HAL
open science

Méthodologie de caractérisation prédictive des procédés de fabrication additive avec une approche technique, économique et environnementale

Mazyar Yosofi

To cite this version:

Mazyar Yosofi. Méthodologie de caractérisation prédictive des procédés de fabrication additive avec une approche technique, économique et environnementale. Génie mécanique [physics.class-ph]. École centrale de Nantes, 2018. Français. NNT : 2018ECDN0034 . tel-01950373v2

HAL Id: tel-01950373

https://theses.hal.science/tel-01950373v2

Submitted on 14 Dec 2018

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

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

THESE DE DOCTORAT DE

L'ÉCOLE CENTRALE DE NANTES
COMUE UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

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

Par
« Mazyar YOSOFI »

« Méthodologie de caractérisation prédictive des procédés de fabrication additive avec une approche technique, économique et environnementale »

Thèse présentée et soutenue à « Rennes », le « 24 Octobre 2018 »
Unité de recherche : Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique

Composition du Jury :

Président :		
Emmanuel Caillaud	Professeur des Universités	Unistra – ICube
Rapporteurs :		
Peggy Zwolinski	Professeur des Universités	Grenoble INP – G-SCOP
Nicolas Perry	Professeur des Universités	Arts et Métiers ParisTech – I2M Bordeaux
Examinateurs :		
Christophe Binetruy	Professeur des Universités	Ecole Centrale de Nantes – GeM
Directeur de thèse :		
Pascal Mognol	Professeur des Universités	ENS Rennes - GeM
Co-encadrant de thèse :		
Olivier Kerbrat	Maitre de conférences	ENS Rennes – GeM

Invité
Marc Vautier Expert Référent pour la communauté des orange Expert Energie & Environnement chez Orange

Remerciements

Je souhaite, tout d'abord, remercier très sincèrement mes encadrants de thèse Pascal Mognol et Olivier Kerbrat pour leurs disponibilités, leurs conseils avisés et leurs confiances tout au long de ces trois années. Vous avez su trouver suffisamment de temps à me consacrer malgré la prise de vos nouvelles responsabilités administratives et je vous en remercie. J'ai particulièrement apprécié nos échanges, que ce soit avec Olivier quasiment tous les jours ou avec Pascal, un petit peu plus espacés dans le temps et je pense que c'est grâce vous que j'ai pu m'épanouir professionnellement pendant ces trois années et donc réaliser cette thèse dans de très bonnes conditions. Un grand merci !

Je souhaite ensuite remercier l'ensemble des membres de mon jury de m'avoir honoré de leur présence. Je remercie tout particulièrement Peggy Zwolinski et Nicolas Perry pour le travail de rapporteurs qu'ils ont fait permettant de lever des points intéressants du travail de recherche. De même je remercie Emmanuel Caillaud, Christophe Binetruy et Marc Vautier d'avoir accepté d'évaluer ce travail de thèse.

Je remercie également l'ensemble de l'équipe PMM avec qui nous avons eu des très bons moments et des échanges intéressants lors de réunions, de cours doctoraux ou encore de séminaires de recherche. Ainsi je remercie mes collègues et amis Vincent, Fabrice, Tugdual, Jérôme, Stéphane et Benoit.

Je remercie aussi l'ensemble du réseau EcoSD pour nous avoir donné l'opportunité de travailler avec un projet de recherche collaboratif et ainsi l'ensemble des laboratoires partenaires du réseau qui nous ont ouverts leurs portes lors de sessions d'essais sur leurs machines de fabrication.

J'ai passé la plupart de mon temps à l'ENS Rennes ces dernières années. D'abord, en tant qu'élève, puis en tant que doctorant. Ainsi je remercie l'ensemble du département mécatronique, mais aussi le personnel technique et administratif et les membres du Living lab. Je remercie également l'ensemble des doctorants, post doctorant et ingénieur de recherche qui m'ont accompagné pendant les journées de travail : Fabrice, Antoine, Melaine, Amaury, Clyde.

Je remercie également l'ensemble de mes amis pour les bons moments passés en dehors du travail – Valentin, Valentin, Jérôme, Momo, Eddy, Damien, Alexia, François, Guillaume, Juju, AG et Karim. Je tiens également à exprimer toute ma gratitude au super coach Pascal pour tous ces moments inoubliables, ta pédagogie et tes heures de relecture passées sur le manuscrit.

Enfin, je termine cette partie en remerciant mes parents, mes deux frères et ma soeur ainsi que l'ensemble de ma famille disséminée un peu partout dans le monde pour leur soutien durant cette période mais aussi bien avant car vous m'avez toujours encouragé dans cette voie.

Table des matières

Table des matières.....4

Liste des figures.....9

Liste des tableaux.....14

Chapitre 1 : Contexte général de l'étude.....18

1. Avant-propos 19
1.1. Contexte 19
1.2. Les procédés de fabrication additive et l'analyse de leurs performances environnementales 20
1.3. Combinaison des performances environnementales avec des performances techniques et économiques d'un produit. 21
2. Fabrication additive 21
2.1. Principe de la fabrication additive 21
2.2. Evolution des technologies de fabrication 22
2.3. Description des technologies de fabrication 23
2.3.1. Photopolymérisation en cuve 23
2.3.2. Projection de matière 24
2.3.3. Projection de liants 25
2.3.4. Fusion sur lit de poudre 25
2.3.5. Extrusion de matière 26
2.3.6. Dépôt de matière sous énergie concentrée 27
2.3.7. Stratification de couche 27
2.4. Avantages et applications 28
3. Les aspects environnementaux des procédés de fabrications additive 30
3.1. L'industrie de mise en forme : Une hausse des ventes et de l'utilisation des procédés de fabrication additive 30
3.2. Analyse de cycle de vie 32
3.2.1. Définition des objectifs et du champ de l'étude 33
3.2.2. Analyse de l'inventaire 33
3.2.3. Evaluation des impacts environnementaux 33

3.2.4. Interprétation des résultats 33
3.2.5. Synthèse 34
4. Synthèse et plan du manuscrit 35

Chapitre 2 : Etat de l'art et problématique scientifique 37

1. Avant-propos 38
2. Analyse environnementale 38
2.1. Transformation de la matière première 39
2.2. Etapes de fabrication de la pièce 41
2.2.1. Consommation d'énergie électrique des procédés de fabrication additive 41
2.2.2. Extension des flux élémentaires pour l'analyse environnementale des procédés de fabrication additive 45
2.3. Finition 50
2.4. Modéliser pour prédire 53
2.5. Comparaison entre les procédés de fabrication additive et les procédés conventionnels 56
2.6. Optimisation 62
2.7. Synthèse 62
3. Analyse technique des procédés de fabrication additive 64
3.1. Modélisation des procédés de fabrication additive avec une approche process 64
3.2. Modélisation des procédés de fabrication additive avec une approche produit 65
3.3. Synthèse 66
4. Analyse de coût des procédés de fabrication additive 67
4.1. Modélisation du coût de fabrication des procédés de fabrication additive 67
4.2. Synthèse 71
5. Combinaison des données environnementales aux données techniquo-économiques 71
5.1. Combinaison de la performance environnementale avec la performance technique 71
5.2. Combinaison de la performance environnementale avec les performances de coûts 72
5.3. Synthèse 73
6. Synthèse et positionnement de nos travaux de recherche 73
6.1. Synthèse 73
6.2. Positionnement de nos travaux de recherche 74

Chapitre 3 : Méthodologie d'évaluation multicritère.....79

1. Approche générale 80
2. Modélisation du procédé de fabrication 81
2.1. Données requises pour la modélisation 83
2.2. Structuration de la méthode d'acquisition des données 84
2.3. Méthode d'obtentions des modèles environnementaux 85
2.3.1. Décomposition des différentes étapes de fabrication 86
2.3.2. Méthode d'obtention du modèle électrique 88
2.3.3. Méthode d'obtention du modèle fluidique 90
2.3.4. Méthode d'obtention du modèle de consommation de matière 91
2.4. Méthode d'obtention des modèles économiques et techniques 92
2.4.1. Méthode d'obtention du modèle de coût 92
2.4.2. Méthode d'obtention du modèle technique 93
2.4.3. Synthèse sur la méthode d'acquisition 93
3. Utilisation des modèles 94
3.1. Affichage des résultats 94
4. Synthèse sur la méthodologie 95

Chapitre 4 : Application aux procédés de fabrication additive.....98

1. Introduction aux machines étudiées 99
2. Transformation du granulé plastique en bobine de fil 101
2.1. Principe 102
2.2. Mise en fil réalisée avec le plateau ComposiTIC 102
2.3. Consommation et rejets de la ligne d'extrusion 103
2.3.1. Etuvage des granulés plastiques 104
2.3.2. Consommation d'énergie électrique de la ligne d'extrusion 105
2.3.3. Consommation de matières et de fluides 108
2.4. Synthèse sur la transformation de la matière 109
3. Fabrication par extrusion de matière 110
3.1. Présentation de la machine étudiée 110

3.2. Evaluation de la consommation d'énergie électrique 111
3.2.1. Puissance moyenne et durée des phases de fabrication 113
3.2.2. Synthèse la consommation d'énergie électrique 118
3.3. Evaluation de la consommation de matière 118
3.4. Evaluation de la consommation de fluide 119
3.5. Synthèse sur l'évaluation des données d'inventaires 119
3.6. Combinaison des modèles environnementaux avec des modèles technico-économique . 119
3.6.1. Evaluation du coût de fabrication 120
3.6.2. Evaluation technique 120
3.7. Synthèse de l'étude sur l'évaluation multicritère du procédé d'extrusion de matière 120
4. Fabrication par projection de matière 121
4.1. Présentation de la machine étudiée 122
4.2. Evaluation de la consommation d'énergie électrique 123
4.2.1. Puissance moyenne et durée des phases de fabrication 123
4.2.2. Synthèse sur la consommation d'énergie électrique 126
4.3. Evaluation de la consommation de matière 127
4.4. Evaluation de la consommation de fluide 127
4.5. Synthèse sur l'évaluation des données d'inventaires 127
4.6. Combinaison des modèles environnementaux avec des modèles technico-économiques 128
4.6.1. Evaluation du coût de fabrication 128
4.6.2. Evaluation technique 128
5. Stockage des données 129
6. Synthèse 129

Chapitre 5 : Exploitation des modèles sur un cas industriel.....132

1. Présentation de l'outil informatique 133
1.1. Présentation 134
1.2. Module 1 : lecture et extraction des données 134
1.3. Module 3 : Affichage des résultats 135
2. Présentation de la pièce du cas d'étude 136
2.1. Partenaire scientifiques et industriel 136
2.2. Présentation de la pièce d'étude 136
3. Fabrication par extrusion de matière 137

3.1. Application sur la HP designjet 3D 137
3.2. Evaluation multicritère du prototype de femtocell pour d'autres machines d'extrusion de matière. 140
3.3. Synthèse 145
4. Comparaison des machines d'extrusion de matière 145
5. Fabrication par projection de matière 148
5.1. Application sur l'Objet 30 pro 148
5.2. Evaluation multicritère du prototype de femtocell pour d'autres machines de projection de matière. 150
5.3. Synthèse 152
6. Comparaison des machines de projection de matière 152
7. Synthèse 154

Chapitre 6 : Conclusion et perspectives 157

1. Synthèse et apports des travaux menés 158
2. Perspectives et voies de recherches 160

Annexe A 164

Annexe B 169

Bibiliographie 173

Liste des figures

Figure 1.1 - Les 17 objectifs de développement durable (ONU Sustainable development goals2018) 19

Figure 1.2 - Les 7 grandes familles des procédés de fabrication additive (ISO 17296-2)..... 23

Figure 1.3 - Illustration du procédé de Photopolymérisation en cuve (Laverne2016) 24

Figure 1.4 - Illustration du procédé de projection de matière (Laverne2016)..... 24

Figure 1.5 - Illustration du procédé de projection de liant (Laverne2016) 25

Figure 1.6 - Illustration du procédé de fusion sur lit de poudre (Laverne2016) 26

Figure 1.7 - Illustration du procédé d'extrusion de matière (Laverne2016) 27

Figure 1.8 - Illustration du procédé de dépôt de matière sous énergie concentrée (Laverne2016) 27

Figure 1.9 - Illustration du procédé de stratification de couches (Laverne2016) 28

Figure 1.10 - Part relative d'utilisation de la fabrication additive par domaine (Wohlers2017) 28

Figure 1.11 - Exemple de produit réalisé avec l'impression alimentaire 29

Figure 1.12 - Exemple de pièces optimisées pour l'aéronautique. 29

Figure 1.13 - Exemple d'illustration d'un implant crânien 30

Figure 1.14 - Évolution des ventes de machines de fabrication additive métallique dans le monde depuis les années 2000 (Wohlers2017) 31

Figure 1.15 - Évolution des ventes d'imprimantes 3D personnelles depuis 2007 (Wohlers2017) 32

Figure 1.16 - Les quatre étapes d'une analyse de cycle de vie (ISO2006) 33

Figure 1.17 - Étapes du Cycle de Vie d'un produit 34

Figure 2.1 - Evolution du nombre d'articles concernant l'analyse environnementale des procédés de fabrication additive depuis 2006..... 38

Figure 2.2 - Obtention de poudre métallique par atomisation gazeuse (Dawes2015)..... 40

Figure 2.3 - Comparatif de production de matières premières par voie directe et indirecte (Morrow2007) 40

Figure 2.4 - Décomposition du procédé en entité mécanique (Sreenivasan2009)..... 42

Figure 2.5 - Les différentes orientations de la pièce étudiée (Mognol2006)..... 43

Figure 2.6 - Génération de solutions de candidats et application de l'opérateur de variation sur un échantillon de pièce 3D (Verma2013)..... 43

Figure 2.7 - Géométrie normalisée de contrôle de puissance (Baumers2010) 44

Figure 2.8 - Configuration de remplissage maximal de l'espace de travail dans le cas de la fusion sélective par laser (à gauche) et de la fusion par faisceau d'électrons (à droite) (Baumers2011) 44

Figure 2.9 - Consommation énergétique des quatre phases de fabrication pour une fabrication machine froide (rouge) et une à la suite (Vert) (Balogun2014) 45

Figure 2.10 - Consommation énergétique en fonction des différentes positions dans l'espace machine (Junk2013) 45

Figure 2.11 - Méthodologie UPLCI associée à l'initiative CO2PE! (Kellens2012) 46

Figure 2.12 - Flux entrants et sortants pris en compte dans la méthodologie UPLCI (Kellens2012) 47

Figure 2.13 - Méthodologie d'évaluation et de caractérisation d'une machine de projection de poudre métallique (Bourhis2013) 47

Figure 2.14 - Relevé de la puissance consommée dans le bac à ultrason (Mognol2006) 50

Figure 2.15 - Pièce étudiée dans les travaux de Junk (Junk2012) 50

Figure 2.16 - Courbe de puissance de la machine d'extrusion de matière (Junk2012) 51

Figure 2.17 - Courbe de puissance de la machine de projection de liant (Junk2012) 51

Figure 2.18 - Espace de fabrication (Baumers2013) 52

Figure 2.19 - Ensemble des éléments nécessaires à la fabrication par projection de poudres (Le Bourhis, 2014) 55

Figure 2.20 - Impact environnementale des procédés d'usinage et de fabrication additive (droite) pour la pièce étudiée (gauche) (Serres2011) 57

Figure 2.21 - Pièce étudiée dans les travaux de Telenko vue sous 3 angles différents (Telenko2012) 57

Figure 2.22 - Différence des puissances et des temps de fabrications entre la fusion sélective par laser et l'injection plastique (Chen2015) 58

Figure 2.23 - Comparaison d'énergie entre la fusion sélective par laser et l'injection plastique. (Chen2015) 58

Figure 2.24 - Cas d'étude (Yoon2014) 59

Figure 2.25 - SEC en fonction du nombre de pièce fabriquée (Yoon2014) 59

Figure 2.26 - Coût en fonction du nombre de pièces fabriquées (Yoon2014) 60

Figure 2.27 - Pièces étudiées dans les travaux de Faludi et al. (Faludi2014) 60

Figure 2.28 - Pièces étudiées dans les travaux de Peng (Peng2017) 61

Figure 2.29 - Comparaison de l'impact environnemental entre un process d'usinage et de projection de poudre métallique (Peng2017) 61

Figure 2.30 - Modèle géométrique du procédé d'extrusion de matière (Boschetto2011) 66

Figure 2.31 - Ecart de rugosité entre le réel et le modèle. (Boschetto2011) 66

Figure 2.32 - Pièce étudiée par l'équipe d'Hopkinson. 67

Figure 2.33 - Comparaison du coût entre l'injection plastique et les machines de fabrication additive 68

Figure 2.34 - Comparaison des modèles de coûts économique entre l'injection plastique et la fusion sélective (Ruffo2006) 69

Figure 2.35 - Objet d'étude à fabriquer et front de Pareto correspondant 72

Figure 2.36 - Structure de l'optimisation développée pour un tranchage adaptatif (Verma2013) 72

Figure 2.37 - Méthodologie d'évaluation multicritère 76

Figure 3.1 - Les différentes étapes de fabrication d'une pièce 80

Figure 3.2 - Affichage des résultats sur Solidworks Sustainability 82

Figure 3.3 - Focalisation sur l'étape d'inventaire des flux élémentaires 83

Figure 3.4 - Limites de l'étude 83

Figure 3.5 - Méthodologie d'évaluation multicritère 84

Figure 3.6 - Méthode d'acquisition des données 85

Figure 3.7 - Décomposition des étapes de fabrication 87

Figure 3.8 - Mallette d'acquisition 88

Figure 3.9 - Dispositif de mesure 89

Figure 3.10 - Méthode d'obtention du modèle électrique 89

Figure 3.11 - Méthode d'obtention du modèle de consommation de fluide 90

Figure 3.12 - Méthode d'obtention du modèle de consommation de matière 91

Figure 3.13 - Exemple d'affichage de résultats 95

Figure 4.1 - Méthodologie d'évaluation multicritère appliquée aux deux machines de fabrication additive 100

Figure 4.2 - Focus sur l'étape de fabrication 101

Figure 4.3 - Schéma de l'extrudeuse monovis (Vergnes2002) 102

Figure 4.4 - Ligne d'extrusion du plateau ComposiTIC 103

Figure 4.5 - Sources de consommation et de rejets de chaque étape de la ligne d'extrusion 104

Figure 4.6 - Dispositif d'étuvage des granulés plastique 105

Figure 4.7 - Puissance instantanée des différentes phases de la ligne d'extrusion. 106

Figure 4.8 - Puissance moyenne et durée des phases de fabrication de la ligne d'extrusion pour la mise en fil d'1 kg d'ABS 107

Figure 4.9 - Valeur en pourcentage des différentes étapes de la ligne d'extrusion 108

Figure 4.10 - illustration des valeurs pour la mise en fil d'1kg de de bobine d'ABS 109

Figure 4.11 - Illustration de la HP designjet 3D 111

Figure 4.12 - Méthodologie d'acquisition données 111

Figure 4.13 - Agencement des différentes phases de fabrication pour la HP designjet 3D..... 112

Figure 4.14 - Courbe de puissance pour la fabrication de la pièce 1 du protocole expérimental 114

Figure 4.15 - Puissance moyenne et durée des phases de fabrication pour la première pièce du protocole expérimental (Extrusion de matière)..... 115

Figure 4.16 - Arbre des processus élémentaire pour la première pièce du protocole expérimental. 116

Figure 4.17 - Phases prises en compte pour les machines de projection de matière..... 121

Figure 4.18 - Illustration de l'objet 30 pro..... 122

Figure 4.19 - Agencement des différentes phases de fabrication pour l'objet 30 pro 123

Figure 4.20 - Puissance en fonction du temps pour la fabrication de la pièce 1 du protocole expérimental 124

Figure 4.21 - Puissance moyenne et durée des phases de fabrication pour la première pièce du protocole expérimental (Jet de matière) 126

Figure 4.22 - Pièce test utilisée par Kazmer (Kazmer2017)..... 129

Figure 5.1 - Méthodologie d'évaluation multicritère – utilisation des modèles..... 133

Figure 5.2 - Interface graphique de la sélection des données 135

Figure 5.3 - Exemple d'affichage des résultats obtenu à l'issu du troisième module..... 135

Figure 5.4 - Prototype de femtocell proposé par la société Orange 136

Figure 5.5 - Représentation graphique des données estimées (ligne) et réelles (pointillés)..... 139

Figure 5.6 - Evaluation multicritère du prototype de femtocell avec et sans la transformation de la matière 140

Figure 5.7 - Machines d'extrusion de matière étudiées..... 141

Figure 5.8 - Représentation graphique des données estimées (ligne) et réelles (pointillés) pour la Makerbot replicator 2X (FDM1) 143

Figure 5.9 - Représentation graphique des données estimées (ligne) et réelles (pointillés) pour la Rapman 3.2 (FDM2) 144

Figure 5.10 - Représentation graphique des données estimées (ligne) et réelles (pointillés) pour la Stratasys mojo (FDM3)..... 144

Figure 5.11 - Représentation graphique des données estimées (ligne) et réelles (pointillés) pour la Stratasys Dimension elite (FDM5)..... 145

Figure 5.12 - Combinaison des données pour FDM 1 et FDM 2 146

Figure 5.13 - Combinaison des données pour FDM 3, FDM 4 et FDM 5 146

Figure 5.14 - Evaluation multicritère de FDM1 (rouge) et de FDM2 (bleu) 147

Figure 5.15 - Evaluation multicritère de FDM3 (noir), de FDM4 (vert) et de FDM5 (orange) 147

Figure 5.16 - Représentation graphique des données estimées (ligne) et réelles (pointillés)..... 150

Figure 5.17 - Machines de projection de matière étudiées 151

Figure 5.18 - Représentation graphique des données estimées (ligne) et réels (pointillés) pour l'objet260 connex (JET2) 151

Figure 5.19 - Représentation graphique des données estimées (ligne) et réels (pointillés) pour l'objet350 connex (JET3) 152

Figure 5.20 - Combinaison des données pour JET 1, JET 2 et JET 3..... 153

Figure 5.21 - Evaluation multicritère des trois machines de projection de matière. JET1 (rouge), JET2 (bleu) et JET3 (vert) 154

Figure 6.1 - Evaluation multicritère des trois machines de projection de matière. JET1 (rouge), JET2 (bleu) et JET3 (vert) 161

Figure A.1 - Agencement des différentes phases de fabrication pour la Makerbot replicator 2X 164

Figure A.2 - Agencement des différentes phases de fabrication pour la Rapman 3.2..... 165

Figure A.3 - Agencement des différentes phases de fabrication pour la Stratasys Mojo FDM3 166

Figure A.4 - Agencement des différentes phases de fabrication pour la Stratasys Dimension elite FDM5 167

Figure B.1 - Agencement des différentes phases de fabrication pour l'objet260 connex..... 169

Figure B.2 - Agencement des différentes phases de fabrication pour l'objet260 connex..... 170

Liste des tableaux

Tableau 2.1 - Consommation énergétique nécessaire à la transformation d'1kg de poudre pour différents matériaux. 41

Tableau 2.2 - Tableau comparatif des machines de fabrication additive d'une point de vue environnemental (Yosofi2018). 49

Tableau 2.3 - Consommation d'énergie liée à la finition des pièces 53

Tableau 3.1 - protocole expérimental 86

Tableau 3.2 - Ecart de puissance en phase de mise en forme 86

Tableau 4.1 - les différentes machines utilisées 99

Tableau 4.2 - Valeurs des consommations d'énergie 108

Tableau 4.3 - Valeurs des consommations pour l'obtention d'un kilogramme de bobine d'ABS 109

Tableau 4.4 - Valeurs des consommations d'énergie et de durée des phases de préparation de fichier et de finition 113

Tableau 4.5 - Puissance moyenne des phases de fabrication du parallélépipède rectangle 114

Tableau 4.6 - Puissance moyenne des phases de fabrication du cylindre 116

Tableau 4.7 - Puissance moyenne des phases de fabrication du rectangle fabriqué dans le plan X/Y 117

Tableau 4.8 - Puissance moyenne des phases de fabrication du rectangle fabriqué suivant Z 117

Tableau 4.9 - Puissance moyenne des phases de fabrication de la HP designjet 3D 118

