* 759, 537–551. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.05.059>
- [ACL 16] Cheng CHANG, Xincheng YAN, Rodolphe BOLOT, Julien GARDAN, Shuohong GAO, Min LIU, Hanlin LIAO, Sihao DENG, Influence of post heat treatments on the

mechanical properties of CX stainless steel fabricated by Selective Laser Melting, Journal of Material Science, Springer, Accepted to 05/03/2020

Articles dans des revues internationales avec comité de lecture non répertoriées :

[ACLN 1] J. Gardan, L. Roucoules, Characterisation of beech wood pulp towards sustainable rapid prototyping, Int. J. Rapid Manuf. Inderscience, 2 (2011) 215–233.

[ACLN 2] J. Gardan, L. Roucoules, 3D printing device for numerical control machine and wood deposition, Int. Journal of Engineering Research and Applications. (2014) 123–131.

Ouvrage, chapitre de livre et brevet

[COV 1] A.B. Badiru, V.V. Valencia, D. Liu, Additive manufacturing handbook: product development for the defense industry, CRC Press, 2017. Chapter 10.

[BRE 1] (FR3002179) J. Gardan, Rapid prototyping system for manufacturing e.g. house model, by material extrusion, has software unit including calculation and transmission unit to calculate and transmit displacement instructions of support arm to digital control, 2011.

Conférences, Congrès et colloques avec actes :

Conférences Internationales à Comité de lecture et actes publiés

[C-ACTI 1] J. Gardan, L. Roucoules, Characterization of beech wood pulp towards sustainable rapid prototyping, in: IDMME-Virtual Concept 2010, Springer verlag, 2010: p. 6p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00958172/> (accessed September 23, 2016).

[C-ACTI 2] J. Gardan, A. Makke, N. Recho, A Method to Improve the Fracture Toughness Using 3D Printing by Extrusion Deposition, Elsevier Procedia ECF21, June, Catane, Italy, 2016: pp. 144–151.

[C-ACTI 3] P. Lanzillotti, J. Gardan, A. Makke, N. Recho, Strengthening in Fracture Toughness of a Smart Material Manufactured by 3D Printing, Elsevier Procedia IFAC ICOME, June, Bergame, Italy, 2018.

[C-ACTI 4] E. Asadollahi-Yazdi, J. Gardan, P. Lafon, Multi-Objective Optimization of Additive Manufacturing Process, Elsevier Procedia IFAC ICOME, June, Bergame, Italy, 2018.

[C-ACTI 5] E. Asadollahi-Yazdi, J. Gardan, P. Lafon, Integrated Design for Additive Manufacturing Based on Skin-Skeleton Approach, Elsevier Procedia CIRP Design, May, Cranfield, England, (2017) pp. 217–222.

[C-ACTI 6] J. Gardan, N. Matta, Enhancing Knowledge Management into Systems Engineering through New Models in SysML, Elsevier Procedia CIRP Design, May, Cranfield, England, (2017) pp. 169–174.

[C-ACTI 7] M. Zouaoui, C. Labergere, J. Gardan, P. Lafon et Al, Numerical Prediction of 3D Printed Specimens Based on a Strengthening Method of Fracture Toughness, 52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems (CMS), Ljubljana, Slovenia, June 12-14, 2019

[C-ACTI 8] Eyzat, Y., Chemkhi, M., Portella, Q., Gardan, J., Remond, J., Retraint, D., 2019. Characterization and Mechanical Properties of As-Built SLM Ti-6Al-4V subjected to surface mechanical post-treatment. Procedia CIRP 81, 1225–1229.

Communications dans des Congrès Nationaux avec actes et Comité de Lecture

[C-ACTN 1] J. Gardan, L. Roucoules, Une application à l’usage du bois en conception de produit, 19ème Congrès Fr. Mécanique, Marseille. (2009).

[C-ACTN 2] A. Schneider, J. Gardan, N. Gardan, Characterization of an optimized model manufactured by rapid prototyping, Characterization of an Optimized Model Manufactured by Rapid Prototyping. 21ème Congrès Français de Mécanique, Bordeaux, August 2013

[C-ACTN 3] A. Schneider, J. Gardan, N. Gardan, Optimisation numérique en prototypage rapide, Proceedings of AEPR’12, 17th European Forum on Rapid Prototyping and Manufacturing Paris, France, (2012).

Congrès, Colloques sans actes

[C-COM 1] E. Asadollahi-Yazdi, J. Gardan, P. Lafon, Integrated Design in Additive Manufacturing Based on Design for Manufacturing, World Acad. Sci. Eng. Technol. Int. J. Mech. Aerosp. Ind. Mechatron. Manuf. Eng. 10 (2016) 1040–1047.

Directions de thèses, de Masters

[TH 1] E. Asadollahi-Yazdi, Integrated design of Additive Manufacturing based on Design For Manufacturing and skin-skeleton models, 21st September 2018, Doctor from University of Technology of Troyes, Science for Engineers, Materials, Mechanics, Optics and Nanotechnology.

[M 1] Pietro Lanzillotti, Smart Materials: study of their fracture behaviour under mixed mode I+II, internship Project N° 43650 /17 at EPF Ecole d'ingénieurs, Thesis, Polytechnique de Turin, 2017.



Annexe B

Structured Analysis Design Technique