Tableau 4.10 - Durée moyenne de la chauffe des têtes 118

Tableau 4.11 - Coûts fixes des paramètres de la HP designjet 3D 120

Tableau 4.12 - Protocole expérimental utilisé pour le procédé de projection de matière 122

Tableau 4.13 - Valeurs des consommations d'énergie et de durée des phases de préparation de fichier 123

Tableau 4.14 - Puissance moyenne des phases de fabrication du parallélépipède rectangle 124

Tableau 4.15 - Puissance moyenne des phases de fabrication de l'objet 30 pro 125

Tableau 4.16 - Puissance et durée moyenne de la phase de finition 125

Tableau 4.17 - Durée moyenne de la chauffe des têtes et de la préparation 125

Tableau 4.18 - Coûts fixes des paramètres de l'objet 30 pro 128

Tableau 5.1 - Machines étudiées dans le cadre de cette thèse 133

Tableau 5.2 - Données d'entrées nécessaire à l'évaluation multicritère 137

Tableau 5.3 - Energie électrique (FDM4) 138

Tableau 5.4 - Masse de la pièce et du support (FDM4) 138

Tableau 5.5 - Volume d'eau consommé (FDM4)..... 138

Tableau 5.6 - Coût de fabrication (FDM4)..... 138

Tableau 5.7 - Rugosité de la zone A et B (FDM4) 138

Tableau 5.8 - Consommation d'énergie électrique du prototype de femtocell pour quatre machines d'extrusion de matière 142

Tableau 5.9 - Consommation de matière et de support du prototype de femtocell pour quatre machines d'extrusion de matière..... 142

Tableau 5.10 - Consommation de fluide lors de la réalisation du prototype de femtocell pour quatre machines d'extrusion de matière..... 142

Tableau 5.11 - Coût de revient du prototype de femtocell pour quatre machines d'extrusion de matière 143

Tableau 5.12 - Coût de revient du prototype..... 143

Tableau 5.13 - Meilleur choix de machine en fonction des différents critères pour les machines moyennes gammes 148

Tableau 5.14 - Meilleur choix de machine en fonction des différents critères pour les machines de type industriel..... 148

Tableau 5.15 - Données d'entrées nécessaire à l'évaluation du procédé 149

Tableau 5.16 - Energie électrique (JET1) 149

Tableau 5.17 - Masse de la pièce et du support (JET1) 149

Tableau 5.18 - Volume d'eau consommé (JET1) 149

Tableau 5.19 - Coût de fabrication (JET1) 149

Tableau 5.20 - Rugosité de la zone A et B (JET1)..... 150

Tableau 5.21 - Meilleur choix de machine en fonction des différents critères pour les machines de type industriel..... 154

Tableau A.1 - Puissance moyenne des phases de fabrication pour FDM1 164

Tableau A.2 - Durée moyenne des phases fixes pour FDM1..... 164

Tableau A.3 - Paramètres de coûts fixes pour FDM1 165

Tableau A.4 - Donnée nécessaire à l'évaluation multicritère du prototype de femtocell pour FDM1165

Tableau A.5 - Puissance moyenne des phases de fabrication pour FDM2 165

Tableau A.6 - Durée moyenne des phases fixes pour FDM2..... 166

Tableau A.6 - Paramètres de coûts fixes pour FDM2 166

Tableau A.7 - Donnée nécessaire à l'évaluation multicritère du prototype de femtocell pour FDM2166

Tableau A.8 - Puissance moyenne des phases de fabrication pour FDM3 166

Tableau A.9 - Durée moyenne des phases fixes pour FDM3..... 166

Tableau A.10 - Paramètres de coûts fixes pour FDM3 167

Tableau A.11 - Donnée nécessaire à l'évaluation multicritère du prototype de femtocell pour FDM3 167

Tableau A.12 - Puissance moyenne des phases de fabrication pour FDM5 168

Tableau A.13 - Durée moyenne des phases fixes pour FDM5..... 168

Tableau A.14 - Paramètres de coûts fixes pour FDM5 168

Tableau A.15 - Donnée nécessaire à l'évaluation multicritère du prototype de femtocell pour FDM5 168

Tableau B.1 - Puissance moyenne des phases de fabrication pour JET2 169

Tableau B.2 - Durée moyenne des phases fixes pour JET2 169

Tableau B.3 - Paramètres de coûts fixes pour JET2..... 170

Tableau B.4 - Donnée nécessaire à l'évaluation multicritère du prototype de femtocell pour JET2 . 170

Tableau B.5 - Puissance moyenne des phases de fabrication pour JET2 170

Tableau B.6 - Durée moyenne des phases fixes pour JET3 171

Tableau B.7 - Paramètres de coûts fixes pour JET3..... 171

Tableau B.8 - Donnée nécessaire à l'évaluation multicritère du prototype de femtocell pour JET3 . 171

Chapitre 1 : Contexte général de l'étude

Sommaire

1	Avant-propos	18
2	Fabrication additive	20
3	Les aspects environnementaux des procédés de fabrication additive	29
4	Synthèse et plan du manuscrit	34

Dans ce premier chapitre, nous présenterons **le contexte général** dans lequel s'inscrivent ces travaux de thèse afin de fournir au lecteur une vision claire et détaillée du contexte scientifique associé à nos travaux.

Dans une première partie, nous présenterons **le contexte global de nos travaux qui s'inscrivent dans les enjeux environnementaux actuels**.

Le second chapitre de ce manuscrit sera consacré à la présentation des **procédés de fabrication additive**. Nous verrons notamment quelles peuvent être les possibilités offertes par ces procédés innovants ainsi que les secteurs d'activités principaux.

Dans une troisième partie, nous verrons quelle est **la place de la fabrication additive dans le secteur industriel** et nous présenterons un **outil permettant de quantifier les impacts environnementaux**.

Enfin, dans une quatrième partie, nous annoncerons **le plan retenu pour ce manuscrit**.

1. Avant-propos

1.1. Contexte

Il y a 70 ans, une génération entière de dirigeants unissait ses efforts pour créer l'Organisation des Nations Unies (ONU). Ils ont bâti cette organisation et façonné les valeurs de paix, de dialogue et de coopération internationale, sur les ruines laissées par la guerre et la discorde. Le 25 septembre 2015, les 193 Etats membres des Nations Unies adoptent un nouveau programme visant à mettre fin à toutes les formes de pauvreté, combattre les inégalités et s'attaquer aux changements climatiques d'ici 2030. Lors de ce sommet, 17 objectifs de développement durable (ODD) ont été approuvés et sont entrés en vigueur par la suite le 1er janvier 2016. La figure 1.1 illustre ces 17 ODD.

Figure 1.1 - Les 17 objectifs de développement durable (ONU Sustainable development goals2018)

Ces objectifs sont variés et touchent aussi bien, la nourriture que l'éducation. Ainsi, il est attendu des gouvernements qu'ils prennent les choses en main et mettent en place des cadres nationaux pour atteindre les 17 objectifs d'ici 2030 afin d'avoir un avenir durable. Une amélioration du monde dans lequel nous vivons n'est pas possible sans un changement dans le secteur industriel au regard des enjeux soulevés. Par conséquent, on retrouve parmi ces 17 ODD un objectif (objectif 9) qui vise à promouvoir l'industrialisation durable dont l'intitulé est :

Objectif 9 : Bâtir une infrastructure résiliente, promouvoir une industrialisation durable qui profite à tous et encourager l'innovation.

Afin d'identifier les points sur lesquels agir, chaque objectif est associé à des cibles. Pour l'objectif neuf, 8 cibles lui sont associées dont une qui concerne directement l'industrie:

D'ici à 2030, moderniser l'infrastructure et adapter les industries afin de les rendre durables, par une utilisation plus rationnelle des ressources et un recours accru aux technologies et procédés industriels propres et respectueux de l'environnement, chaque pays agissant dans la mesure de ses moyens.

Afin de répondre à cette cible, il faut mettre en place des voies d'amélioration des procédés de fabrication d'un point de vue environnemental. Cette démarche nécessite une connaissance fine des

flux entrants et sortants lors de la fabrication d'un produit. Malheureusement, ce n'est pas toujours le cas pour les procédés plus récents tels que les procédés de fabrication additive qui sont moins renseignés à ce jour. En effet, les bases de données actuelles tel que Ecoinvent sont bien souvent en manque d'information sur ces procédés de fabrication. En ce sens, la connaissance du niveau de performance environnementale des procédés de fabrication est une étape nécessaire avant d'envisager des démarches d'amélioration.

Par conséquent, il est primordial de bien « compter » les différentes sources de consommations et de rejets. Pour cela, une évaluation quantitative des flux intervenant pendant la fabrication de pièces est nécessaire pour améliorer la connaissance de la performance environnementale d'un procédé.

1.2. Les procédés de fabrication additive et l'analyse de leurs performances environnementales

La performance des procédés de fabrication est souvent orientée uniquement sur des aspects énergétiques (Kellens2017). Or la performance environnementale d'un procédé doit considérer l'ensemble des flux associés à la fabrication de la pièce. La consommation énergétique n'est qu'une partie des sources d'impacts environnementaux. **Cependant, la majorité des méthodes employées pour caractériser les procédés de fabrication additive s'intéressent essentiellement à la consommation d'énergie électrique du procédé.**

Néanmoins, ces travaux sur les aspects énergétiques de ces procédés sont intéressants car ils ont permis de lever certains verrous tels que l'influence de l'orientation de la pièce sur la consommation énergétique de la machine (Mognol2006). De plus, ces études ont permis de mettre en avant l'importance du couple pièce-procédé lors de l'évaluation environnementale d'un procédé de fabrication.

Il est donc essentiel de prendre en compte l'ensemble de ces flux dans l'évaluation de la performance environnementale d'un procédé de fabrication. De plus, afin de prendre en compte l'influence des différents paramètres de fabrication sur l'impact environnemental pendant la fabrication d'un produit, il est nécessaire de mettre en place des modèles prédictifs permettant d'avoir un levier d'action sur tous les paramètres de fabrication dès la phase de conception du produit. Karel Kellens et Florent Le Bourhis ont proposé les premières méthodes d'analyse environnementale des procédés de fabrication additive en prenant en compte l'ensemble des flux entrants et sortants pendant la fabrication d'un produit. Leurs travaux seront présentés dans le chapitre suivant.

Ces dernières années, les études menées sur les aspects environnementaux de ces procédés se sont particulièrement focalisées sur l'étape de mise en forme du produit. Laissant de côté les autres étapes telles que la préparation du fichier et la finition de la pièce qui sont essentielles à la bonne production de la pièce. **C'est pour ces raisons qu'il convient de disposer de données précises et fiables sur les consommations et rejets de ces procédés de fabrication sur l'ensemble des étapes de production afin d'évaluer quantitativement leurs impacts environnementaux**.

1.3. Combinaison des performances environnementales avec des performances techniques et économiques d'un produit.

Les travaux de ces dernières années sur l'évaluation environnementale des procédés de fabrication additive ont mis en avant l'importance de la prise en compte du couple pièce/procédé. Dans une démarche de choix d'un procédé d'un point de vue environnemental, il est essentiel d'avoir une bonne connaissance du niveau des performances environnementales dès la conception d'un produit. Ce niveau de connaissance peut être atteint en s'intéressant à l'ensemble des flux traversant le procédé étudié sur l'ensemble du cycle de production de la pièce et en proposant des modèles prédictifs. Cependant, la comparaison des procédés de fabrication en fonction des performances environnementales n'est pas suffisante car d'autres composantes telles que les propriétés techniques et les coûts sont également liées au couple pièce-procédé.

De plus, si on se place dans une démarche d'optimisation d'un procédé d'un point de vue environnementale, cette optimisation ne doit pas se faire au détriment de la qualité finale et du coût d'un produit. Ainsi, la combinaison de ces trois critères doit amener une vision plus globale des consommations en jeu pendant la fabrication d'un produit.

Par conséquent, nous proposerons un outil permettant l'évaluation d'un procédé de fabrication additive en fonction des critères environnementaux, techniques et de coûts. On parle alors d'évaluation multicritère. En effet, si le concepteur a, dès la phase de conception d'un produit, des informations sur les propriétés mécaniques ainsi que le coût de sa pièce en plus des données environnementales, celui-ci peut faire un choix de conception permettant de minimiser les aspects environnementaux et le coût du produit et avoir des propriétés mécaniques qui respectent le cahier des charges.

Etant donné que dans la suite de ce manuscrit, nous nous intéresserons principalement aux procédés de fabrication additive, il est essentiel de faire un point sur les différentes technologies actuelles. C'est pour cette raison que nous détaillerons plus précisément les différentes technologies de fabrication additive et leur degré de maturité dans la section suivante.

2. Fabrication additive

2.1. Principe de la fabrication additive

La fabrication additive ou fabrication par ajout de matière regroupe un ensemble de procédés permettant de fabriquer couche par couche, point par point ou cordon par cordon, par ajout de matière, un objet physique à partir de son modèle tridimensionnel. La réalisation du produit se fait directement à partir du matériau brut sous forme de poudre, de liquide, de feuille ou de filament sans un besoin d'outillage supplémentaire. Les moyens de mise en forme de ces procédés sont généralement opposés avec les méthodes classiques telles que l'usinage. Initialement utilisés pour la production de pièces prototypes, les technologies de fabrication additive permettent aujourd'hui de réaliser des pièces répondant aux caractéristiques fonctionnelles attendues du produit final (Gibson2009b)(Gibson2009a)(Hopkinson2006).

2.2. Evolution des technologies de fabrication

Les procédés de fabrication additive actuels font leur apparition au milieu des années 1980 avec l'arrivée de la photopolymérisation en cuve. C'est l'américain Charles Hull (Hull1986) qui industrialise la première machine de fabrication par ajout de matière. Cette technologie permettra de fabriquer des pièces couche par couche en trois dimensions par solidification d'une résine liquide photosensible lors d'une exposition aux rayons ultraviolets (Pham1998,Bártolo2011). Depuis, de nombreux procédés ont été développés, offrant au fur et à mesure la possibilité d'utiliser de nouveaux matériaux comme les polymères, les métaux et les céramiques (Kochan1999)(Dimitrov2006)(Zhang2009). Le premier procédé permettant la fabrication de pièces métalliques est le procédé de stratoconception développé dans un premier temps par Feygin au Etats-unis (Feygin1988) puis repris par des français (Barlier1993). Ce procédé consiste en la décomposition automatique de l'objet en une série de couches élémentaires complémentaires appelées strates, dans lesquelles sont placés des inserts de positionnement et des renforts. Chacune de ces strates est directement fabriquée par un moyen de découpe (usinage, découpe laser, découpe jet d'eau) à partir d'un matériau en forme de plaques. Ces strates sont ensuite positionnées par des inserts ou des éléments d'imbrication et assemblées afin de reconstituer la pièce finale. Ce procédé prendra plus tard le nom de stratification de couche.

C'est à la fin des années 1980 que Deckard développe le premier concept de frittage laser (Deckard1989). Cependant, la fabrication de pièces métalliques avec ce procédé ne permet pas d'obtenir des produits denses. En effet, cette technologie utilise un mélange de deux poudres dont l'une a un point de fusion beaucoup plus bas que l'autre. Ainsi lors de la fabrication, le matériau ayant le point de fusion le plus faible fond et lie les grains de poudre du second matériau ayant un point de fusion plus haut. Par conséquent, la pièce obtenue était poreuse et les propriétés mécaniques de celle-ci réduites (Chua1998).

Il faut attendre la fin des années 1990 pour voir les premières pièces métalliques denses produites à l'aide des technologies de fusion sur lit de poudre et plus particulièrement avec le procédé de fusion par faisceau d'électrons (Larson1998). Aujourd'hui, grâce à l'évolution des technologies laser, il devient possible d'augmenter la densité d'énergie au point focal du laser permettant ainsi de fusionner directement des poudres métalliques afin de fabriquer des pièces denses (Meiners2001).

Concernant la mise en forme des matières polymères, deux nouveaux concepts sont introduits au début des années 1990 avec les premières machines d'extrusion de matière (Crump1992) et de projection de liant (Sachs1993). Ces deux nouveaux procédés permettent entre autres l'utilisation de matière plus résistante d'un point de vue mécanique. C'est le cas pour le procédé d'extrusion de matière qui permet l'utilisation de l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS) pour la fabrication des pièces. L'utilisation de matériaux diversifiés offre ainsi une porte d'ouverture aux technologies utilisant des matériaux polymères pour la réalisation de pièces fonctionnelles.

Le dernier procédé de fabrication à avoir été développé est basée sur la technologie de projection de poudre métallique (Lewis1998) (Sears1999). Dans ce cas, la pièce est fabriquée au fur et à mesure par couches successives et ce cordon est formé suite à la fusion d'une poudre métallique projetée dans le faisceau d'un laser. C'est également au début des années 2000 qu'on voit apparaitre les premières machines de dépôt de fil métallique (Choi2001). Ces deux dernières technologies, qui font partie des plus récentes, ouvrent de nouvelles perspectives puisque la buse peut être associée à une cinématique cinq ou six axes. Cela permet donc de fabriquer des pièces complexes sans l'utilisation de support.

La fabrication de pièces composites (Ning2015) ou céramiques utilise les mêmes technologies que pour les polymères ou les métaux (Jafari2000,Shishkovsky2007,Balla2008,Christian2010).

2.3. Description des technologies de fabrication

Pendant le développement de ces procédés, différentes classifications ont été proposées par divers auteurs (Kruth1998)(Kruth2007)(Levy2003). Celles-ci classifiaient les procédés en fonction des matériaux utilisés. Or, la constante évolution de ces procédés, et, par conséquent l'utilisation de nouveaux matériaux, bousculait ces types de classifications.

C'est ainsi qu'en 2011, l'Association française de normalisation (AFNOR) a publié la norme française NF E67-001 (ISO2011), cherchant ainsi à fixer le vocabulaire de la fabrication additive. En vue de faciliter les échanges entre les intervenants du milieu, la structure américaine « American society for testing and materials » (ASTM) publie en 2012 la norme américaine ASTM F2792-12a qui regroupe les procédés de fabrication additive dans sept catégories. L'organisation internationale de normalisation (ISO) propose plus tard la norme ISO 17296-2 qui reprend cette nouvelle classification des procédés de fabrication additive et sera traduite en français. Aujourd'hui, les sept catégories de procédés de fabrication additive définies dans les normes ASTM F2792-12a (ASTM2015) et ISO 17296-2 (ISO2015) sont illustrées sur la figure 1.2. Cette classification est fondée sur un regroupement, au sein d'une même catégorie, de procédés qui utilisent une architecture de machine identique et pour lesquels les mécanismes physiques de transformation des matériaux sont similaires.

Matériaux	exemples de matériaux	Catégories de procédés						
		photopoloymérisation en cuve	projection de matière	projection de liant	fusion sur lit de poudre	extrusion de matière	Dépôt de matière sous flux d'énergie dirigé	stratification de couches
polymères thermodurcissables	Epoxy et acrylates	X	X					
polymères thermoplastiques	polyamide, ABS, PPSF		X	X	X	X		X
Bois	papier							X
Métaux	acier, alliages de titane, chrome-colbat			X	X		X	X
Matériaux céramiques industriels	alumine, zircone, nitrure de silicium	X		X	X			X
matériaux céramiques structurels	ciment sable de fonderie			X	X	X		

Figure 1.2 - Les 7 grandes familles des procédés de fabrication additive (ISO 17296-2)

2.3.1. Photopolymérisation en cuve

La photopolymérisation en cuve (VP) se réfère spécifiquement à une technologie dans laquelle les résines photodurcissables sont exposées à un laser et subissent une réaction chimique pour devenir solides (figure 1.3). La réaction chimique est appelée photopolymérisation, qui implique de nombreux composés chimiques tels que les photo-initiateurs, les additifs et les monomères / oligomères réactifs.

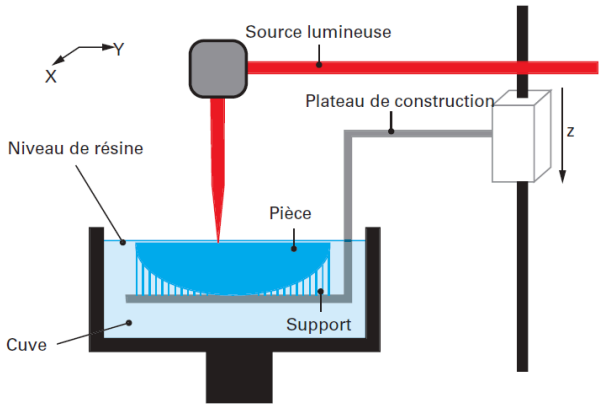


Figure 1.3 - Illustration du procédé de Photopolymérisation en cuve (Laverne2016)

Deux techniques de mise en forme sont disponibles pour ce procédé. La première consiste à la polymérisation à l'aide d'un laser et est connu sous le nom de stéréolithographie. La source lumineuse est ici ponctuelle et la création d'une couche est obtenue par balayage de la surface. La deuxième technologie repose sur l'utilisation d'un rayonnement lumineux obtenu par des lampes UV. Dans ce cas, la polymérisation s'effectue simultanément sur l'ensemble de la surface exposée.

2.3.2. Projection de matière

Ce procédé fonctionne sur le principe des imprimantes à jet d'encre. Il utilise des têtes d'impression qui viennent déposer des gouttelettes de matière à la surface de la zone de fabrication. Comme pour le procédé de photopolymérisation en cuve, ce procédé offre la possibilité d'utiliser des résines photosensibles qui, une fois déposées, sont polymérisées par la source lumineuse solidaire de la tête d'impression. Il est également possible d'utiliser des cires qui sont déposées à l'état liquide puis solidifiées par refroidissement.

Une large gamme de matériaux est disponible pour ce procédé. En effet on peut compter une soixantaine de matériaux différents allant des polymères techniques aux polymères standard permettant ainsi de simuler le comportement des pièces obtenues par injection plastique lors des tests fonctionnels. De plus, il est possible de réaliser des pièces multi-matériaux de couleurs différentes. La figure 1.4 illustre le procédé de projection de matière.

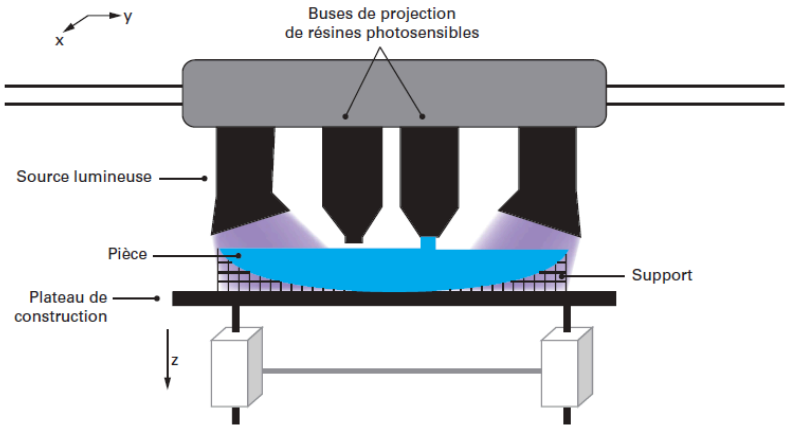


Figure 1.4 - Illustration du procédé de projection de matière (Laverne2016)

2.3.3. Projection de liants

La projection de liant est l'un des procédés de fabrication additive dans lequel des particules de poudre sont réunies par le dépôt sélectif d'un liant liquide, permettant ainsi la réalisation d'un produit en trois dimensions. La tête d'impression est conçue pour déposer l'agent de liaison sur la poudre point par point. La plate-forme descend ensuite afin qu'une autre couche de poudre soit répandue. Ce procédé permet ainsi de réaliser des pièces sans support offrant ainsi au concepteur une grande liberté lors de la conception du produit. De plus, les machines permettent un volume de construction important avec une vitesse d'impression élevée et un coût relativement faible. La figure 1.5 illustre le procédé de projection de liant.

La gamme de matériaux de base compatibles s'étend des polymères aux métaux en passant par les céramiques. La combinaison de gouttes de liant colorées permet de réaliser des produits de couleur. Son principal inconvénient demeure néanmoins la fragilité des pièces obtenues, qui nécessitent généralement un post-traitement (infiltration ou frittage) et une utilisation pour des applications sans contrainte mécanique élevée.

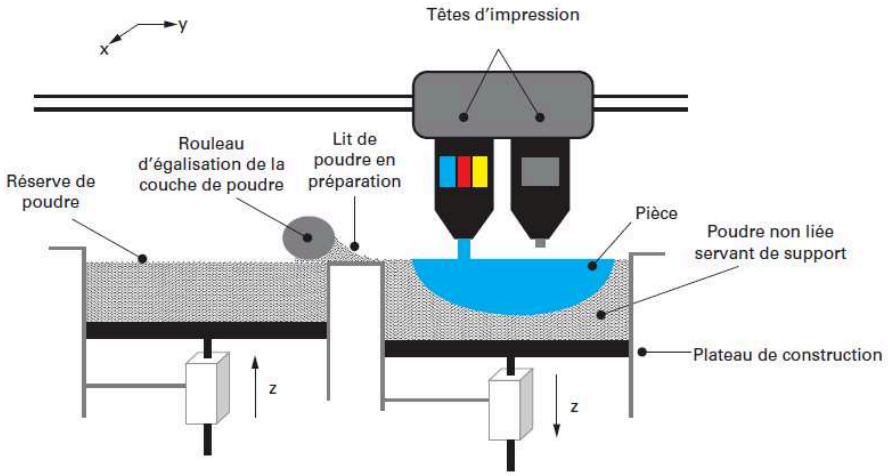


Figure 1.5 - Illustration du procédé de projection de liant (Laverne2016)

2.3.4. Fusion sur lit de poudre

a fusion sur lit de poudre est l'un des procédés dans lesquels une source thermique telle qu'un laser est utilisée pour induire les particules de poudres en fusion partielle ou complète entre elles. Les mécanismes de liaison du procédé de fusion sur lit de poudre sont principalement le frittage et la fusion. La différence réside dans le fait que le frittage est considéré comme un processus de fusion partielle alors que la fusion est considérée comme un processus de fusion complète (Kruth2005). Dans le processus de frittage, les particules fusionnent à la surface, ce qui entraîne une porosité inhérente de la pièce, tandis que dans le processus de fusion, toutes les particules fondent et fusionnent pour donner une pièce complètement dense et donc une porosité quasi nulle. La figure 1.6 illustre le procédé de fusion sur lit de poudre.

Pour ce procédé, la vitesse de fabrication ainsi que les propriétés mécaniques de la pièce dépendent essentiellement du mécanisme de liaison et donc de la puissance du laser. Ainsi, les trois principales catégories de technologies sont le frittage de poudre polymère par laser, la fusion de poudre

métallique par laser (Yap2015,Yap2016) et la fusion de poudre métallique par faisceau d'électron (Kok2016,Tan2016).

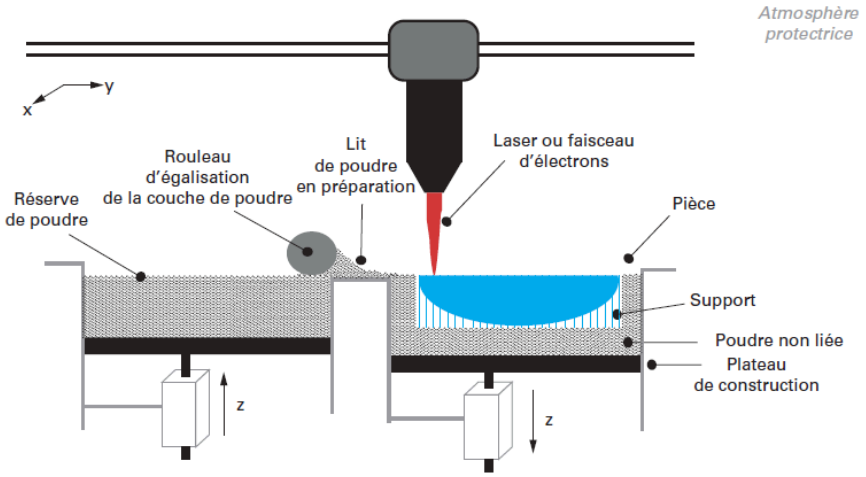


Figure 1.6 - Illustration du procédé de fusion sur lit de poudre (Laverne2016)

2.3.5. Extrusion de matière

Dans ce procédé de fabrication additive, la mise en forme de la matière s'effectue par l'extrusion de celle-ci à travers une buse pendant l'application d'une pression constante. Le matériau extrudé se dépose à une vitesse constante et se solidifie complètement sur le substrat après sa sortie de la buse. De plus, la couche de matière déposée (n+1) se lie avec la couche inférieure (n-1) afin que la pièce solide puisse se former tout au long du processus de fabrication. La figure 1.7 illustre le procédé d'extrusion de matière.

En ce jour, différents types de polymères peuvent être utilisés tel que l'ABS, Acrylonitrile styrène acrylate (ASA), le nylon 12, le polycarbonate (PC), le polyphénylsulfone (PPSF / PPSU), le polyétherimide (PEI ou ULTEM), l'acide polylactique (PLA) et le polyuréthane thermoplastique (TPU). Cette large gamme de matériaux permet ainsi d'obtenir des produits résistants à l'UV, biocompatibles, translucides ou encore résistants mécaniquement.

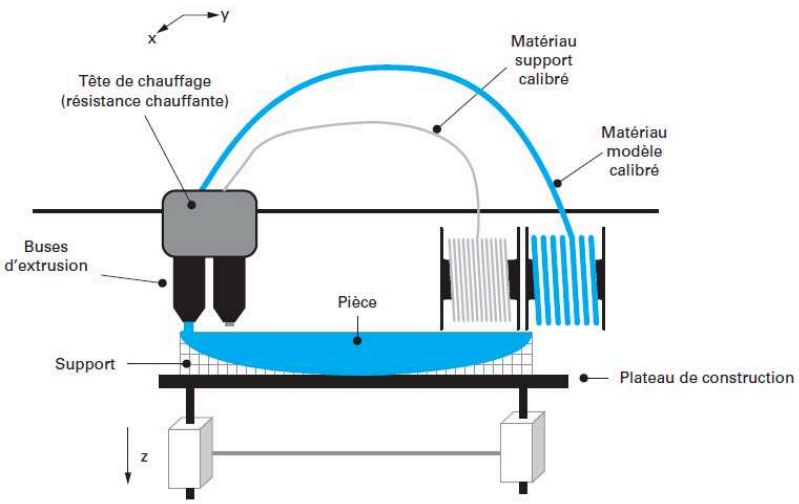


Figure 1.7 - Illustration du procédé d'extrusion de matière (Laverne2016)

2.3.6. Dépôt de matière sous énergie concentrée

Le principe de ce procédé repose sur la fusion d'une surface à l'aide d'une source d'énergie et sur l'apport simultané d'un jet de poudre ou d'un filament de matière dans cette zone en fusion, le tout en présence d'un gaz protecteur. La présence de matière support n'est pas nécessaire car le plateau de construction est déplacé suivant cinq axes à l'image de ce que l'on peut trouver sur les centres d'usinage. La précision des pièces obtenue est plus faible que celle obtenue avec les procédés de fusion sur lit de poudre avec une épaisseur de couche de l'ordre de 500 µm. Ce procédé permet entre autre de réaliser des matériaux à gradients de propriétés (Muller2013a,Muller2013b). La figure 1.8 illustre le procédé de dépôt de matière sous énergie concentrée.

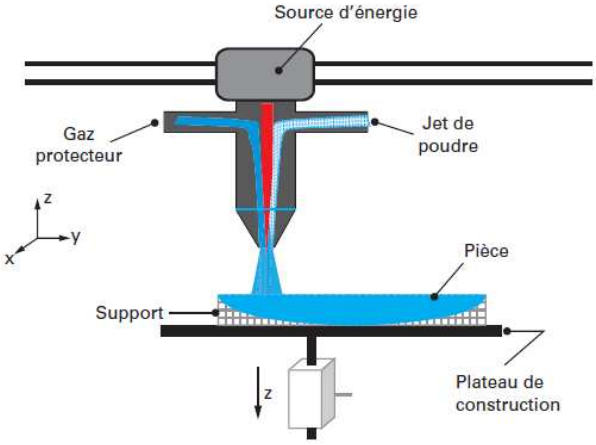


Figure 1.8 - Illustration du procédé de dépôt de matière sous énergie concentrée (Laverne2016)

2.3.7. Stratification de couche

La fabrication d'objets laminés (LOM) et la fabrication additive par ultrasons (UAM) sont les deux principales techniques de fabrication pour le procédé de stratification de couche dans lesquelles les feuilles de matériau sont respectivement découpées au laser ou combinées en utilisant des ultrasons (White2003). Chaque feuille de matériau peut être considérée comme l'une des couches transversales

de l'objet solide. La fabrication par ultrasons peut être considérée comme un procédé hybride comprenant le fraisage CNC et le soudage par ultrasons. La figure 1.9 illustre le procédé de stratification de couches.

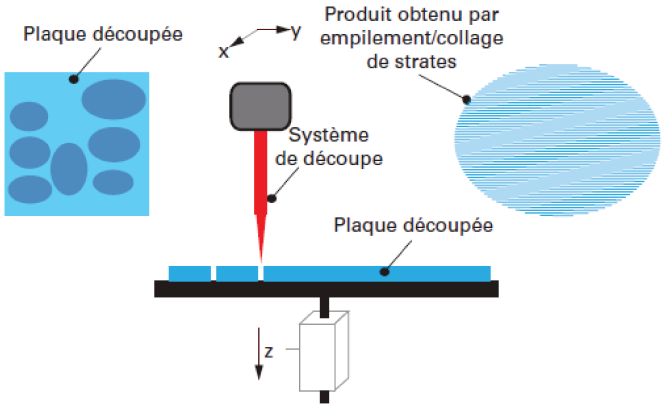


Figure 1.9 - Illustration du procédé de stratification de couches (Laverne2016)

2.4. Avantages et applications

La fabrication additive est utilisée pour trois catégories d'applications : les pièces prototypes, les pièces fonctionnelles et les outillages. Le prototypage fut une des premières applications pour ces procédés, aujourd'hui encore, ces types de pièces permettent de valider des concepts ou des conceptions. La fabrication de pièces fonctionnelles est plus récente par rapport au prototypage. Dans ce cas d'application, ces techniques sont particulièrement adaptées à la fabrication de pièces unitaires ou de petites séries possédant des formes complexes et présentent un fort intérêt dans un processus de personnalisation de masse. Enfin, la production d'outillage par fabrication additive permet d'améliorer les performances techniques ou environnementales en permettant la fabrication de canaux conformes dans les moules d'injection ou en augmentant la complexité des modèles (Kerbrat2010).

Ces trois catégories s'étendent à plusieurs domaines d'applications comme l'illustre la figure 1.10.

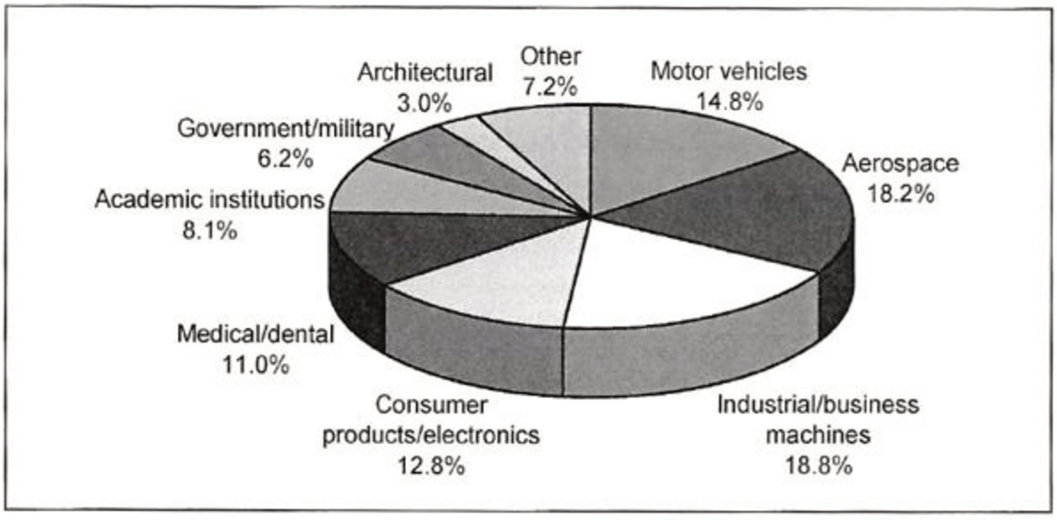


Figure 1.10 - Part relative d'utilisation de la fabrication additive par domaine (Wohlers2017)

Ces technologies permettent de couvrir un large spectre de domaines d'applications allant de de l'impression alimentaire (figure 1.11) à des domaines plus pointus tel que l'aéronautique ou le médical.

Figure 1.11 - Exemple de produit réalisé avec l'impression alimentaire

Le secteur aéronautique fait partie des secteurs qui utilisent le plus la fabrication additive. Certaines des normes de performances industrielles les plus exigeantes s'appliquent dans ce domaine, demandant aux pièces une résistance à des conditions extrêmes. La conception et la fabrication de plateformes aéronautiques militaires et commerciales nécessitent des composants aptes au vol, fabriqués à partir de matériaux performants. Parmi les applications courantes (figure 1.12), on peut trouver des circuits de conditionnement d'air, des composants intérieurs esthétiques personnalisés, des composants de moteurs de fusée, des revêtements de chambres de combustion, des outils pour les composites, des réservoirs d'huile et de carburant ainsi que des composants de drones.

(a) Charnière de frein de l'Airbus A380 (b) Prototype de pièce aéronautique de l'Airbus A380

Figure 1.12 - Exemple de pièces optimisées pour l'aéronautique.

La fabrication additive permet de produire des pièces complexes et consolidées avec une grande résistance. L'utilisation de moins de matériaux entraîne une baisse de masse, ce qui est important dans le secteur aéronautique. Les avantages de la fabrication additive au sein des grandes entreprises vont continuer de faire progresser des applications et conceptions innovantes dans l'univers de l'aéronautique.

L'industrie médicale, qui évolue rapidement, utilise des solutions de fabrication additive afin de fournir aux médecins, aux patients et aux établissements de recherche des percées majeures. Les fabricants dans le domaine médical utilisent la gamme complète de matériaux d'impression 3D biocompatibles

et hautement résistants, du rigide au flexible et de l'opaque au transparent, afin de personnaliser les différents modèles de produit.

Parmi les applications figurent les implants orthopédiques, les modèles pré-opératoires, des scies et des guides de forage sur-mesure, des boîtiers et des instruments spécialisés. Et aussi d'autres applications médicales telles que des chariots médicaux, des modèles anatomiques ainsi que des outils chirurgicaux personnalisés. Le développement de matériaux constitue également un élément essentiel de cette industrie. La figure 1.13 illustre un exemple d'utilisation de la fabrication additive dans ce domaine.

Figure 1.13 - Exemple d'illustration d'un implant crânien

Les domaines dans lesquels la fabrication additive se développe voient leur nombre d'applications augmenter d'années en années. Ce qui implique également une augmentation de la part d'utilisation de ces procédés dans le secteur industriel qui est passée première dans la part d'utilisation de ces procédés en 2016 (figure 1.10).

Les nombreux travaux qui ont été menés sur les procédés de fabrication additive ces dernières années montrent que ces procédés peuvent maintenant être considérés comme des technologies matures. L'acceptation technique de ces procédés est maintenant acquise, toutefois, des méthodes de conception adaptées à ces procédés doivent encore être développées afin d'en tirer plus d'avantages. **En revanche, l'acceptation sociale ne se fera que si l'empreinte environnementale et économique de ces technologies est connue. Par conséquent, il est nécessaire de connaitre les consommations et rejets liés à l'utilisation de ces procédés.**

3. Les aspects environnementaux des procédés de fabrications additive

3.1. L'industrie de mise en forme : Une hausse des ventes et de l'utilisation des procédés de fabrication additive

La fabrication additive est une innovation d'origine d'abord industrielle. Elle ne peut exister que grâce à la combinaison complexe de technologies de pointe, depuis les matériaux jusqu'aux machines, aux logiciels de conception et de production. Le développement rapide de ces procédés est en partie dû à la péremption de certains brevets. C'est pour ces raison, aujourd'hui, que l'on peut voir une croissance vertigineuse des possibilités offertes par ces procédés dans une multitude de domaines d'applications.

Le marché des concepteurs-fabricants se divise en deux grands blocs, l'un autour des procédés thermoplastiques, l'autre autour des procédés métalliques. Des grands fabricants de machines et de matériaux sont en train d'émerger, principalement aux Etats-Unis, en Allemagne et en Chine. L'évolution des ventes de machines métalliques est représentée sur la figure 1.14. Depuis les années 2000, les ventes de machines de fabrication additive ont tendance à augmenter de façon exponentielle ce qui tend à montrer l'intérêt grandissant des industriels pour ces technologies. Cette dynamique s'explique par les avancées considérables concernant ces procédés lors de ces dernières années (Wohlers2017).

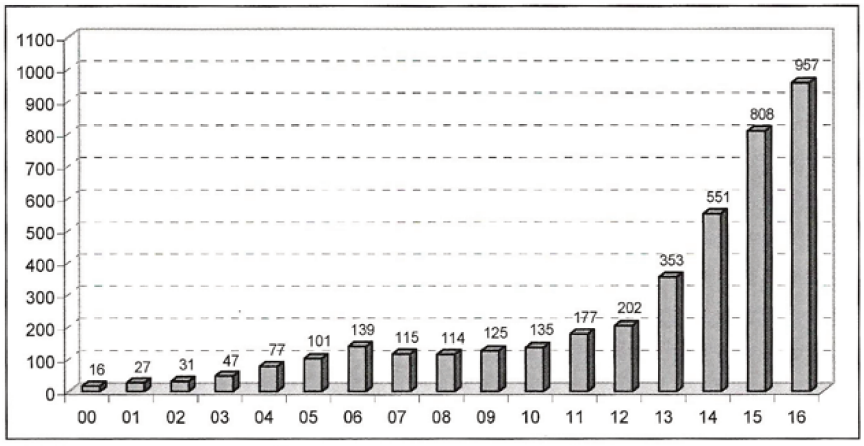


Figure 1.14 - Évolution des ventes de machines de fabrication additive métallique dans le monde depuis les années 2000 (Wohlers2017)

En 2007, la péremption du brevet lié à la technologie d'extrusion de matière a permis un développement des premières machines personnelles. C'est ainsi qu'en 2008 apparait le projet RepRap qui consiste à la fabrication d'une machine d'extrusion de matière low-cost capable d'imprimer la plupart de ses propres composants. L'objectif est de permettre aux entrepreneurs et aux petites entreprises de construire des produits complexes avec un investissement limité (< 500 dollars). Ce projet est totalement open source, par conséquent la totalité des composants ne sont protégés par aucun brevet. De cette manière, le nombre de ventes des machines d'extrusion de matière a très nettement augmenté. La figure 1.15 tend à montrer la démocratisation de ces technologies vis à vis du grand public avec une explosion des ventes depuis les années 2010.

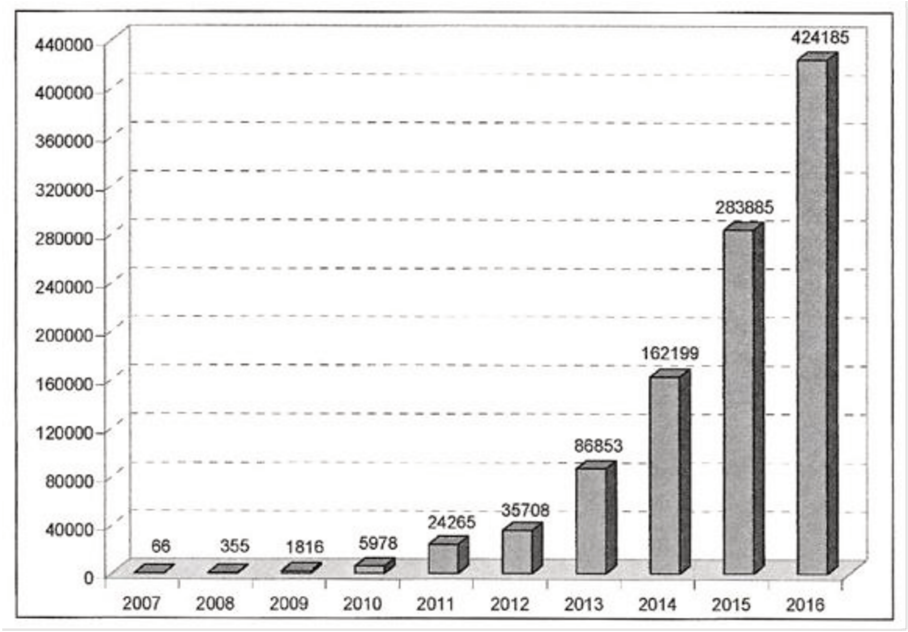


Figure 1.15 - Évolution des ventes d'imprimantes 3D personnelles depuis 2007 (Wohlers2017)

En 2015, plus de 30 000 machines de fabrication additive plastique ont été recensées dans le secteur industriel et plus de 500 pour les machines métalliques.

Finalement, l'augmentation du nombre de machines de fabrication additive dans le monde est due à deux phénomènes. La première est l'augmentation du nombre d'applications pour cette technologie, ce qui nécessite un développement technique de ces machines en amont afin que les pièces produites répondent aux exigences des différentes applications. La deuxième est la démocratisation de certains procédés pour le grand public, notamment pour le procédé d'extrusion de matière. Ce qui, comme nous avons pu le voir, engendre une forte augmentation des ventes.

L'évolution en hausse du nombre de ventes des machines dans le monde va forcément faire augmenter les consommations de matières et d'énergies liés à ces procédés. Un des moyens de contrôler cette consommation est de sensibiliser les utilisateurs, qu'ils soient des industriels ou des particuliers, aux phénomènes environnementaux intervenant pendant la fabrication d'un produit. Pour cela, il faut améliorer les connaissances autour de ces procédés d'un point de vue environnemental en proposant des méthodes d'analyse et des outils permettant de renseigner les bases de données (type Ecoinvent) existantes. **La méthode d'analyse environnementale scientifiquement reconnue est l'analyse de cycle de vie, c'est pourquoi la section suivante présente cette analyse.**

3.2. Analyse de cycle de vie

Dans cette section, nous proposons une brève présentation de l'outil d'analyse de cycle de vie normalisé afin de comprendre la démarche qui sera utilisé dans le cadre de cette thèse. Plus de détails sont disponibles sur cet outil dans la norme ISO 14040 (ISO2006).

L'évaluation de l'impact environnemental d'un produit est généralement réalisée à l'aide d'outil et de méthodes normalisées appelé Analyse de Cycle de Vie (ACV). Cet outil a initialement été normalisé suivant la norme ISO 14040 en 1997 (ISO1997) et mis à jour en 2006. La méthodologie associée à cet outil est de prendre en compte toutes les étapes du cycle de vie d'un produit depuis l'extraction des matières premières à la fin de vie. La normalisation de cet outil a été réalisée par deux organismes mondiaux, le PNUE - Programme des Nations Unies pour l'Environnement et le SETAC - Society of

Environmental Toxicology and Chemistry, qui proposent une décomposition en quatre étapes de l'analyse du cycle de vie (figure 1.16). Ces quatre étapes sont présentées dans la suite du manuscrit.

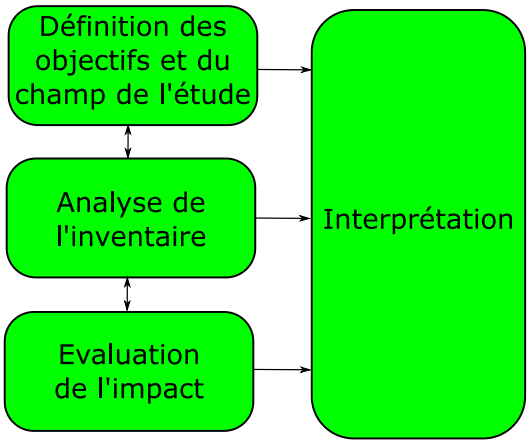


Figure 1.16 - Les quatre étapes d'une analyse de cycle de vie (ISO2006)

3.2.1. Définition des objectifs et du champ de l'étude

Cette première étape dans une ACV permet de définir les limites et les objectifs de l'étude. Les scénarios de la vie du produit y sont aussi définis. La norme ISO 14044 la définie comme "L'objectif d'une analyse du cycle de vie doit indiquer sans ambigüité l'application envisagée, les raisons conduisant à réaliser l'étude et le public concerné, c'est-à-dire les personnes auxquelles il est envisagé de communiquer les résultats de l'étude".

3.2.2. Analyse de l'inventaire

Cette étape permet de quantifier les consommations et rejets dans l'air, l'eau et les sols. Par exemple, pour un système de production il faudra comptabiliser l'énergie, la matière ainsi que l'ensemble des consommables nécessaires à la mise en forme du produit. Ceci correspond à l'inventaire des extractions auquel il faut ajouter l'inventaire des émissions.

3.2.3. Evaluation des impacts environnementaux

Cette étape permet de traduire l'ensemble des émissions et extractions en impacts environnementaux. Pour cela il est nécessaire, dans un premier temps, de classer les émissions et extractions dans des catégories d'impacts. Cette classification dépend de la méthode d'évaluation utilisée et il en existe un grand nombre.

3.2.4. Interprétation des résultats

Cette dernière étape de l'ACV consiste à interpréter les résultats obtenus. Cette étape est souvent confiée à des experts pour que les travaux menés lors de l'ACV soit validés. Elle permet entre autre de vérifier que les limites du système posées lors de la première étape (définition des objectifs et du champ de l'étude) sont correctement posées.

3.2.5. Synthèse

Lors d'une analyse de cycle de vie d'un produit, il est primordial de s'intéresser à l'ensemble des étapes intervenant dans la vie d'un produit. La connaissance fine de chacune de ces étapes permet de réaliser l'inventaire des flux les traversant. Cet inventaire est ensuite traduit en impact environnemental en utilisant une des nombreuses méthodes de quantification environnementale. La figure 1.17 illustre les étapes du cycle de vie d'un produit.

Figure 1.17 - Étapes du Cycle de Vie d'un produit

Dans la suite de ce manuscrit, nous nous focaliserons sur **l'analyse de l'inventaire** (deuxième étape de l'ACV) de **l'étape de fabrication** d'un produit. Ces travaux permettront d'alimenter les bases de données associées à cette étape qui sont encore insuffisamment renseignées pour les procédés de fabrication additive. L'analyse de l'inventaire est une étape bien souvent complexe à réaliser car un certain niveau d'expertise est requis lors de réalisation de celle-ci. Par exemple, dès lors qu'on s'intéresse à un produit réalisé par un procédé de fabrication additive, il faut identifier les sources de consommations et de rejets à prendre en compte pendant la fabrication du produit. Par conséquent, la maitrise du procédé de fabrication est nécessaire lors de l'analyse de l'inventaire de l'étape de fabrication d'un produit.

4. Synthèse et plan du manuscrit

Les procédés de fabrication tendent à se démocratiser dans le monde industriel ainsi que parmi le grand public. L'acceptation environnementale de ces procédés va nécessairement passer par la compréhension et l'intégration des connaissances des performances environnementales liées à ces procédés. Il est donc nécessaire de proposer des outils et des méthodologies permettant l'évaluation environnementale afin sensibiliser les industriels à ces enjeux.

Ces travaux de thèse ont pour objectif de proposer **une méthodologie globale permettant d'évaluer les données d'inventaires d'une pièce produite par fabrication additive**. La méthodologie prendra en compte **l'ensemble des flux consommés** lors de la phase de fabrication ainsi **que l'ensemble des étapes de production** d'une pièce.

Le deuxième chapitre de ce manuscrit sera consacré à la présentation de **l'état de l'art** des différentes méthodes d'évaluation d'un procédé de fabrication additive. Dans ce chapitre nous analyserons l'ensemble des méthodes permettant l'évaluation environnementale, technique et économique de ces procédés.

Dans le troisième chapitre nous présenterons **une méthodologie permettant d'évaluer les procédés de fabrication additive d'un point de vue environnemental, technique et économique**. Cette méthodologie a été développée pour répondre aux avec les verrous scientifiques soulevés dans le chapitre deux. Elle permet l'évaluation du couple pièce/procédé en prenant en compte l'ensemble des étapes de fabrication d'un produit ainsi que l'ensemble des flux entrants et sortants pendant la fabrication.

Dans le quatrième chapitre, nous appliquerons la méthodologie développée au procédé d'extrusion de matière et de projection de matière. Afin d'appliquer cette méthodologie nous proposerons une **modélisation complète de ces procédés de fabrication**. La modélisation a été réalisée à partir d'expérimentations et de modèles de comportement et de connaissances des machines.

Le cinquième chapitre de ce manuscrit présentera un exemple industriel sur lequel la méthodologie d'évaluation multicritère a été appliquée. Cette exemple permettra de présenter l'outil informatique développée pour évaluer le couple pièce/procédé d'un point de vue technico-économico-environnemental pendant l'étape de fabrication.

La **synthèse de ces travaux** et leurs **perspectives** seront exposées dans le sixième et dernier chapitre.

Chapitre 2 : Etat de l'art et problématiques scientifiques

Sommaire

1	Avant-propos	37
2	Analyse environnementale des procédés de fabrication additive	37
3	Analyse technique des procédés de fabrication additive	63
4	Analyse de coût des procédés de fabrication additive	66
5	Combinaison des données environnementales aux données techniquo-économiques	70
6	Synthèse de l'état de l'art et problématique de nos travaux	72

Dans le précédent chapitre, nous avons présenté l'intérêt de **caractériser les performances des procédés de fabrication additive d'un point de vue technique, économique et environnemental**. Ainsi dans le deuxième chapitre de ce manuscrit, nous allons proposer une **analyse de l'état de l'art des procédés de fabrication additive**, concernant l'analyse environnementale, l'avancée technique et le coût de fabrication de ces procédés. Cette analyse des travaux réalisée au sein de la communauté scientifique internationale est une étape essentielle au bon positionnement de nos travaux de recherche.

Dans une **première partie**, nous nous intéresserons aux travaux menés sur **l'analyse environnementale des procédés de fabrication additive**. Nous analyserons ainsi l'ensemble des méthodes permettant l'évaluation environnementale de ces procédés pendant les **différentes étapes de fabrication de pièces**.

Dans une **deuxième partie**, nous analyserons les travaux menés sur les **avancées techniques des procédés de fabrication additive** et plus particulièrement les différents moyens qui sont proposés dans la littérature permettant de **caractériser la qualité des produits** obtenus par fabrication additive.

La **troisième partie** sera consacrée à l'analyse des différents **modèles de coûts** disponibles dans la littérature ainsi que leur évolution au fil des années.

Enfin, en **quatrième partie**, nous analyserons les combinaisons existantes pour les procédés de fabrication additive et nous montrerons **l'intérêt de combiner l'évaluation environnementale d'un produit à des critères de qualité et de coût**.

A la suite de cet état de l'art, nous serons en mesure dans la **cinquième partie**, d'identifier les **verrous scientifiques** et ainsi nous pourrons **définir la problématique scientifique** qui sera traitée dans le cadre de cette thèse.

1. Avant-propos

Dans le chapitre précédent, nous avons pu voir que la fabrication additive est passée d'une technologie de prototypage rapide à un procédé de fabrication à part entière, offrant la possibilité aujourd'hui, la production de pièces fonctionnelles.

Les différents domaines d'application sont assez variés, en passant de domaines assez pointus tels que l'aérospatiale, l'automobile ou la santé à des domaines un peu plus généraux comme le commerce. L'évolution des cas d'application au sein de ces domaines est en constante progression, ce qui va surement permettre un changement des moyens de production dans le futur (Petrovic2009).

Les procédés de fabrication additive ont ainsi le potentiel de changer les chaines de fabrication industrielle, les business model et la relation pièce/utilisateur tout en produisant des pièces uniques et personnalisées grâce à leur capacité de fabriquer des pièces à géométrie complexe.

Cependant, l'analyse des performances environnementales des procédés de fabrication additive doit encore faire l'objet d'études approfondies afin d'avoir un degré de connaissance suffisant permettant l'amélioration ou l'optimisation de ces procédés.

2. Analyse environnementale

Les premières études environnementales sur les procédés de fabrication additive ont mis en avant, assez rapidement, les possibilités de gain en terme d'impact environnemental lors de l'utilisation de tels procédés (Kruth1998). Ces procédés sont une excellente option pour diminuer des impacts environnementaux générés pendant l'étape de fabrication d'un produit par rapport aux procédés conventionnels tels que l'usinage, la fonderie ou l'injection. En effet, l'utilisation de la quantité exacte de matière pendant la fabrication d'un produit en fait un bon candidat pour la maitrise de la consommation de matière première (Bourell2009).

Le nombre d'études sur l'analyse environnementale des procédés de fabrication additive a très largement augmenté depuis le début des années 2000 à nos jours (figure 2.1).

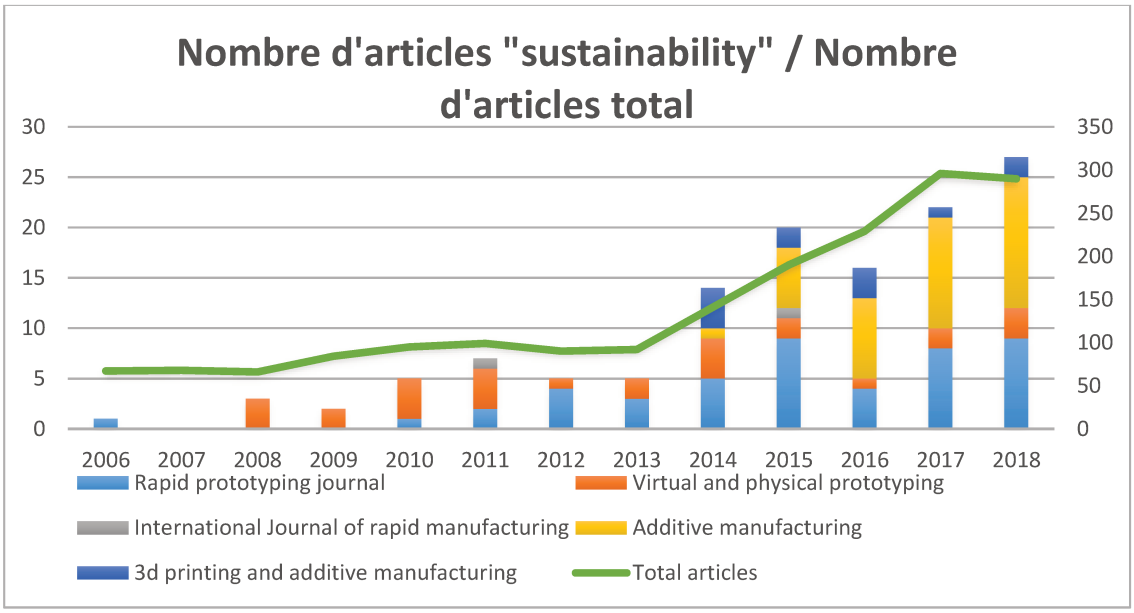


Figure 2.1 - Evolution du nombre d'articles concernant l'analyse environnementale des procédés de fabrication additive depuis 2006

Cette augmentation du nombre total d'articles dans les journaux scientifiques est essentiellement due à la croissance du nombre de papiers concernant l'analyse environnementale des procédés de fabrication additive.

Dans cette section, nous allons nous intéresser à l'ensemble des études traitant de l'analyse environnementale des procédés de fabrication additive sur l'ensemble de la chaine de fabrication d'un produit englobant la transformation de la matière première, l'étape de fabrication de la pièce et la finition. En effet, il y a très peu d'études qui prennent en compte l'ensemble des étapes de fabrication d'un produit. Ainsi, dans une première partie, nous nous intéresserons aux travaux menés sur les phénomènes environnementaux participant à la transformation de matière première en matière utilisable par le procédé. Puis nous nous focaliserons sur les études menées pendant l'étape de fabrication dans une deuxième partie et, enfin, sur la finition des pièces dans une troisième partie. Une fois l'analyse environnementale sur l'ensemble de la chaine de fabrication de ces procédés réalisée, nous nous intéresserons, dans la quatrième partie, à la modélisation de ces procédés. Puis à l'optimisation en cinquième partie. Pour finir, nous nous intéresserons à la comparaison des performances environnementales entre les procédés de fabrication additive et les procédés conventionnels.

La plupart des études disponibles dans la littérature se concentrent principalement sur la consommation d'énergie électrique pendant l'étape de fabrication d'un produit. Certaines études évaluent la consommation de matière et les émissions liées à ces procédés quand des données pertinentes sont disponibles dans la littérature.

2.1. Transformation de la matière première

La transformation de matière première en matériau utilisable par un procédé de fabrication additive est une étape importante à prendre en compte dans le cadre d'une analyse de cycle de vie complète. Ainsi, dans cette section, nous nous intéresserons aux travaux disponibles dans la littérature sur ces aspects.

Lors de l'analyse de l'état de l'art, nous n'avons trouvé que des travaux sur la production de poudre par atomisation. En effet, il n'y a rien actuellement sur la transformation d'autres matières telle que la transformation de granulés en bobine de fil plastique. Il parait donc intéressant de décrire le principe physique de l'atomisation de la poudre afin de comprendre la nature des impacts environnementaux générés pendant la transformation de la matière première.

L'atomisation de poudres est un moyen physique permettant de faire passer le matériau brut sous forme de lingot à l'état de poudre. Pour cela, un creuset est utilisé permettant de mettre en fusion le matériau considéré. Le matériau en fusion s'écoule à travers la buse et sous l'effet du jet de gaz à haute pression (nitrogène ou argon), le filet de matière en fusion est pulvérisé en fines gouttelettes. Les gouttelettes se solidifient et ainsi donnent la poudre. La matière sous forme de poudre est finalement récupérée dans la chambre de collecte. (Dawes2015). La figure 2.2 illustre une chambre d'atomisation de poudre pour les procédés de fabrication additive.

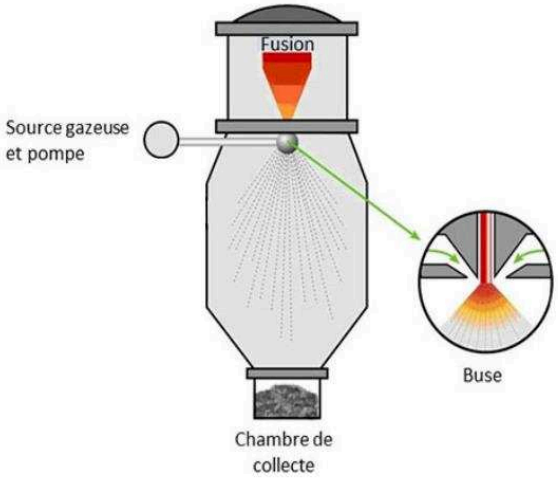


Figure 2.2 - Obtention de poudre métallique par atomisation gazeuse (Dawes2015)

Il existe différentes méthodes d'obtention des poudres que l'on peut classer selon le type d'obtention : par voie sèche ou par voie humide. Les poudres céramique et polymère peuvent être obtenues par un procédé d'agglomération séchage, tandis que pour les poudres métalliques, l'atomisation est obtenue par voie directe ou indirecte (Lagutkin2004,Zeoli2011). La figure 2.3 reprend les principales étapes de production de poudres par atomisation directe ou indirecte issue d'une étude menée par Morrow et al. (Morrow2007).

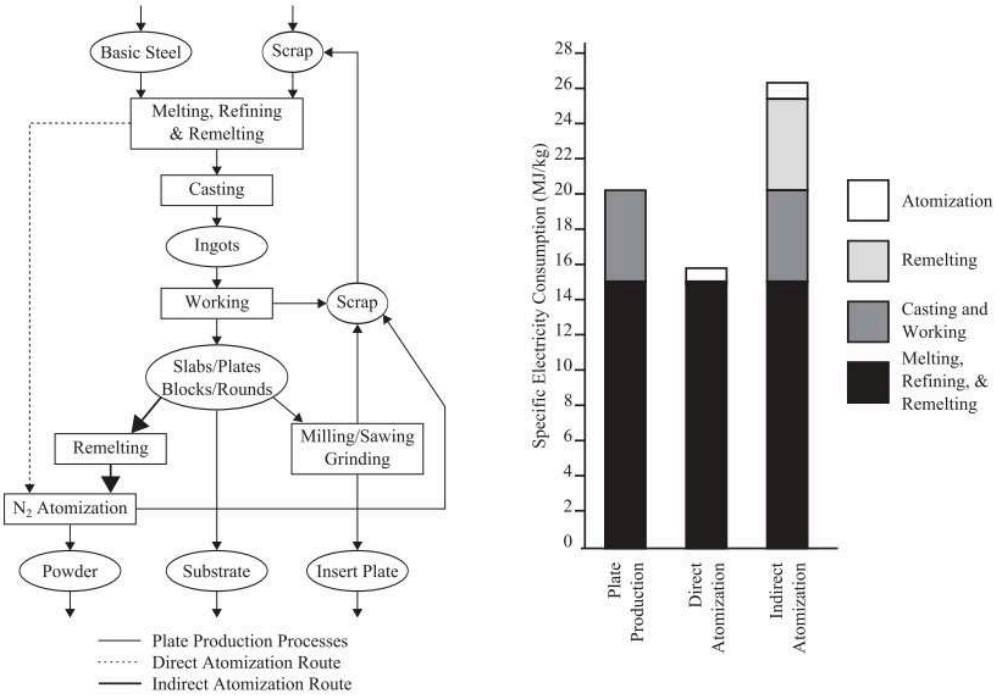


Figure 2.3 - Comparatif de production de matières premières par voie directe et indirecte (Morrow2007)

Morrow et al ont été en effet été les premiers à travailler sur la prise en compte des aspects environnementaux en s'intéressant à la consommation d'énergie électrique nécessaire à l'obtention d'un kilogramme d'acier H13 via atomisation. Ils estiment une consommation de 15,12 MJ/kg (4,2

kWh/kg) pour une atomisation par voie directe et 26 MJ/kg (7,2 kWh/kg) par voie indirecte (Morrow2007).

Serres et al. rapportent une consommation de 7,2 MJ/kg (2 kWh/kg) et de 0.18 mètre cube de gaz (argon) nécessaire à la production d'un kilogramme de Ti_6Al_4V (Serres2011). L'équipe de Baumers s'est également intéressée à la production de poudre de titane mais avec une matière première contenant 22% de titane recyclé (Baumers2017). Ainsi les auteurs estiment une consommation de 560,5 MJ/kg (155,7 kWh/kg). Sur ce même critère de consommation d'énergie électrique, l'équipe de Wilson estiment une énergie de 55,4 MJ/kg (15,4 kWh/kg) pour l'atomisation d'un kilogramme d'un superalliage à base nickel (Wilson2014). Plus récemment, Faludi et al se sont intéressés à l'atomisation d'un alliage d'aluminium (AlSi10mg) et estiment une consommation d'énergie de 8,3 MJ/kg (2,3 kWh/kg) (Faludi2017).

Le Bourhis et al vont plus loin dans la prise en compte des flux entrants et sortants lors de l'atomisation de verre métallique en quantifiant également une consommation liée aux fluides (LeBourhis2014). Ainsi, les auteurs estiment une consommation d'énergie de 14,4 MJ (4kWh), 7 mètre cube d'argon et 155 litres d'eau pour l'atomisation d'un kilogramme de verre métallique. Le tableau 2.1 présente un récapitulatif de la consommation énergétique liée à la transformation de la matière première par atomisation.

Quantité d'énergie nécessaire à la transformation d'1 kg de poudre	Matière	Auteurs
kWh/kg		
4,2-7,2	Acier H13	(Morrow2007)
2	Ti_6Al_4V	(Serres2011)
155,7	Titane	(Baumers2017)
15,4	Superalliage à base nickel	(Wilson2014)
2,3	Alliage d'aluminium	Faludi2017
4	Verre métallique	(Le Bourhis2014)

Tableau 2.1 - Consommation énergétique nécessaire à la transformation d'1kg de poudre pour différents matériaux.

Comme nous pouvons le constater, l'analyse environnementale de la transformation de matière première n'est pas suffisamment documentée à ce jour car la totalité des travaux sont focalisés sur le procédé de projection de poudre métallique. De plus, on retrouve des disparités entre les différentes valeurs du tableau qui sont bien souvent dues à des méthodes de calcul différentes.

2.2. Etapes de fabrication de la pièce

2.2.1. Consommation d'énergie électrique des procédés de fabrication additive

L'étude de l'évaluation de la performance environnementale des procédés de fabrication additive a commencé dans un premier temps par l'évaluation de la consommation d'énergie électrique pendant l'étape de fabrication d'une pièce.

Les premiers travaux menés sur les aspects énergétiques ont été réalisés par Luo et al. en 1999 (Luo1999a,Luo1999b). Dans leurs études, les auteurs s'intéressent à la consommation d'énergie électrique de trois procédés, dont quatre machines d'extrusion de matière, deux machines de frittage

sélectif par laser et trois machines de photopolymérisation. C'est à cette époque que les auteurs introduisent l'indicateur du « specifique energy consumption » (SEC) qui permet ainsi d'exprimer une consommation d'énergie électrique par kilogramme de matière produite (kWh/kg). Ils utilisent ensuite l'éco-indicateur 95 afin de traduire de cette consommation énergétique en impact environnemental exprimé en milli-points (mPts). L'utilisation de cette méthode d'analyse environnementale permet de comparer les procédés entre eux et donc les matériaux plastiques, type ABS, avec les résines utilisées dans le procédé de photopolymérisation en cuve.

Cette méthode d'analyse environnementale a été également reprise par Sreenivasan et Bourell (Sreenivasan2009). Les auteurs s'intéressent à la consommation d'énergie électrique pour une machine de frittage sélectif par laser en décomposant la machine étudiée en entités mécaniques. Ils attribuent ainsi une valeur de puissance moyenne pour chaque entité. La figure 2.4 montre la décomposition réalisée par les auteurs.

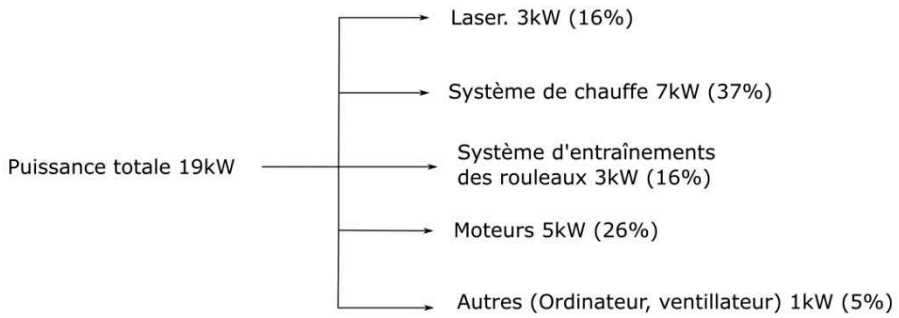


Figure 2.4 - Décomposition du procédé en entité mécanique (Sreenivasan2009)

Les études citées précédemment s'intéressent à la consommation d'énergie électrique des procédés de fabrication additive en ne considérant que la machine. Or la consommation d'énergie électrique est sensible à la pièce produite ainsi qu'aux paramètres machines utilisés, on peut alors parler de process. Dans cette optique, des travaux ont été réalisés en considérant l'influence de la géométrie de la pièce et des paramètres de fabrication sur la consommation d'énergie électrique.

Une des premières études prenant en compte le couple pièce-procédé afin de déterminer la consommation d'énergie électrique de la machine a été proposée par Mognol et al. de l'Institut de Recherche en Génie civil et Mécanique (à l'époque à l'Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes). Ainsi, ils ont étudié l'influence de l'orientation de fabrication sur la consommation d'énergie électrique de trois procédés de fabrication additive, dont une machine de projection de matière, une machine d'extrusion de matière et une machine de fusion sur lit de poudre (Mognol2006).

La figure 2.5 illustre les différentes orientations de la pièce prises en compte dans le cadre de cette étude. Ces travaux permettent de mettre en avant l'influence non négligeable de l'orientation d'une pièce sur la consommation du procédé. Cette influence est majoritairement due au temps de fabrication qui est fortement dépendant de la hauteur à fabriquer. Par conséquent, plus une pièce est haute, plus la consommation énergétique de la machine est importante.

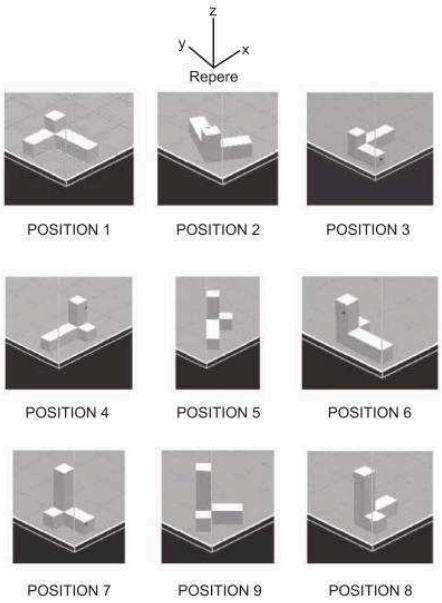


Figure 2.5 - Les différentes orientations de la pièce étudiée (Mognol2006)

Les auteurs mettent également en avant le fait que les puissances en jeux pendant la fabrication de la pièce pour les trois procédés de fabrication additive étudiés sont approximativement constantes. En prenant en compte cet aspect, ils concluent que le temps total de fabrication doit être réduit afin de minimiser la consommation d'énergie électrique. Un des moyens proposé est de diminuer la hauteur de la pièce pour les pièces réalisées en projection de matière et en fusion sur lit de poudre. Pour l'extrusion de matière, le volume de support utilisé doit être minimisé.

Verma et Rai ont également travaillé sur l'influence de l'orientation de la pièce sur la consommation d'énergie totale. En effet, les auteurs ont mis en place dans cette étude un outil (figure 2.6) permettant de déterminer la meilleure orientation et hauteur de couche d'une pièce afin d'optimiser un produit d'un point de vue environnemental (Verma2013). De plus, cet outil dispose d'une double boucle d'optimisations permettant de proposer des positionnements de pièce dans l'espace machine minimisant la consommation d'énergie électrique et la consommation de matière.

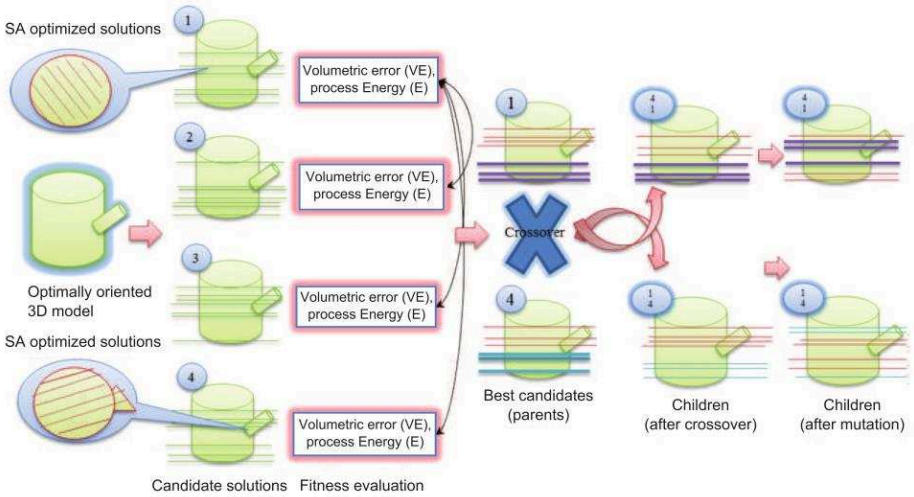


Figure 2.6 - Génération de solutions de candidats et application de l'opérateur de variation sur un échantillon de pièce 3D (Verma2013)

Par la suite, l'équipe de Baumers a étudié l'influence du remplissage de l'espace machine et de la géométrie de la pièce et sur la consommation d'énergie électrique de la machine (Baumers2010,Baumers2011). Dans leurs travaux ils analysent la consommation énergétique d'une machine de frittage sélectif par laser et une machine de fusion par faisceau d'électrons.

La pièce utilisée dans leur étude est présentée sur la figure 2.7. La géométrie de cette pièce a été choisie afin de faire varier les rapports section/volume et périmètre/section et d'analyser l'influence de ces rapports sur la consommation énergétique. De plus, la pièce ayant une empreinte relativement grande en X/Y et beaucoup plus faible en hauteur, l'expérimentation était plus facile à réaliser.

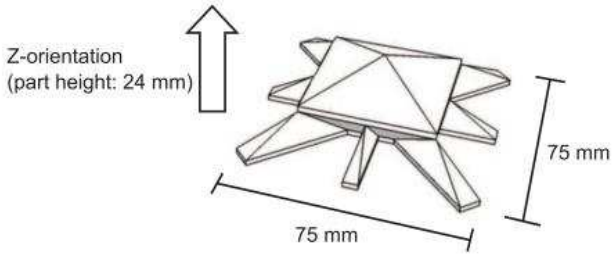


Figure 2.7 - Géométrie normalisée de contrôle de puissance (Baumers2010)

En analysant l'influence du remplissage de l'espace machine (Figure 2.8) sur la consommation énergétique, ils montrent que cette consommation n'est pas proportionnelle au nombre de pièces à produire. En revanche, ils observent une diminution du SEC lorsque plusieurs pièces sont fabriquées en même temps. Cette diminution est due au fait que la phase de chauffe de la machine est réalisée une seule fois pour toutes les pièces à fabriquer. Ainsi, les auteurs concluent que dans une optique d'optimisation du procédé d'un point de vue environnemental, l'utilisation de l'ensemble de l'espace de la machine est à préconiser.

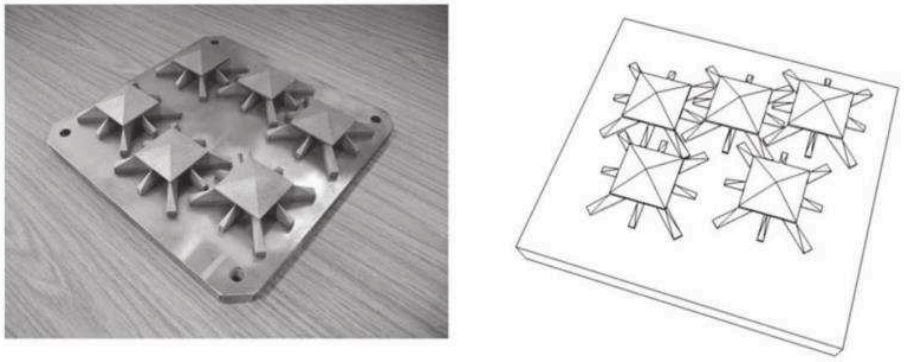


Figure 2.8 - Configuration de remplissage maximal de l'espace de travail dans le cas de la fusion sélective par laser (à gauche) et de la fusion par faisceau d'électrons (à droite) (Baumers2011)

Balogun et al ont mis en avant ce phénomène de diminution de la consommation énergétique totale lors d'une étude sur trois machines d'extrusion de matière (Balogun2014). En effet, ils décomposent le procédé étudié en quatre phases de fabrication et s'intéressent à la consommation d'énergie électrique de ces quatre phases pour une première pièce fabriquée lorsque la machine est à la température de l'atelier et pour une seconde pièce fabriquée cinq minutes après la première (donc avec une machine déjà « chaude »). Les auteurs observent ainsi logiquement une nette diminution de la consommation énergétique en phase de chauffe pour la deuxième pièce (Figure 2.9).

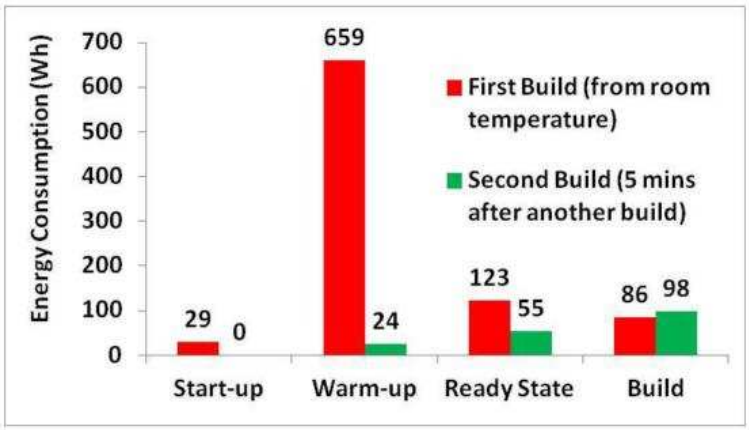


Figure 2.9 - Consommation énergétique des quatre phases de fabrication pour une fabrication machine froide (rouge) et une à la suite (Vert) (Balogun2014)

Sur ce même critère de remplissage de l'espace machine, Junk et Coté ont réalisé une étude sur une machine de projection de liant (Junk2013). Ils ont également étudié l'influence du positionnement d'une pièce dans l'espace machine sur la consommation énergétique (Figure 2.10). Les auteurs observent un écart de 5.5 % entre la valeur minimale et maximale. Ils concluent ainsi que le positionnement de la pièce dans l'espace machine à une plus faible influence sur la consommation énergétique totale par rapport à la hauteur d'une pièce. Cette analyse et celle de Baumers et al. rejoignent celle faite par Mognol et al. sur le fait que la consommation énergétique est fortement et majoritairement dépendante de la hauteur à fabriquer.

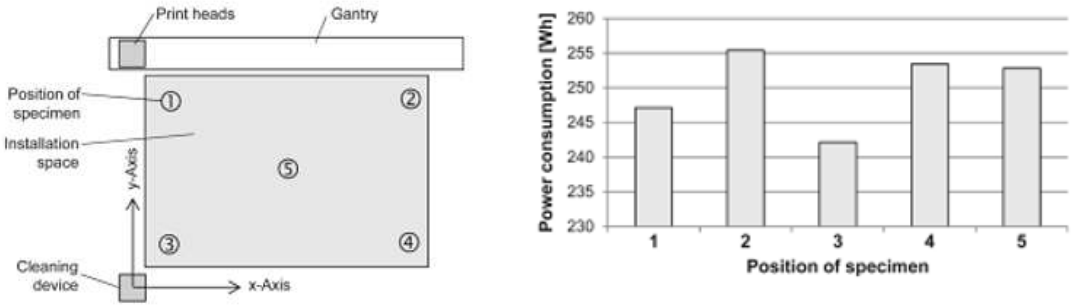


Figure 2.10 - Consommation énergétique en fonction des différentes positions dans l'espace machine (Junk2013)

Les travaux réalisés par Mognol, Baumers et Junk sont très intéressants car ils mettent en lumière l'importance de la prise en compte du couple pièce/procédé dans le cadre d'une analyse de la consommation d'énergie électrique des procédés de fabrication additive.

2.2.2. Extension des flux élémentaires pour l'analyse environnementale des procédés de fabrication additive

Les auteurs cités dans la section précédente se sont essentiellement intéressés à la consommation d'énergie électrique des procédés de fabrication additive. Cette seule donnée, bien que très importante, n'est pas suffisante si l'on s'intéresse à l'analyse de cycle de vie complète d'un produit. En effet, la présentation des résultats sous forme d'impact environnemental en utilisant seulement la consommation d'énergie électrique d'un procédé n'est pas pertinente étant donné qu'il existe d'autres

sources de consommations et rejets pendant la fabrication d'un produit tel que les matériaux, les fluides et les émissions de particules.

En ce sens, on observe depuis maintenant quelques années une extension des flux élémentaires pris en compte pendant la fabrication d'un produit pour les procédés de fabrication additive dans la littérature.

C'est ainsi que l'équipe de Kellens de l'Université Catholique de Louvain a développé une méthodologie (Unit Process Life Cycle Inventory, UPLCI) qui permet de prendre en compte l'ensemble des flux de consommation et de rejet en phase de production (Kellens2012). Cette méthodologie a été développée avec l'initiative européenne CO2PE ! et permet de documenter, d'analyser et d'améliorer la connaissance des procédés de fabrication (figure 2.11). La connaissance issue de cette méthodologie permet d'alimenter, par la suite, les bases de données d'ACV en proposant des modèles d'impacts environnementaux associés à ces procédés de fabrication.

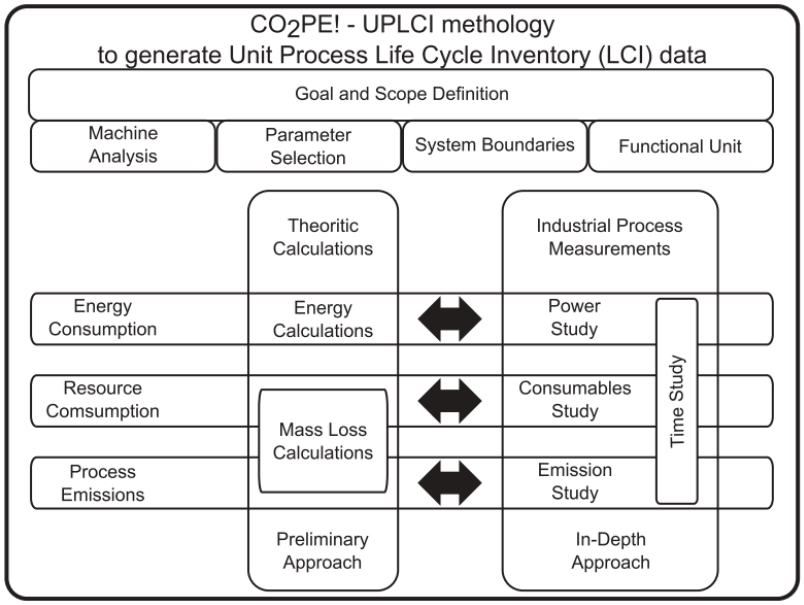


Figure 2.11 - Méthodologie UPLCI associée à l'initiative CO2PE! (Kellens2012)

Ils proposent dans une étude une évaluation d'un point de vue environnemental pour des machines de frittage sélectif par laser et fusion sélective par laser en appliquant la méthodologie UPLCI (Kellens2010,Kellens2011,Duflou2011). Cette méthodologie prend en compte plusieurs flux entrants et sortants traversant le système étudié. Ils analysent ainsi la consommation d'énergie électrique, d'air comprimé, de matériaux, en prenant en compte l'impact environnemental dû à l'atomisation et à la valorisation, et le temps de fabrication (Figure 2.12). La collecte de données étant réalisée soit par des méthodes empiriques soit par des méthodes théoriques, il est nécessaire d'avoir une méthode permettant d'agglomérer et d'uniformiser l'ensemble de ces données afin de les rendre exploitables par la suite. C'est donc ce qu'a développé Kellens pendant ses travaux de thèse (Kellens2013).

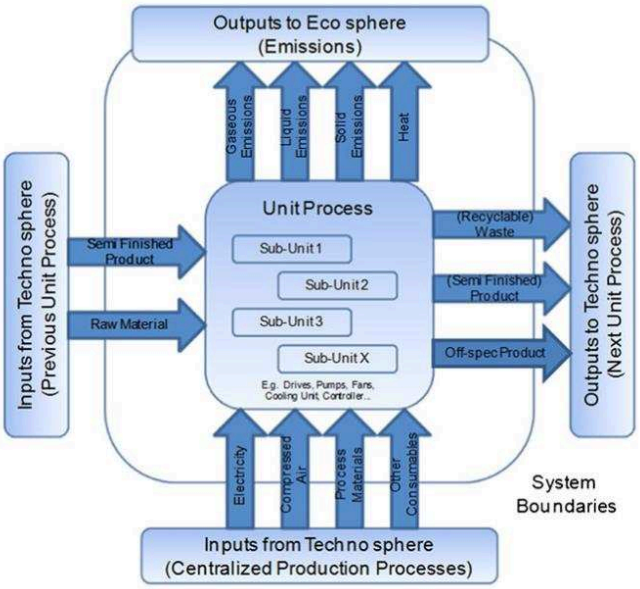


Figure 2.12 - Flux entrants et sortants pris en compte dans la méthodologie UPLCI (Kellens2012)

En complément, Le Bourhis et al. proposent une méthodologie d'évaluation environnementale du procédé de projection de poudre métallique en prenant en compte l'atomisation de la poudre, la consommation d'énergie, de matière, de fluide et s'intéressent également au recyclage de la poudre perdue (Le Bourhis2013). Les auteurs réalisent ainsi une modélisation du procédé permettant de lier le modèle numérique de la pièce aux impact environnementaux. La méthodologie développée pendant ses travaux de thèse est illustrée figure 2.13.

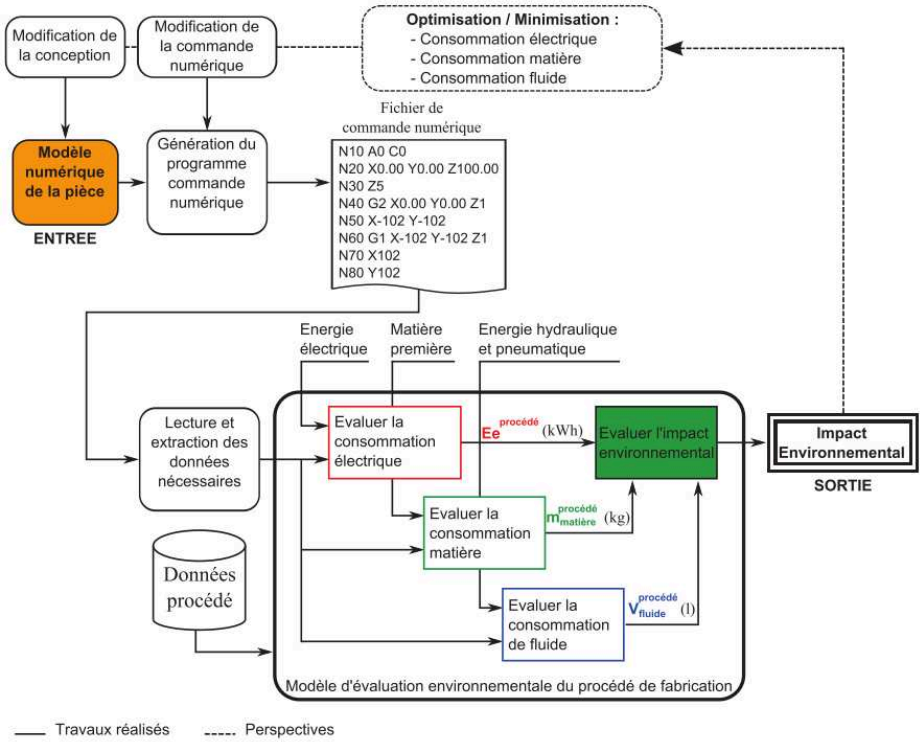


Figure 2.13 - Méthodologie d'évaluation et de caractérisation d'une machine de projection de poudre métallique (Bourhis2013)

Les études réalisées par Kellens et Le Bourhis montrent que les analyses environnementales des procédés de fabrication additive tendent à être de plus en plus exhaustives. En effet, seule la consommation d'énergie électrique était prise en compte dans les premières études d'évaluation environnementale d'un procédé de fabrication. De nos jours, de plus en plus d'auteurs s'intéressent aux autres sources de consommations et rejets telles que la matière et les fluides.

En revanche, l'évaluation des émissions de particules est une source de rejet qui est très peu étudiée dans la littérature. Kellens prend en compte les rejets liés aux particules fines des procédés de fabrication dans sa méthodologie mais les données qu'il intègre dans ses études sont issues de la littérature. Etant donné qu'il y'a relativement très peu de travaux sur cette source de rejet de façon globale, on trouve parfois très peu, **voire aucune donnée**, pour les procédés de fabrication additive rendant l'intégration des émissions de particules fines dans une analyse de cycle de vie complète impossible.

On trouve tout de même quelques travaux concernant les émissions de particules fines du procédé d'extrusion de matière. Stephens et al. ont étudié les émissions de particules fines de deux machines d'extrusion de matière bas coût dont une est équipée en matériau ABS et l'autre en PLA (Stephens2013). Le taux d'émission par minute va jusqu'à 1.9×10^{11} pour la machine équipée de matériau ABS et 2.0×10^{10} pour la machine équipée de matériau PLA. Les auteurs concluent que les deux machines étudiées peuvent être catégorisées comme des systèmes à fortes émissions. Cependant, ils indiquent que des expériences plus contrôlées doivent être menées pour évaluer les émissions de particules fines des procédés de fabrication additive pendant l'étape de fabrication d'un produit avec plus de précision.

Deng et al ont étudié l'influence des différentes phases de fabrication d'un produit sur le taux d'émissions des particules pour une machine d'extrusion de matière ABS (Deng *et al.*, 2016). Les auteurs montrent que la source principale d'émissions pour ce procédé est due à la chauffe des composants (tête et plateau).

L'analyse des émissions de particules fines pendant l'étape de fabrication d'une pièce est un phénomène très peu étudié dans la littérature. D'autres études doivent encore être réalisées afin d'évaluer notamment les risques encourus par un utilisateur. Le tableau 2.2 résume l'ensemble des études s'intéressant à la consommation électrique de ces procédés. Dans ce tableau, cinq technologies de machine ont été étudiées.

On peut remarquer qu'il y a des disparités au sein d'un même procédé. Ces larges écarts sont dus au cas d'étude qui est diffèrent d'un article à un autre et également les paramètres de fabrication qui ne sont pas les mêmes en fonction des machines utilisées. Mais ces écarts sont principalement dus aux démarches de mesures. Par exemple pour l'extrusion de matière, l'équipe de Mognol s'est intéressée à la consommation d'énergie électrique du bac à ultrason permettant l'enlèvement de la matière support. Ainsi cette valeur de consommation énergétique nécessaire à la finition de la pièce est prise en compte en plus de l'énergie nécessaire à la fabrication de la pièce.

Par conséquent, il est difficile de conclure sur la machine qui aura la plus faible consommation d'énergie électrique si on s'intéresse à la fabrication d'une pièce de géométrie complexe. Il n'est donc pas possible de faire un choix de procédé d'un point de vue environnemental avec cette façon de présenter les résultats.

Process categories	AM technology	Machine	Material	Specific energy consumption (kWh/kg)	Reference
Material extrusion	FDM	FDM 1650	ABS	346	(Luo1999)
		FDM 2000		116	
		FDM 8000		23	
		FDM Quantum		164	
		FDM 3000		697	(Mognol2006)
		Dimension SST 1200 es		47.6 – 60.8	(Junk2012)
		FDM 400 mc	Polycarbonate	149	(Baumers2010)
		Dimension SST 768	ABS P400	191,3	(Yoon2014)
VAT photopolymerization	SLA	SLA - 250	epoxy resin	33	(Luo1999)
		SLA - 3000		41	
		SLA - 5000		21	
Binder jetting	CJP	Z printer	ABS	14.5 – 17.2	(Junk2012)
Powder bed fusion	SLS	EOSINT M270	Stainless steel	114	(Baumers2010)
		EOSINT M250	metal powder (bronze + Ni)	710	(Mognol2006)
		EOSINT P390	PA 12	1346	(Baumers2010)
		Vanguard HiQ		15	(Sreenivasan2009)
		Sinterstation DTM 2000		40	(Luo1999)
		Sinterstation DTM 2500		30	
		EOSINT pP760	PA 2200 (0,12 mm)	39	(Kellens2010)
			PA 2200 (0,15 mm)	40	
	SLM	MTT, SLM 250	Stainless steel 316L	31	(Baumers2010)
		M3 linear		164	
	EBM	Arcam A1	T1 -6Al -4V	50	
Directed energy deposition	LENS	Huron kX8	metal powder	24.2	(Le Bourhis2014)
		Optomec lens 750	Stainless steel 316L	385	(Wilson2014)

Tableau 2.2 - Tableau comparatif des machines de fabrication additive d’une point de vue environnemental (Yosofi2018a)

2.3. Finition

La finition des pièces fabriquées par fabrication additive est très souvent sous-estimée ou négligée dans la littérature. Cependant, la finition d'un produit est primordiale afin respecter les tolérances géométriques et d'obtenir l'état de surface désiré. D'un point de vue environnemental, la finition des pièces demande beaucoup d'énergie afin de retirer les structures de support ou de couper la plaque sur laquelle sont construites les pièces. Par conséquent, cette phase de finition n'est pas à négliger dans le cadre d'une analyse exhaustive du couple pièce/procédé d'un point de vue environnemental.

En plus d'avoir étudié l'influence de l'orientation d'une pièce, Mognol et al. ont également quantifié la quantité d'énergie nécessaire à l'enlèvement de la matière support des pièces réalisées en extrusion de matière (Mognol2006). Les pièces sont trempées dans un bac à ultrason contenant une eau à 70°C pendant huit heures. Les auteurs considèrent une puissance fixe de l'appareil égale à 0.5kW pendant toute la durée de l'opération de nettoyage (figure 2.14). Ainsi, ils ne prennent pas en compte la montée en température de l'eau, ni les variations de puissance de l'appareil au cours du temps. Pour une durée de huit heures les auteurs estiment une énergie de 4 kWh pour l'enlèvement de la matière support.

Figure 2.14 - Relevé de la puissance consommée dans le bac à ultrason (Mognol2006)

Junk et al. ont étudié la consommation énergétique d'une valve (figure 2.15) réalisée par une machine d'extrusion de matière et de projection de liant en prenant en compte la finition de la pièce (Junk2012).

Figure 2.15 - Pièce étudiée dans les travaux de Junk (Junk2012)

La pièce réalisée par extrusion de matière est déposée dans une solution alcaline à 70°C pendant plusieurs heures. La température de la solution met une heure à atteindre la température de consigne (70°C) et atteint pendant cette période un pic de consommation. Dans le cadre de ces travaux, la consommation de la phase de fabrication du produit est prépondérante sur la phase de finition en raison du temps de fabrication de la pièce qui est assez conséquent (huit heures). En revanche, pour

des volumes de pièces plus petites nécessitant une finition, la phase de finition sera alors plus énergivore. La figure 2.16 montre la courbe de puissance d'un process global d'extrusion de matière. La phase 1 correspond à l'étape de préparation avec la chauffe du plateau (1) et de la tête (2). Pendant la phase 2, la pièce est mise en forme (3). Enfin la phase 3 représente la finition de la pièce avec la chauffe de l'appareil (4) puis le maintien en température (5).

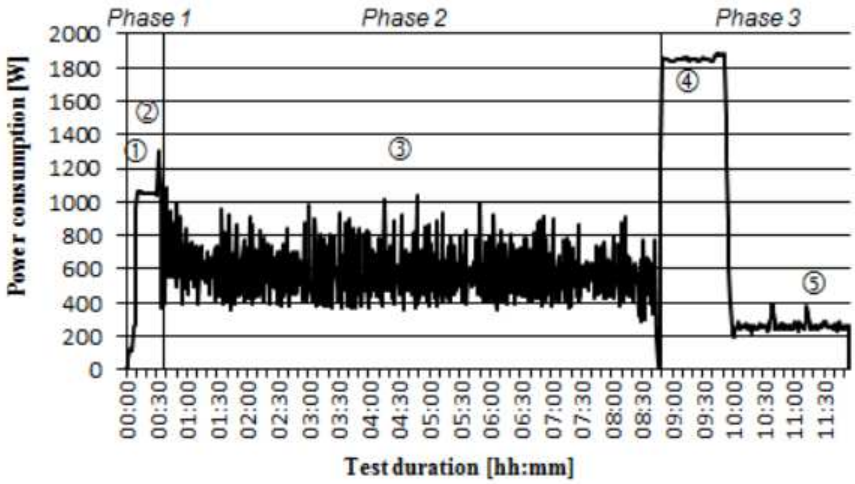


Figure 2.16 - Courbe de puissance de la machine d'extrusion de matière (Junk2012)

La finition du produit réalisé par la machine de projection de liant contient plus d'opérations nécessitant l'intervention d'un opérateur. En effet, à la fin de la construction (3), la poudre qui n'a pas été utilisée pendant la fabrication est évacuée de la chambre de pression par aspiration (4). Les pièces fabriquées sont ensuite laissées dans la machine pendant un peu plus d'une heure afin de sécher (5). Enfin, lorsque les pièces sont retirées de la machine, le résidu de poudre aggloméré autour des pièces doit être siphonné manuellement au moyen d'un jet d'air (6 et 7). Dans ce cas, la consommation énergétique de la phase de finition représente 52% de la consommation totale. La figure 2.17 montre la courbe de puissance d'un process global de projection de liant.

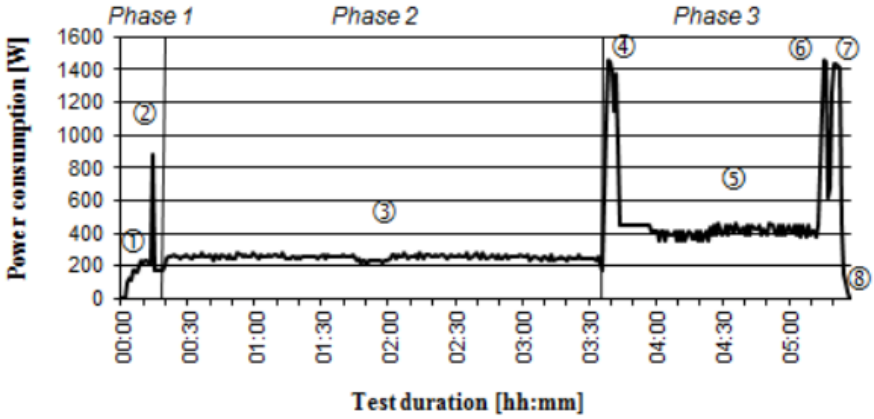


Figure 2.17 - Courbe de puissance de la machine de projection de liant (Junk2012)

Les études menées par Mognol et al. et Junk et al. mettent en avant l'importance de la prise en compte de la phase de finition d'un produit lorsque l'on s'intéresse à la fabrication d'un produit.

Balogun et al. ont également étudié la finition de pièces réalisées en extrusion de matière en utilisant la même méthode que Mognol pour enlever la matière support (Balogun2015). Dans leurs travaux, la

phase de finition pour le cas d'étude dure une heure. Ainsi les auteurs relèvent une puissance moyenne d'approximativement 250 W pendant toute la durée des opérations donc une énergie totale de 0.25 kWh. Cette plus faible valeur par rapport au travaux de Mognol s'explique par le fait que l'appareil d'enlèvement de support est moins énergivore et utilisé pendant peu de temps (une heure contre huit).

La finition des pièces dans un bain dissolvant de matière support fait partie du cycle de production d'une pièce en extrusion de matière. Ces bacs sont généralement commercialisés en même temps que la machine. Etant donné que pour ces procédés, cette phase est essentielle à la bonne réalisation du produit, il est indispensable de prendre en compte les consommations et rejets pendant cette phase.

Dans d'autre cas, il est nécessaire d'avoir recours à un autre procédé de fabrication pour réaliser la finition des pièces faites par fabrication additive. Baumers et al. se positionnent dans cette approche en utilisant le procédé d'électroérosion par fil pour séparer la base des pièces réalisées par le procédé de fusion sur lit de poudre (Baumers2013). Des pièces de géométries différentes sont conçues et positionnées dans l'espace machine afin que la plateforme de fabrication soit entièrement remplie. La figure 2.18 illustre le remplissage de l'espace machine. Les auteurs mesurent une énergie totale de 39.6 kWh pour enlever la totalité de la base de leurs pièces. Cette valeur est nettement plus élevée par rapport aux valeurs obtenue par Mognol et Balogun en raison de l'utilisation d'un process de finition adapté à la réalisation de pièces métalliques.

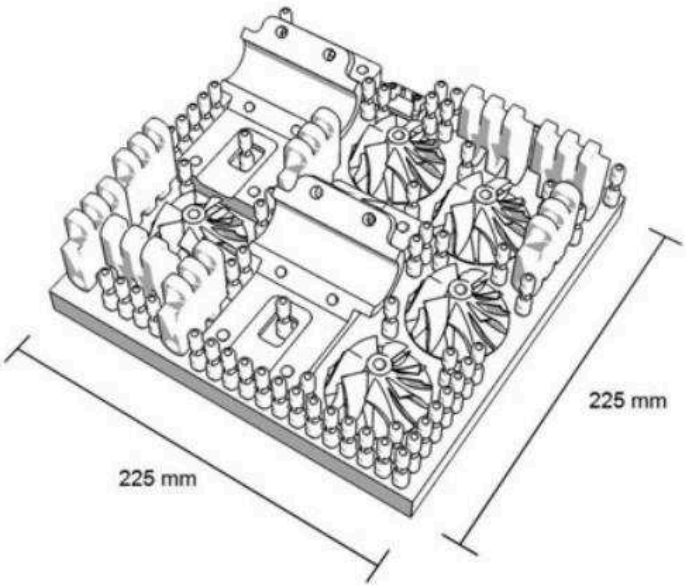


Figure 2.18 - Espace de fabrication (Baumers2013)

Nous pouvons remarquer que les travaux sur la finition des produits réalisés par fabrication additive sont peu nombreux dans la littérature. Cette phase de finition est pourtant primordiale dans le cycle de fabrication d'une pièce. En effet elle permet d'obtenir l'état de surface et les tolérances géométriques désirés.

D'un point de vue environnemental, cette phase n'est pas à négliger comme ont pu le montrer les auteurs cités ci-dessus. En effet dans certains cas, la consommation d'énergie électrique en phase de finition peut être prépondérante sur les autres phases. Le tableau 2.3 présente un récapitulatif de la consommation énergétique liée à la finition des pièces réalisés par fabrication additive.

Quantité d'énergie nécessaire à la finition **kWh**	Matière	Procédé	Auteurs
4	Plastique	Extrusion de matière	(Mognol2006)
0,25	Plastique	Extrusion de matière	(Balogun2015)
39.6	Métal	Fusion sur lit de poudre	(Baumers2013)

Tableau 2.3 - Consommation d'énergie liée à la finition des pièces

L'essentiel des travaux sur la finition des produits réalisés par fabrication additive étant basé sur la consommation d'énergie électrique, il parait intéressant d'étendre les processus élémentaires pris en compte dans cette étape, comme ont pu le faire certains auteurs pendant l'étape de fabrication de la pièce, en s'intéressant également aux consommations et rejets lié à la matière et aux fluides.

Lors de la deuxième étape d'une ACV, l'analyse de l'inventaire d'un produit doit être réalisée sur l'ensemble de son cycle de vie de façon exhaustive. Or, on remarque dans la littérature que l'analyse de l'inventaire pendant l'étape de fabrication d'un produit est focalisée sur l'étape de mise en forme du produit. En effet, les données sur les autres étapes de fabrication telles que la transformation de la matière première et la finition sont moins étudiées et donc moins complètes. On retrouve, par exemple, pour la transformation de la matière première, des données uniquement sur l'atomisation de poudre métallique. Par conséquent, **il est essentiel de réaliser l'analyse de l'inventaire de l'ensemble des étapes du cycle de production d'une pièce**.

De plus, la majorité des études sont portées sur la consommation d'énergie électrique, or d'autres flux de consommation et de rejets tel que la matière et les fluides traversent également l'étape de fabrication d'un produit. **Il est donc nécessaire de s'intéresser à l'ensemble des flux entrants et sortants lors du cycle de fabrication du produit**.

Il est intéressant d'avoir ces informations avant la fabrication du produit afin d'avoir des leviers d'actions environnementaux sur celui-ci dès sa conception. **C'est pourquoi, dans la section suivante, nous nous intéresserons aux travaux disponibles dans la littérature sur la modélisation de ces flux et des impacts environnementaux.**

2.4. Modéliser pour prédire

Les bases de données des outils d'évaluation environnementale sont à ce jour **très peu renseignées sur les procédés de fabrication additive**. Comme nous avons pu le constater, les informations contenues dans ces bases de données ne sont, ni assez renseignées sur l'ensemble du cycle de production d'une pièce, ni exhaustives sur l'ensemble des flux entrants et sortants. Ces bases de données utilisent une valeur moyenne globale du procédé en fournissant une valeur de consommation énergétique par kilogramme de matière déposée/projetée. Par conséquent, il est impossible avec ces données actuelles de prendre en compte l'influence des paramètres de fabrication sur les données d'inventaires finaux.

Il y a donc un réel intérêt aujourd'hui de pouvoir prédire, avant la fabrication d'un produit, la consommation de l'ensemble des flux traversant un système pour n'importe quel géométrie d'une

pièce. Ainsi, l'évaluation des indices de performances environnementaux des procédés de fabrication additive nécessite la mise en place de modèles locaux modélisant le comportement de la machine.

Certains auteurs ont proposé des modèles prédictifs de ces procédés de fabrication et c'est ce que nous avons étudié dans cette section.

La modélisation d'un procédé de fabrication est une étape nécessaire avant d'entrer dans une démarche d'optimisation d'un couple pièce/procédé. En effet, il est intéressant de pouvoir **connaitre dès la phase de conception d'un produit, des données sur les consommations et les rejets qui vont être générés en fonction des paramètres de fabrication associés à la pièce**.

C'est dans ce cadre que Baumers et al. ont développé un outil (Baumers2013) afin d'estimer la consommation d'énergie électrique ainsi que le coût d'une machine de fusion sur lit de poudre (EOSINT M270 DMLS). L'écart entre la valeur réelle mesurée et la valeur prédite est de 10%. Les auteurs montrent que **la minimisation du coût conduit également à la minimisation de la consommation d'énergie électrique**.

Paul et al. ont développé un modèle mathématique permettant de calculer la consommation d'énergie électrique d'un procédé de fusion sélective par laser en fonction de la hauteur de couche et de l'orientation de la pièce (Paul2012). Dans cette étude, les auteurs ne s'intéressent qu'à l'énergie nécessaire au bon fonctionnement du laser. Ainsi, tous les autres composants de la machine ne sont pas étudiés.

Le Bourhis et al. ont développé une méthodologie d'évaluation et de caractérisation d'une machine de projection de poudre métallique. La figure 2.19 représente la configuration de la machine. Chaque élément de la machine est connecté aux flux nécessaires à son fonctionnement. Les auteurs distinguent deux typologies d'entités nécessaire à la fabrication par projection de poudres. Les entités présentes sur la machine telles que les moteurs et variateurs d'axes, l'armoire de commande, le système de distribution de poudres ou les têtes de projection et les entités hors machine mais nécessaires telles que l'unité laser et l'unité de régulation de la température par exemple. Toutes ces unités sont nécessaires à la fabrication et sont prises en compte dans le cadre de cette étude. Ainsi dans cette méthodologie, les auteurs prennent en compte la consommation d'énergie électrique, de matières et de fluides de l'ensemble des composants de la machine étudiée.

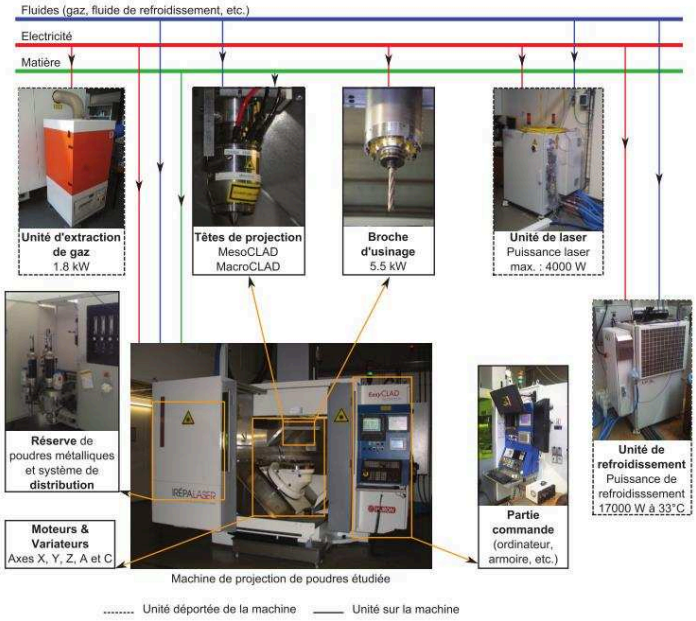


Figure 2.19 - Ensemble des éléments nécessaires à la fabrication par projection de poudres (Le Bourhis, 2014)

Ainsi, ils quantifient l'impact environnemental d'un produit dès la phase de conception pour la machine étudiée en utilisant le modèle numérique de la pièce comme entrée. Le modèle extrait ligne par ligne du fichier G-code les informations nécessaires à la prédiction des données (Le Bourhis, 2014). Ainsi, il est possible de connaitre avec précision la durée des sollicitations des axes de la machine. Une puissance moyenne étant associée à chaque entité mécanique de la machine, il est possible d'avoir une estimation de la consommation d'énergie électrique, de matière et de fluide. Cette méthodologie est basée à la fois sur des modèles analytiques et expérimentaux permettant ainsi la comparaison des impacts environnementaux d'un produit en fonction des paramètres de fabrication. Les travaux réalisés dans le cadre de la thèse de Florent Le Bourhis sont précurseurs car ils sont les premiers à proposer une étude environnementale d'un procédé en prenant en compte l'ensemble des flux traversant le système. Cependant, la méthodologie développée par les auteurs est spécifique à un procédé de fabrication en particulier et nécessite d'être revisitée afin de pouvoir l'extrapoler sur d'autre procédés.

L'équipe de Meteyer et al. a développé une méthode permettant de calculer l'énergie totale de fabrication pour le procédé de projection de liant en fonction de la géométrie de la pièce, de la hauteur de couche et de son orientation (Meteyer2014). Cependant, le modèle estime seulement la consommation d'énergie électrique pendant la fabrication du produit et ne prend pas en compte les consommations dues à l'utilisation de matières et de fluides. La prise en compte de ces étapes est cependant nécessaire afin de pouvoir quantifier l'impact environnemental de l'ensemble de la chaine de production.

Enfin, Kellens et al. ont développé un modèle afin de prédire l'impact environnemental du procédé de fusion sélective par laser pour le PA2200 et le PA3200GF qui sont deux variantes de polyamide. Dans leur méthode de calcul, les auteurs prennent en compte la consommation d'énergie électrique, de matières ainsi que les émissions pendant la fabrication du produit. Toutes ces données sont ensuite transformées en impact environnemental. Ainsi, les auteurs proposent des équations incluant deux variables qui sont la hauteur totale de la pièce et son volume permettant de prédire l'impact environnemental pour différentes géométries de pièce.

La modélisation des procédés de fabrication additive est un phénomène assez récent. Le manque de modèle prédictif dans la littérature montre que **la connaissance autour des données d'inventaires de ces procédés doit encore s'améliorer**. En effet, avant de pouvoir modéliser un procédé, il est essentiel de connaitre finement ce qui se passe pendant la fabrication d'un produit. **Il est essentiel à l'avenir de se positionner dans cette démarche de modélisation des procédés de fabrication additive afin de pouvoir faire remonter toutes les informations dès la conception d'un produit**.

Dans une démarche de comparaison de procédé de fabrication, il est également intéressant de connaitre les cas dans lesquels il est préférable d'utiliser les procédés de fabrication additive ou les procédés conventionnels. **Certains auteurs se sont intéressés à la comparaison de ces deux types de procédés de fabrication et c'est ce que nous allons détailler dans la section suivante**.

2.5. Comparaison entre les procédés de fabrication additive et les procédés conventionnels

Comme nous avons pu le voir dans le chapitre 1, la fabrication additive à de nombreux avantages de par la capacité de ces procédés à fabriquer des pièces à géométrie complexe. Mais qu'en est-il des aspects environnementaux des procédés de fabrication additive par rapport aux procédés conventionnels ? C'est une question à laquelle certains auteurs ont tenté de répondre. Ce sont ces travaux que nous allons présenter dans cette section.

La première étude de comparaison des performances environnementales entre les procédés de fabrication additive et les procédés conventionnels a été réalisé par l'équipe de Morrow. Dans cette étude, ils s'intéressent à la fabrication de différentes pièces dont un moule pour l'injection plastique réalisé soit par fabrication additive soit par usinage (Morrow2007). Les auteurs mettent en place un indicateur défini par le rapport du volume de matière solide sur le volume de creux afin de permettre au concepteur de faire un choix sur le type de procédé le plus optimal d'un point de vue environnemental. Pour des pièces ayant un fort rapport solide/cavité et une faible complexité technique, l'usinage est à privilégier. Dans le cas contraire l'utilisation des procédés de fabrication additive est plus intéressante. Dans cette même étude, les auteurs montrent que la fabrication additive peut aussi être utilisée pour l'amélioration, la réparation et la refabrication d'outils. Ils concluent que cela permettra de faire des économies d'un point de vue énergétique et économique sur le cycle de vie d'un outil.

Dans une optique de choix de procédé de fabrication, Kerbrat et al. développent un ensemble d'indices de complexité de fabrication applicable à l'usinage et au procédé de fusion sélective par laser afin faciliter la sélection d'un procédé de fabrication et de concevoir des systèmes modulables pour améliorer la fabricabilité d'un produit et de réduire ses coûts (Kerbrat2010a,Kerbrat2010b). Les quelques indices développés sont les suivants : les dimensions maximales, le volume, la hauteur, la distance du centre du plateau, la flexibilité de l'outil de coupe.

L'équipe de Serres propose une étude comparant la fabrication additive par projection de poudre à l'usinage (Serres2011). Cette étude permet de mettre en avant la réduction des impacts environnementaux de près de 80% sur l'ensemble du cycle de vie de la pièce (figure 2.20), de l'extraction de la matière première à la fabrication, grâce à l'utilisation de la fabrication additive. Les auteurs soulignent également l'importance de l'impact environnemental dû à l'élaboration de la poudre pour le procédé de projection de poudre métallique qui représente 90% des impacts totaux.

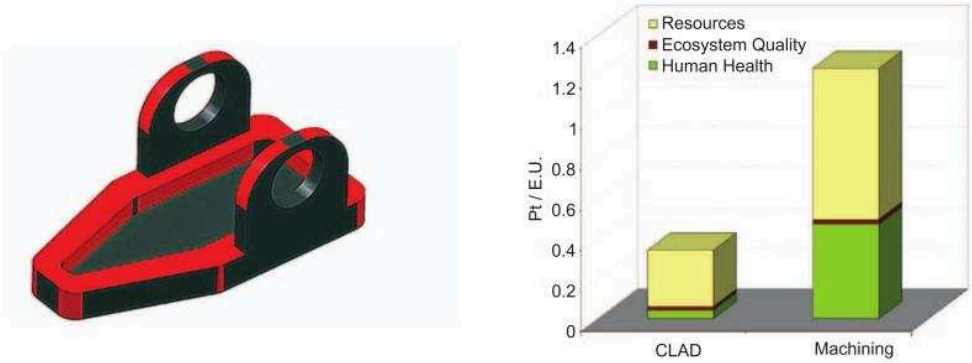


Figure 2.20 - Impact environnementale des procédés d'usinage et de fabrication additive (droite) pour la pièce étudiée (gauche) (Serres2011)

L'équipe de Telenko s'est intéressée à la comparaison de la consommation d'énergie électrique pour une pièce réalisée (figure 2.21) par le procédé de fusion sélective par laser et l'injection plastique (Telenko2012).

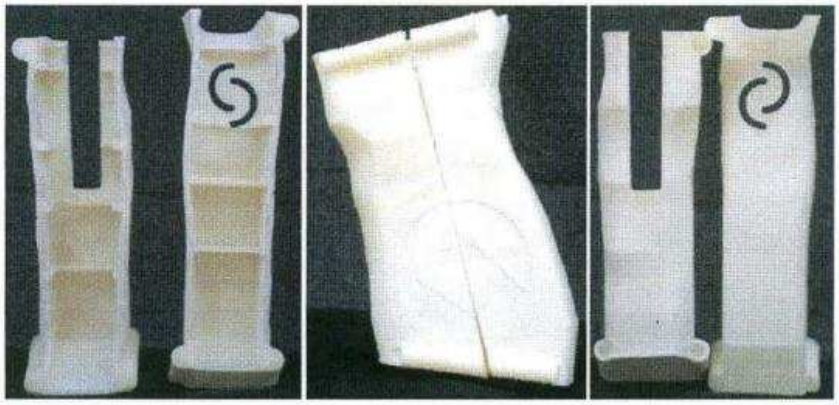


Figure 2.21 - Pièce étudiée dans les travaux de Telenko vue sous 3 angles différents (Telenko2012)

Cette étude permet de définir un seuil maximal à partir duquel la fabrication additive n'est plus rentable vis-à-vis de l'injection plastique. Dans leur étude, les auteurs ne prennent pas en compte la fabrication du moule pour le procédé d'injection plastique. Ils concluent qu'il est possible d'avoir des gains énergétique en utilisant la fabrication additive pour des petits volumes de fabrication.

Plus récemment, Chen et al. ont également réalisé une étude de comparaison d'énergie électrique entre la fusion sélective par laser et l'injection plastique (Chen2015). Bien que la puissance nécessaire au fonctionnement du procédé soit jusqu'à 10 fois plus grand pour l'injection plastique (figure 2.22), les auteurs constatent une consommation d'énergie électrique beaucoup plus grande pour la fusion sélective par laser à cause d'un temps de fabrication plus important (facteur 10 à 100 fois plus grand).

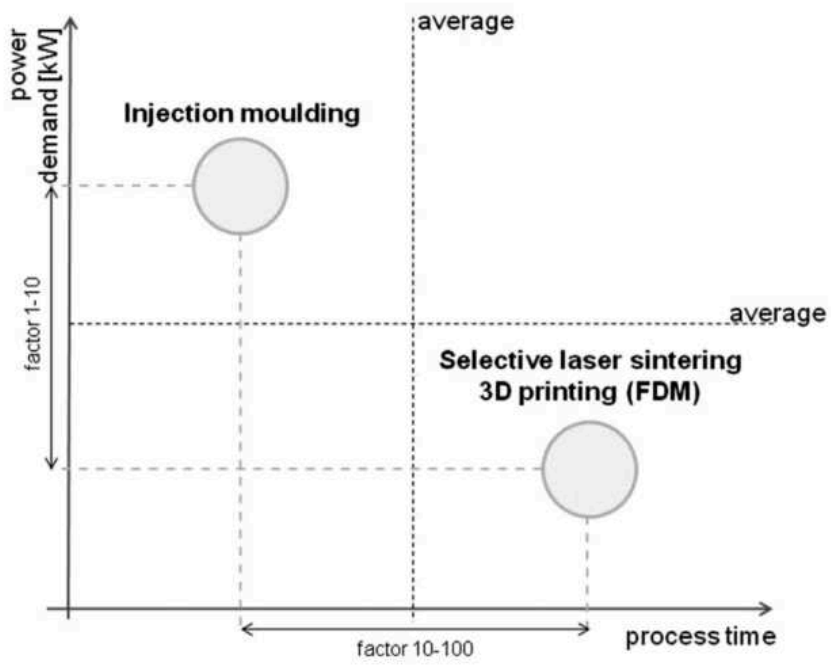


Figure 2.22 - Différence des puissances et des temps de fabrications entre la fusion sélective par laser et l'injection plastique (Chen2015)

Les auteurs prennent en compte dans leur étude la consommation d'énergie nécessaire à la fabrication du moule et proposent ainsi une comparaison entre les deux procédés d'un point de vue énergétique. La figure 2.23 illustre l'énergie totale utilisée pour le procédé de fusion sélective par laser et pour le procédé d'injection plastique pour trois lots de pièces (100, 1000 et 10 000 pièces). Les auteurs concluent qu'il devient plus intéressant d'utiliser le procédé d'injection plastique dans leur cas à partir d'un lot de 1000 pièces en raison de la forte consommation d'énergie nécessaire à la fabrication du moule.

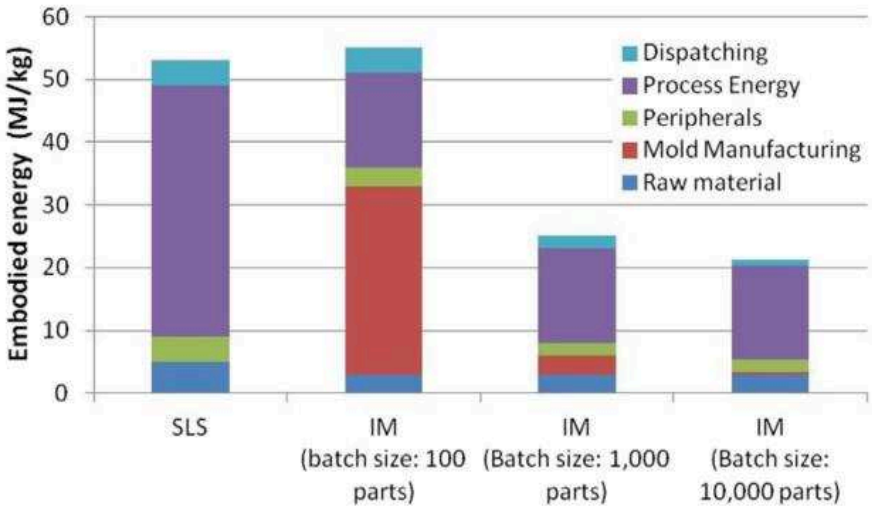


Figure 2.23 - Comparaison d'énergie entre la fusion sélective par laser et l'injection plastique. (Chen2015)

L'équipe de Yoon est allée un peu plus loin dans la comparaison des procédés en réalisant une étude incluant les procédés d'injection plastique, d'usinage et d'extrusion de matière (Yoon2014). La figure 2.24 illustre la pièce étudiée dans leurs travaux. La même pièce est utilisée dans cette étude, fabriquée en ABS P400, pour réaliser la comparaison des trois procédés.

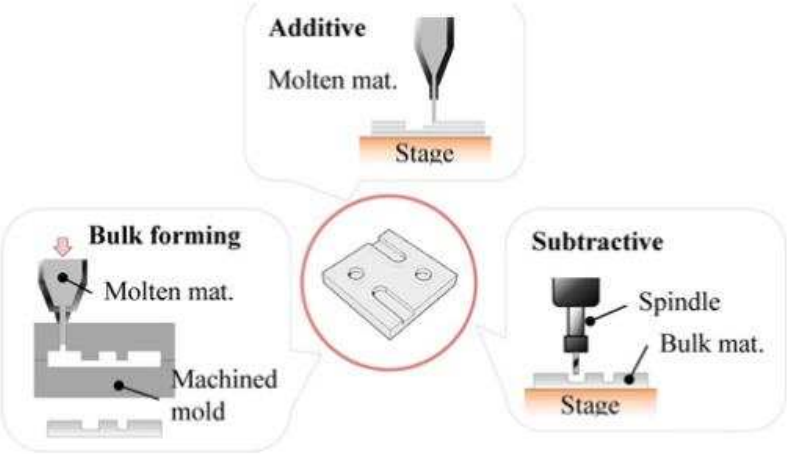


Figure 2.24 - Cas d'étude (Yoon2014)

Les résultats montrent une plus grande consommation d'énergie électrique pour l'injection plastique lors de la fabrication d'une seule pièce (figure 2.25). Cet écart est dû à la phase de chauffe du procédé qui est très énergivore et qui n'est pas adaptée à la fabrication de pièces en petites séries. Cependant, le SEC du procédé d'injection plastique et d'usinage décroit fortement pour la réalisation de plusieurs pièces.

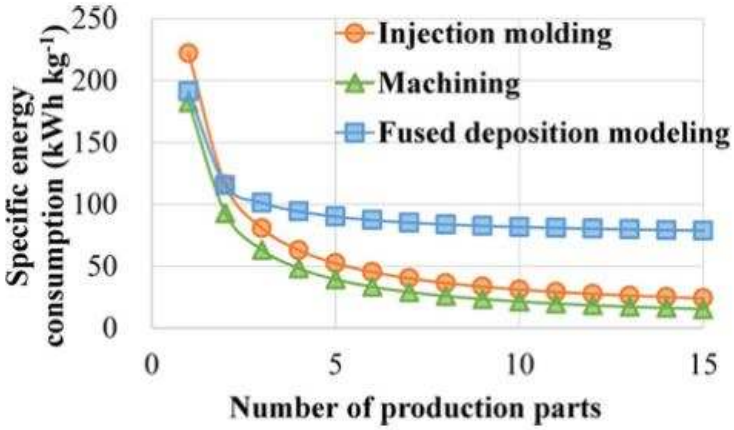


Figure 2.25 - SEC en fonction du nombre de pièce fabriquée (Yoon2014)

Les auteurs se sont également intéressés au coût de revient des trois procédés en fonction du nombre de pièces fabriquées (figure 2.26). Pour une série de 15 pièces, ils observent un coût deux fois plus grand pour l'extrusion de matière. Les procédés de fabrication additive ne sont pas adaptés à la fabrication de pièce en grande série.

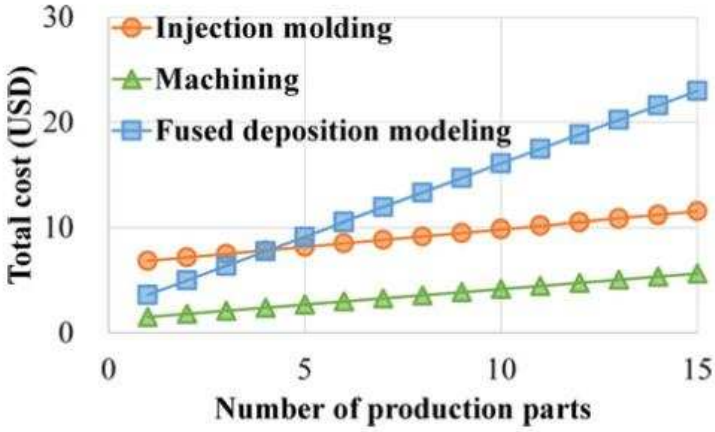


Figure 2.26 - Coût en fonction du nombre de pièces fabriquées (Yoon2014)

Les auteurs cités ci-dessus se sont essentiellement intéressés à comparer les procédés de fabrication additive aux procédés conventionnels d'un point de vue énergétique. Certains auteurs sont allés un peu plus loin dans la démarche de comparaison en réalisant une analyse de cycle de vie complète pour un produit donnée en prenant en compte l'ensemble des étapes, de l'extraction de la matière première à la fin de vie du produit.

C'est dans cette démarche que s'est inscrite l'équipe de Faludi en réalisant une analyse de cycle de vie pour deux produits réalisés sur deux procédés de fabrication additive (projection matière et extrusion de matière) et sur une machine d'usinage (Faludi2014). Les deux pièces fabriquées en ABS sont illustrées figure 2.27.

Figure 2.27 - Pièces étudiées dans les travaux de Faludi et al. (Faludi2014)

En supposant un état de surface et des tolérances géométriques similaires pour les pièces obtenues avec les trois procédés, les auteurs montrent que le procédé d'extrusion de matière à le plus faible impact environnemental. Les performances environnementales du procédé de projection de matière et d'usinage étant trop dépendants des paramètres de fabrication employés, les auteurs concluent qu'il n'est pas possible, dans le cadre de leur étude, de déterminer quel procédé est le plus respectueux de l'environnement.

L'équipe de Peng de l'université technologique de Dalian en Chine ont réalisé une analyse de cycle de vie d'une turbine (figure 2.28) réalisé en usinage et par projection de poudre métallique (Peng2017).

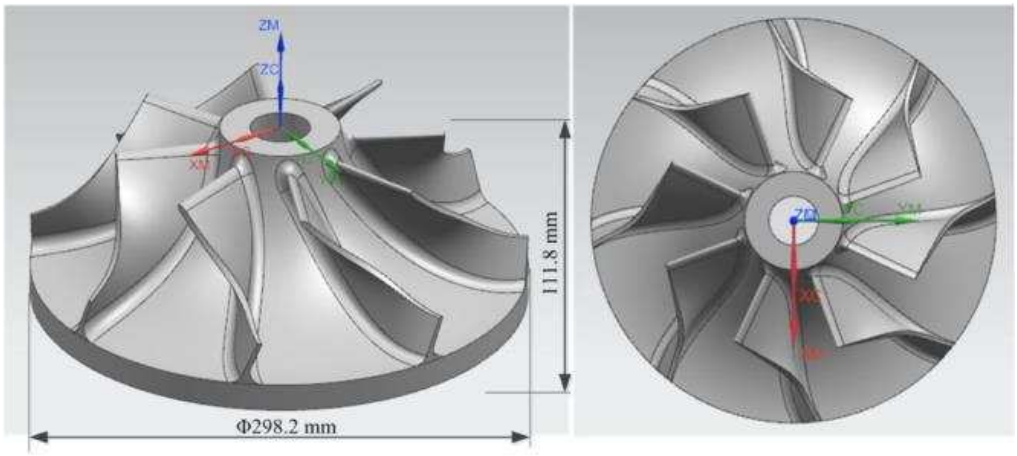


Figure 2.28 - Pièces étudiées dans les travaux de Peng (Peng2017)

Les auteurs évaluent cette pièce sur cinq impacts qui sont le gaz à effet de serre (GWP), l'acidification atmosphérique (AP), la consommation de matière première non renouvelable Chinois (CADP), l'eutrophisation aquatique (EP) et les émissions de particules (RI). Ainsi, ils montrent que l'impact environnemental lié à la fabrication de cette pièce par le procédé de projection de poudre métallique est approximativement deux fois plus important qu'en usinage (figure 2.29). D'autres études comparatives de l'impact environnemental généré lors de la fabrication d'une pièce par fabrication impression par faisceau d'électron et usinage sont également disponibles ((Le2018),(Priarone2018)).

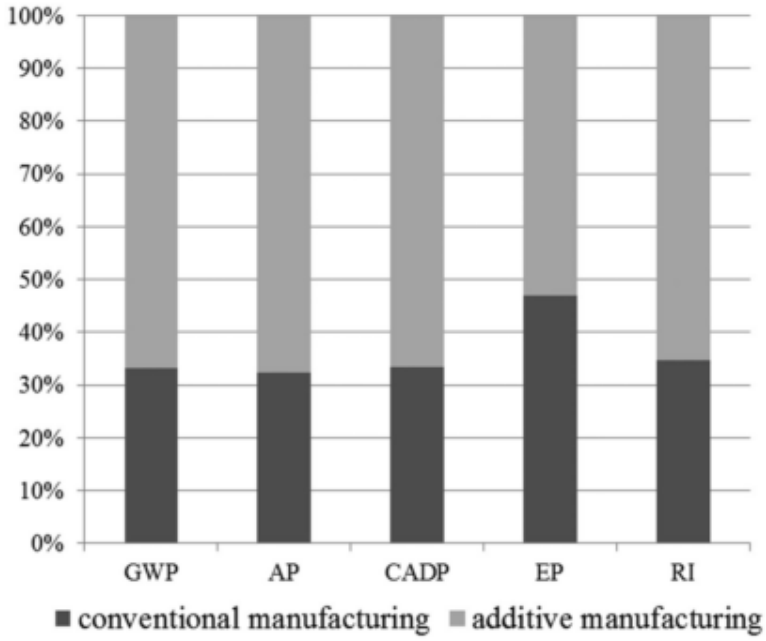


Figure 2.29 - Comparaison de l'impact environnemental entre un process d'usinage et de projection de poudre métallique (Peng2017)

La comparaison des procédés de fabrication additive avec les procédés conventionnels est un phénomène de plus en plus courant. De nombreux auteurs ont essayé de démontrer les avantages de la fabrication additive d'un point de vue environnemental par rapport aux procédés conventionnels. Cependant on constate dans la littérature que cet avantage n'est pas certain et que l'impact environnemental dépend beaucoup de la pièce étudiée et des processus élémentaires pris en compte dans l'analyse de cycle de vie du produit.

Par conséquent il est très délicat de conclure qu'un procédée est mieux qu'un autre d'un point de vue environnemental à la lueur des analyses précédentes. En revanche, il parait intéressant de choisir un procédé de fabrication en fonction des besoins associés à la pièce que l'on souhaite produire (Paris2016). Ainsi il sera surement plus intéressant, d'un point de vue environnemental, de réaliser une pièce par fabrication additive si celle-ci est trop complexe à fabriquer (nécessité de plusieurs étapes) avec un procédé usinage ou que le volume de matière à enlever soit trop important.

2.6. Optimisation

L'optimisation d'un procédé de fabrication additive d'un point de vue environnemental peut se faire de deux façon différentes. La première est de jouer directement sur le forme de la pièce en conception et la seconde est de changer les paramètres de fabrication du procédé.

L'évolution des procédés de fabrication additive dans le temps a fait apparaitre des nouvelles méthodes de conception pour ces procédés innovants (Design for additive manufacturing : DFAM) (Ponche2012). Ces nouvelles méthodes permettent de fabriquer des pièces de masses réduites et donc forcément de réduire l'impact environnemental de la pièce. On utilise généralement dans ce cas les méthodes d'optimisation topologique des pièces. Ce type d'optimisation n'est pas encore totalement bien intégrée dans les logiciels de conception. Il est donc difficile d'envisager d'orienter la conception vis-à-vis des critères environnementaux à cause d'un manque d'outils.

La variation des paramètres de fabrication du procédé de fabrication est un bon moyen d'améliorer ses performances environnementales. Mognol et al. montrent dans leur étude que la consommation d'énergie est liée à la durée de fabrication et que cette durée de fabrication est liée à la hauteur de la pièce. Ainsi plus la pièce est haute, plus la consommation d'énergie électrique sera grande. La variation de l'épaisseur de couche peut également améliorer les performances environnementales d'un procédé, mais ce changement se fera au détriment de la qualité de l'état de surface du produit.

L'optimisation environnementale d'un procédé de fabrication est assez peu étudiée dans la littérature. Quelques auteurs ont travaillé sur cet aspect en proposant des règles de fabrication afin de diminuer l'impact environnemental généré pendant la réalisation d'une pièce. Cependant, dès lors que l'on fait varier les paramètres de fabrication du procédé, les propriétés mécaniques de la pièce se voient être changées.

Par conséquent, si l'on souhaite se placer dans une démarche d'optimisation d'un procédé, il parait intéressant de combiner les indices de performances environnementaux à des données techniques et économiques permettant ainsi d'avoir une vision globale du couple pièce/procédé.

2.7. Synthèse

Nous avons identifié jusqu'à présent les travaux disponibles dans la littérature qui traitent de la prise en compte des aspects environnementaux pendant le l'étape de fabrication d'une pièce. On peut s'apercevoir qu'il est important de considérer l'ensemble du couple pièce-procédé lorsque l'on souhaite caractériser un procédé de fabrication étant donné que la géométrie de la pièce ainsi que son positionnement dans l'espace machine ont de fortes influences sur les impacts environnementaux finaux.

Nous pouvons constater qu'une grande majorité des articles scientifiques se sont intéressés à la consommation d'énergie électrique de ces procédés de fabrication pendant les différentes étapes de fabrication du produit.

En effet, la caractérisation des performances environnementales des procédés de fabrication additive a souvent porté sur la consommation d'énergie électrique. Nous avons pu nous apercevoir dans cette partie que peu d'études s'intéressent à la consommation de fluides et de matières pour ces procédés. De plus, l'intérêt des auteurs est particulièrement focalisé sur l'étape de mise en forme du produit. Les informations sur les autres étapes de fabrication telles que la préparation du fichier ou la finition sont peu étudiées.

Or dans le cadre d'une analyse de cycle de vie complète, il est essentiel de prendre en compte l'ensemble des flux traversant le procédé afin d'évaluer sa performance environnementale de façon la plus complète possible. Cependant, prendre une décision sur le choix d'un procédé de fabrication seulement sur le volet environnemental n'est pas suffisant même si l'étude environnementale est la plus exhaustive possible. En effet toutes les décisions dans le monde industriel sont à ce jour réalisées à la fois sur le plan économique et technique. Ainsi, faire un choix de procédé ou de machine sur le plan environnemental n'est pas suffisant. Il parait donc intéressant de combiner ces données environnementales avec des données technico-économiques afin d'avoir une vision plus globale lors de la prise de décision.

Dans les deux sections suivantes, nous nous intéresserons à l'analyse technique et économique des procédés de fabrication additive.

3. Analyse technique des procédés de fabrication additive

Les technologies de fabrication additive ont considérablement évolué au cours des dernières décennies. Cette technologie a attiré de plus en plus l'attention du monde industriel, ce qui a conduit à une très grande progression de ces procédés d'un point de vue technique. Initialement permettant la fabrication de pièces prototypes (Bourell2009), de nos jours, ces procédés permettent de fabriquer des produits fonctionnels réalisés en différents types de matériaux tels que les céramiques, les composites, l'électronique, les biomatériaux et les matériaux intelligents (Lee2017).

Cette progression technique s'est notamment développée grâce à la modélisation, mathématique ou numérique. Ce qui a permis de renforcer la connaissance technique de ces procédés. Par la suite, ces modélisations ont permis de mettre en place des modèles prédictifs de certaines propriétés mécaniques d'un produit.

Dans l'optique de pouvoir intégrer facilement dans notre méthode d'évaluation multicritère, des informations sur les propriétés mécaniques d'une pièce, il est essentiel de recenser dans la littérature les travaux traitant de la modélisation technique de ces procédés. C'est ce que nous allons présenter dans cette section.

3.1. Modélisation des procédés de fabrication additive avec une approche process

Le développement et l'optimisation de ces procédés est essentiellement du au développement des connaissances autour de ces procédés. Ces connaissances ont été acquises soit par l'expérimentation, soit par l'analyse des phénomènes multi-physiques en jeu pendant la fabrication d'un produit. Nous proposons de diviser les modèles existant dans la littérature en deux types. Certains auteurs ont étudié directement le procédé de fabrication en s'intéressant par exemple au transfert de chaleur ou au changement de phases des matériaux : **modélisation avec une approche process**. Alors que d'autres se sont plus intéressés aux paramètres liés au produit tels que les propriétés mécaniques et l'état de surface : **modélisation avec une approche produit**. Ainsi, on trouve dans la littérature des modèles analytiques, numériques ou empiriques de ces procédés (Bikas2016). Dans cette première partie de ce chapitre, nous nous sommes intéressés au recensement des modèles avec une approche process.

Pour le procédé de fusion sur lit de poudre, l'équipe de Dong a réalisé une étude par élément finis afin de prédire la distribution de la température et de la densité moyenne pour un matériau polycarbonate en fonction de la puissance, de la vitesse et du diamètre du laser (Dong2008).

Une approche similaire a été suivie par l'équipe de Liu qui a modélisé à l'échelle microscopique le transfert de chaleur dans le lit de poudre d'une machine de frittage sélective par laser (Liu *et al.*, 2012).

L'équipe de Khairallah s'est intéressée à une machine de fusion sélective par laser en proposant une simulation à l'échelle mésoscopique de la fusion de poudre d'acier inoxydable 316 en substrat solide de dimension 1000 x 300 x 50 µm (Khairallah2014). Sur ce même procédé de fabrication, Matsumoto et al ont réalisés une modélisation des contraintes et de la température lors de la fusion d'une couche en utilisant une méthode par éléments finis.

Dans cette même démarche de simulation du procédé de fabrication, l'équipe de Gockel a développé un modèle en éléments finis sur la simulation de la solidification du matériau permettant ainsi de prédire les propriétés du matériau ainsi que des informations géométriques sur sa microstructure (Gockel2014).

Le procédé d'extrusion de matière fait partie des procédés de fabrication additive les plus étudiés dans la littérature. Cette démocratisation du procédé a permis l'utilisation par un plus grand nombre et donc la compréhension de ces procédés s'est également améliorée.

Martinez a utilisé une méthode de modélisation par éléments finis afin de caractériser les contraintes et les déplacements pendant un effort de traction sur une éprouvette normalisée (Martínez2013). L'équipe de Sood a développé un algorithme de réseau de neurones permettant de prédire la contrainte maximale de compression en fonction de la hauteur de couche, de l'orientation de la pièce, de l'angle et de la largeur de dépôt (Sood2012).

Nous avons également identifié dans la littérature des travaux sur la caractérisation de l'état de surface des procédés de fabrication additive. L'équipe de Reeves propose un modèle analytique d'évaluation de l'état de surface du procédé de photopolymerisation en cuve en prenant en compte l'orientation de la pièce ainsi que le profil de la couche polymérisée (Reeves1997b)(Reeves1997a).

Comme nous pouvons le constater, les travaux disponibles sur la modélisation des propriétés mécaniques des procédés de fabrication additive sont essentiellement portés sur la simulation d'un phénomène physique pendant la fabrication d'un produit. Certains auteurs ont proposé pour quelques procédés de fabrication additive, des modèles génériques, permettant de prédire des données techniques pour un ensemble de machine d'un procédé de fabrication.

3.2. Modélisation des procédés de fabrication additive avec une approche produit

L'équipe de Ahn a utilisé une méthode d'interpolation linéaire afin de prédire la rugosité arithmétique pour le procédé d'extrusion de matière en fonction de l'angle de fabrication (Ahn, Kim and Lee, 2009). Ainsi, si on connait la rugosité entre deux valeurs (par exemple entre 40° et 50°), il est possible de connaitre la valeur de rugosité arithmétique (Ra) pour un angle compris entre ces deux valeurs connues (par exemple 45°). L'équation 1 montre le modèle développé par les auteurs.

$$\mathrm{R}(\theta_{\mathrm{i}}(d)) = \mathrm{R}(\theta_{\mathrm{p}}) + \frac{\mathrm{R}(\theta_{\mathrm{n}}) - \mathrm{R}(\theta_{\mathrm{p}})}{\theta_{\mathrm{n}} - \theta_{\mathrm{p}}}(\theta_{\mathrm{i}}(d) - \theta_{\mathrm{p}}) \tag{1}$$

Ce modèle implique une série d'expérience au préalable afin de connaitre les valeurs de rugosité pour un certain nombre d'angles.

Pour le même procédé de fabrication, l'équipe de Boschetto a réalisé une modélisation géométrique (Boschetto2011) du procédé illustré figure 2.30, aboutissant à l'obtention d'équation permettant la prédiction de la rugosité arithmétique (Boschetto2013).

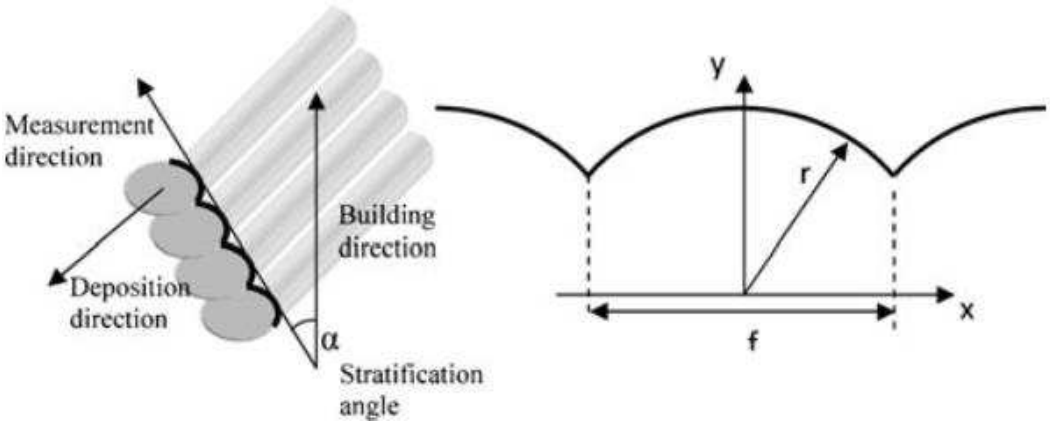


Figure 2.30 - Modèle géométrique du procédé d'extrusion de matière (Boschetto2011)

Les auteurs proposent ainsi une équation générique (équation 2) avec comme paramètres d'entrée, la hauteur de couche (L) et l'angle de fabrication (alpha).

$$\mathrm{Ra} = \frac{\mathrm{L}.\csc(\alpha)}{9.\sqrt{3}} \quad (2)$$

Afin de valider ce modèle, les auteurs ont réalisé une série de pièces avec différents angles de fabrication allant de 0° à 180°. Ils montrent que pour les deux hauteurs de couches étudiés, les valeurs du modèle sont très proches des valeurs expérimentales pour un angle compris entre 30 ° et 150°. La figure 2.31 illustre l'évolution de la rugosité entre le réel et le modèle.

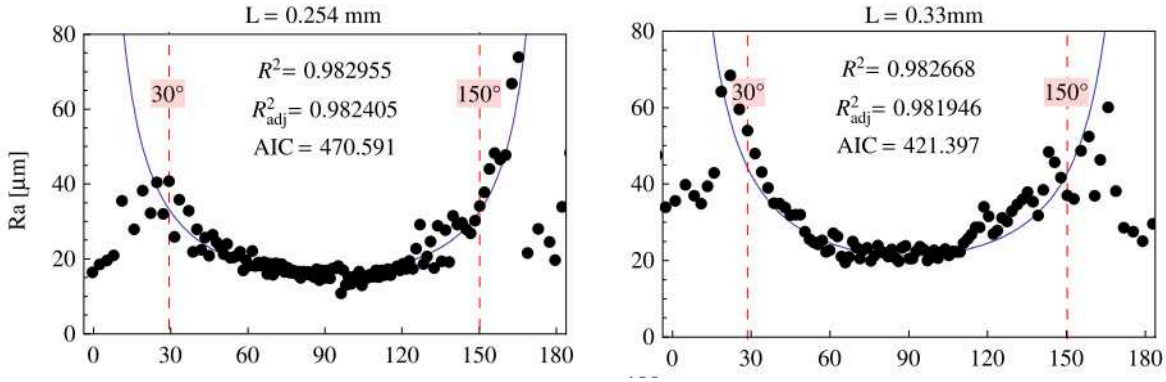


Figure 2.31 - Ecart de rugosité entre le réel et le modèle. (Boschetto2011)

3.3. Synthèse

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés aux travaux disponibles dans la littérature sur la modélisation des procédés de fabrication additive. Nous avons pu constater que beaucoup de ces travaux sont essentiellement portés sur la modélisation d'un ou de plusieurs phénomènes physiques pendant l'étape de fabrication d'un produit conduisant ainsi à une simulation du phénomène étudié.

Certains auteurs proposent des modèles prédictifs applicables à un ensemble de machines de fabrication additives, mais seuls certains procédés disposent de tels modèles. Ce sont donc ces derniers types de modèle que nous assimilerons à notre méthodologie qui sera présentée dans le chapitre trois de ce manuscrit.

4. Analyse de coût des procédés de fabrication additive

Le nombre de publications scientifiques sur l'analyse des coûts des procédés de fabrication est étroitement lié à l'évolution de ces procédés d'un point de vue technique. En effet l'évolution des connaissances autour de ces procédés innovant a suscité un certain intérêt de la part de la communauté scientifique et industrielle à développer des modèles liés aux coûts de productions (Costabile2017).

Dans l'optique d'évaluer un procédé de fabrication additive en fonction des critères environnementaux, techniques et de coûts, il est essentiel de recenser dans la littérature les travaux traitant de la modélisation de ce dernier. L'objectif est d'identifier les modèles disponibles et les paramètres pris en compte qui permettent une évaluation qui se rapprochera le plus possible des coûts réels.

4.1. Modélisation du coût de fabrication des procédés de fabrication additive

Dans le monde industriel, les coûts de production sont généralement classés en deux types ; les coûts directs et les coûts indirects. Le coût direct peut ainsi désigner les matières premières entièrement utilisées par la production d'une pièce, alors que le coût indirect peut correspondre, par exemple, aux charges nécessaire à la production de la pièce. Ainsi les différents modèles de coûts développés dans la littérature sont classifiés en utilisant cette désignation (équation 3).

$$Cost\ of\ a\ build = Direct\ costs + Indirect\ costs \tag{3}$$

Hopkinson et Dickens sont parmi les premiers auteurs à avoir proposé un modèle d'estimation des coûts lié à la fabrication de pièces réalisées par fabrication additive (Hopkinson2003). Bien que ces procédés soient utilisés comme des moyens de prototypage rapide à l'époque où ils développent leur modèle (2003), les auteurs considèrent tout de même que ces procédés permettent la production de pièces en grande séries. Ainsi, ils réalisent une analyse de coût en comparant le procédé d'injection plastique à trois procédés de fabrication additive : la stéréolithographie, l'extrusion de matière et la fusion sélective par laser sur la pièce illustrée figure 2.32.

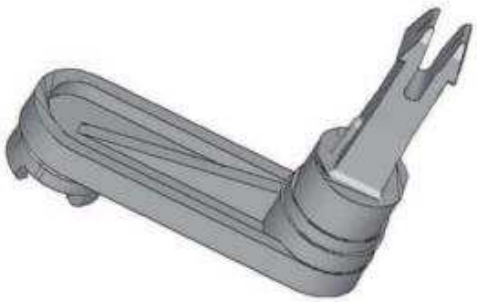


Figure 2.32 - Pièce étudiée par l'équipe d'Hopkinson.

Les auteurs montrent que pour des pièces à géométrie complexe ou pour des petits volumes de fabrication, il est plus intéressant de réaliser le produit par fabrication additive afin de réduire le coût de revient. La figure 2.33 présente l'évolution du coût de réalisation pour l'injection plastique par rapport aux procédés de fabrication additive pour la pièce ci-dessus. Cette étude permet de mettre en évidence la taille de la série qu'il est nécessaire d'atteindre pour que l'injection plastique soit moins

coûteuse que les procédés de fabrication additive. Il faut environ 6000 pièces pour que l'injection soit plus rentable que la stéréolithographie et l'extrusion de matière et environ 14 000 pour le frittage sélectif par laser.

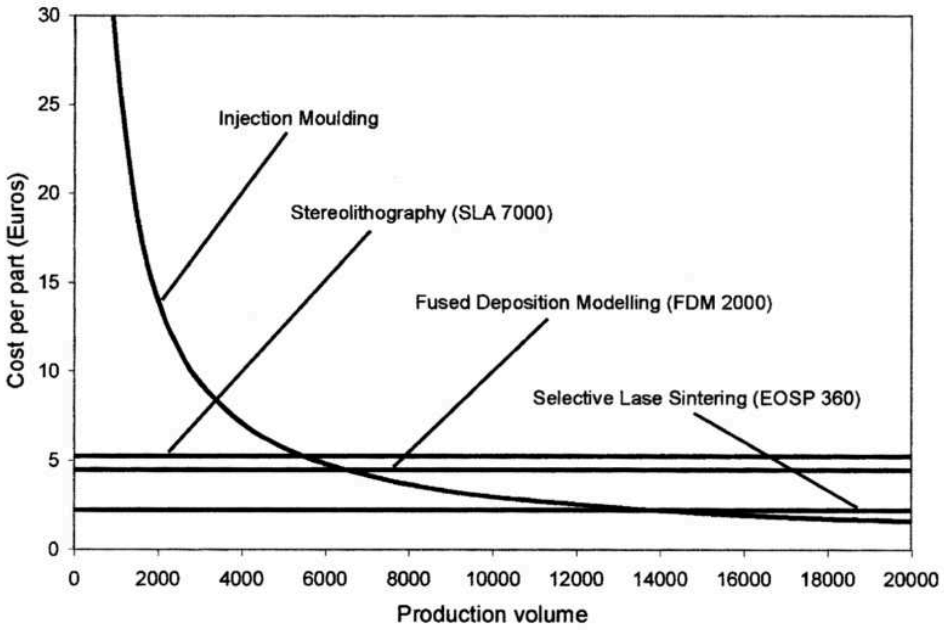


Figure 2.33 - Comparaison du coût entre l'injection plastique et les machines de fabrication additive

Dans leur étude, Hopkinson et Dichens ont calculé un coût de production pour un remplissage maximal de l'espace machine. Ainsi, le modèle de coût qu'ils proposent n'est pas associé à une mais à plusieurs pièces. De plus, ce nombre de pièces varie en fonction de chaque procédé étant donné que les dimensions du plateau de fabrication varient d'une machine à une autre. Ainsi, les coûts liés à la machine, la main d'œuvre et l'utilisation de matériaux sont pris en compte pour le calcul du coût total.

En 2006, Ruffo et al. reprennent les travaux d'Hopkinson afin de comparer les coûts de production entre l'injection plastique et le frittage de poudre par laser. Les auteurs s'intéressent au même cas d'étude que l'équipe de d'Hopkinson (figure 2.34).

Ruffo et al. considèrent que les machines sont utilisées 100 heures/semaines pendant 50 semaines par an alors qu'Hopkinson et Dicknes considéraient que les machines étaient utilisées pendant 24 heures tous les jours de l'an, soit pendant 365 jours. Ainsi, le nombre d'heures d'utilisation des machines par an proposé par Ruffo est plus proche de durées d'utilisation réalistes dans le monde industriel. Par conséquent, le coût total proposé par Ruffo est plus important que les coûts proposés par Hopkinson (figure 2.34).

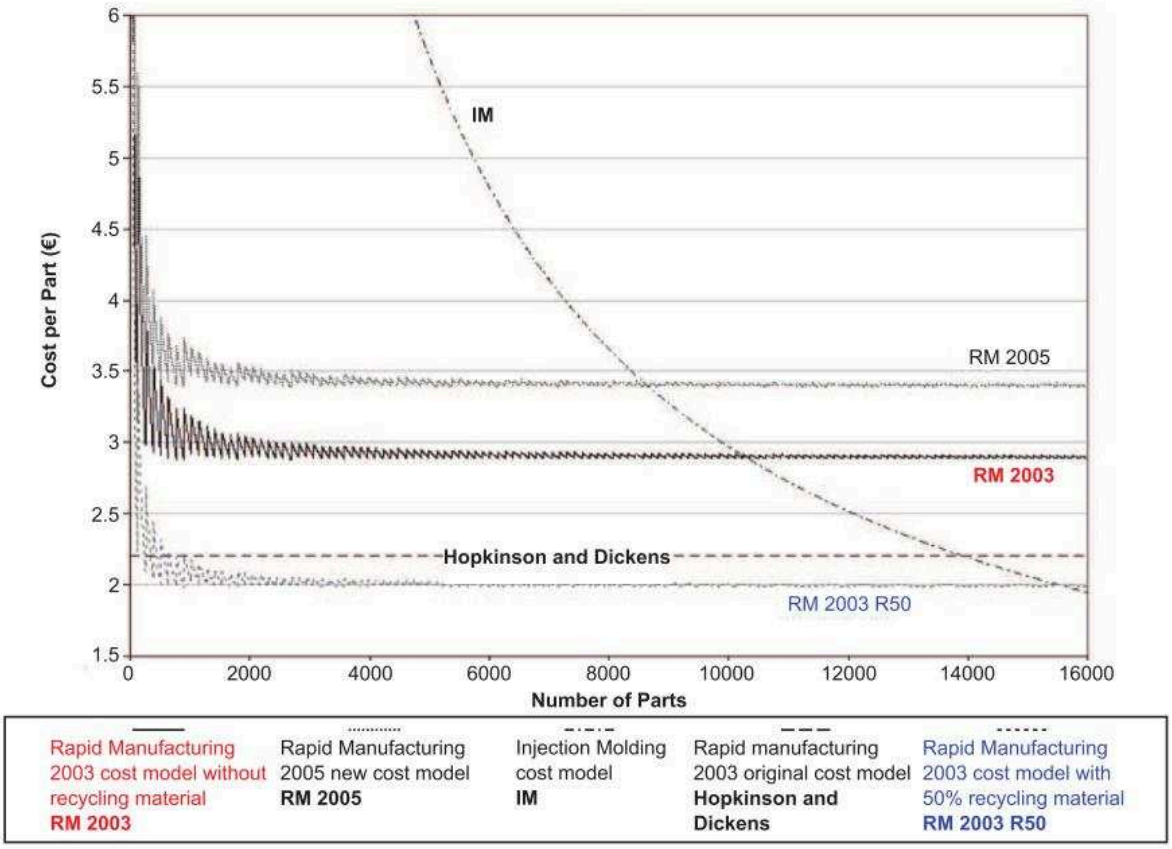


Figure 2.34 - Comparaison des modèles de coûts économique entre l'injection plastique et la fusion sélective (Ruffo2006)

Dans leur étude, Ruffo et al. identifient les coûts de main-d'œuvre, de la machine, des frais généraux de production et d'administration comme des coûts indirects. La main-d'œuvre et l'entretien des machines sont considérés comme indirects puisqu'ils sont payés annuellement avec des contrats. Ainsi, le coût total d'une fabrication est la somme des coûts directs et indirects (équation 3). Les coûts directs dépendent de la quantité de matériaux utilisés et les coûts indirects dépendent du temps de fabrication.

Dans l'étude d'Hopkinson, le coût de main d'œuvre était compté comme un coût direct. Ruffo et al. revoient ce coût de main d'œuvre en ajoutant un coût lié au salaire d'un opérateur qui est proportionnel au temps de fabrication de la machine et le considèrent comme un coût indirect. Bien que l'équipe de Ruffo soit allée plus loin dans la démarche d'analyse de coût par rapport aux études précédentes, ils ne s'intéressent qu'aux coûts pendant l'étape de fabrication de la pièce.

Baumers et al. proposent un modèle coût basé sur la notion de coût direct et indirect présentée par Ruffo et al., mais en prenant en compte également les coûts liés à la consommation d'énergie électrique de la machine (équation 4). Dans cette équation, les paramètres pris en compte sont le coût liés aux coûts indirects ($C_{indirect}$), le temps de fabrication (T_{build}), la masse de la pièce (w) ainsi que le prix du matériau au kilogramme ($P_{raw\ material}$) et enfin l'énergie totale consommée pendant la fabrication (E_{build}) ainsi que le prix de l'électricité (P_{energy}).

$$C_{build} = (\dot{C}_{Indirect} \times T_{Build}) + (w \times P_{Raw\ material}) + (E_{Build} \times P_{Energy}) \quad (4)$$

Ainsi les auteurs proposent une estimation plus précise du coût total grâce à l'intégration des coûts liés à la consommation d'énergie dans les coûts directs. Malgré cette évolution, ce modèle proposé par Baumers dérive directement du modèle proposé par Ruffo et al. Par conséquent, les données sur le coût de la finition sont encore manquantes. Lindemann et al. ont affirmé que Hopkinson et Dickens et Ruffo et al. ont choisi une approche similaire pour le calcul des coûts dans leurs modèles et chacun d'eux a mis l'accent particulier sur un certain point. Ainsi chacun de ces deux modèles ont leurs avantages et leurs inconvénients, mais aucun des deux ne satisfait tous les critères. L'équipe de Lindemann conclut qu'il est nécessaire de combiner les avantages des modèles existants et de développer un nouveau modèle de calcul des coûts qui convient pour le calcul de coût des procédés de fabrication additive d'aujourd'hui.

Ainsi, Lindemann et al. définissent quatre processus principaux afin de représenter les différents centres de coûts (Lindemann2012) :

- Préparation de la machine ;
- Fabrication de la pièce ;
- Le retrait manuel du support ;
- Finition de la pièce afin d'améliorer ses propriétés mécaniques ;

Par rapport au modèle de Ruffo, Lindemann et al. définissent les coûts liés à la consommation de ressources tels que l'énergie et le gaz en coût direct. De plus, ils fixent un coût de main d'œuvre fixe pour chaque fabrication.

Lindemann et al. sont parmi les premiers à inclure l'activité de finition dans le modèle des coûts. Cette activité comprend, par exemple, le contrôle de la qualité, le traitement de surface et l'enlèvement du support. La finition des pièces en fabrication additive fait partie du cycle d'obtention de la pièce finale et est donc une étape primordiale à prendre en compte. Pour cette raison, l'idée de considérer le coût des phases de finition permet de mieux comprendre les aspects économiques liés à la technologie.

Rickenbacher et al. ont réalisé une analyse exhaustive du coût pour la fabrication d'une pièce en fusion sélective par laser (Rickenbacher2013). Les auteurs ont développé ce modèle basé sur les travaux d'Alexander et al (Alexander1998). Ce modèle inclut les coûts liés à la préparation du fichier et à la finition de la pièce (équation 5).

$$C_{tot}(P_i) = C_{Prep}(P_i) + C_{Buildjob}(P_i) + C_{Setup}(P_i) + C_{Build}(P_i) + C_{Removal}(P_i) + C_{Substrate}(P_i) + C_{Postp}(P_i) \quad (5)$$

Dans cette équation le coût total (C_{tot}) est la somme du coût lié à la préparation du fichier (C_{prep}), de l'assemblage de la machine ($C_{buildjob}$), de la mise en place de la machine dans l'environnement de travail (C_{setup}), de la fabrication de la pièce (C_{build}), de l'extraction du produit de la machine ($C_{removal}$), de la séparation de la pièce du plateau ($C_{substrate}$) et enfin de la finition.

Les auteurs ont développé ce modèle pour un procédé de fabrication additive métallique, or ils ne prennent pas en compte les coûts liés à la consommation énergétique qui peuvent être important pour ces matériaux.

Au vu des travaux disponibles dans la littérature sur la modélisation des coûts de productions pour les procédés de fabrication additive, Schröder et al. proposent des pistes d'amélioration de ces modèles afin d'avoir une représentation plus complète et réaliste (Schröder2015) :

- Intégration du recyclage et prise en compte des déchets liés à l'utilisation de matière ;
- Calcul du temps de fabrication ;
- Intégration d'un degré de complexité de fabrication pour un produit ;
- Connaissance de la durée précise du temps de finition ;
- Intégration du coût de la matière support ;

De plus, les auteurs proposent une décomposition des processus de fabrication plus fine que par Lindemann et al. en prenant également en compte la phase de conception du produit ainsi que les activités administratives et de ventes.

4.2. Synthèse

Dans cette partie, nous avons analysé les études menées sur la modélisation du coût d'un produit réalisé par fabrication additive. Ainsi, nous avons pu nous apercevoir qu'au fur et à mesure du temps, le niveau de détail des modèles a considérablement augmenté. Les premiers modèles proposés par Hopkinson et Ruffo était assez simplistes. En effet, ces auteurs de s'intéressaient qu'au coût pendant la fabrication d'un produit, laissant de côté les autres phases de fabrication comme la préparation du fichier ou la finition de la pièce. De plus, ils considèrent les machines de fabrication additive comme des procédés de fabrication de grandes séries de pièces.

L'évolution de ces procédés d'un point de vue technique ainsi que leur compréhension, ont permis le développement des modèles de coûts plus réalistes. Cela commence avec l'équipe de Baumers qui prend en comptent le coût lié à la consommation d'énergie électrique qui est non négligeable pour les procédés de fabrication additive métallique. Plus récemment, les auteurs se sont intéressés au coût de l'ensemble du cycle de production d'une pièce.

Finalement, quel que soit le procédé ou la machine étudié, on retrouve les mêmes éléments pris en compte pour définir le coût d'un produit dans la littérature. Ces éléments sont la main d'œuvre, la machine, les matériaux ainsi que la consommation d'énergie. C'est donc sur ces critères que sera basé le modèle de coût que nous avons proposé et qui sera présenté dans le chapitre trois de ce manuscrit.

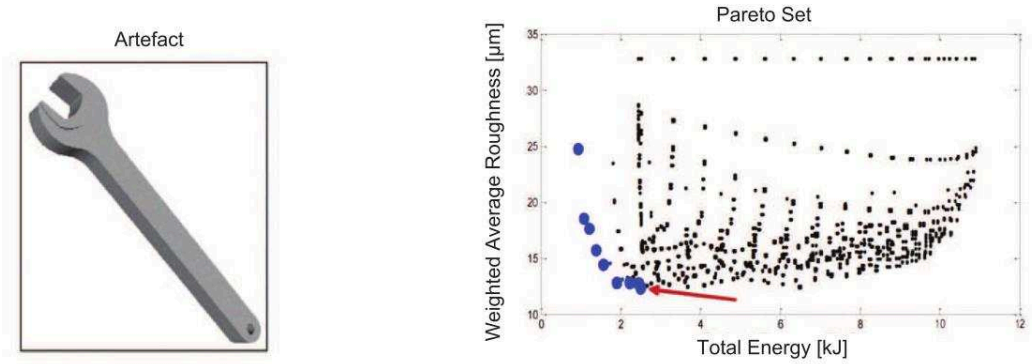
5. Combinaison des données environnementales aux données techniquo-économiques

La combinaison des indices de performances environnementales à des données techniques et de coûts devient une étape nécessaire afin d'identifier les leviers sur lesquels jouer afin d'optimiser un procédé de fabrication d'un point de vue environnemental. En effet, l'optimisation environnementale de ces procédés ne peut se faire au détriment de la qualité finale ou du coût de revient d'une pièce. Ainsi, la combinaison de ces trois critères peut amener une vision plus globale des consommations en jeu pendant la fabrication d'un produit. Dans les sections suivantes, les combinaisons sont étudiés deux à deux car à ce jour, personne ne prend en compte les trois critères ensemble. En effet, il n'y a rien sur la combinaison globale que l'on souhaite réaliser dans le cadre de ces travaux de thèse.

5.1. Combinaison de la performance environnementale avec la performance technique

Strano et al ont étudié la corrélation entre la consommation énergétique électrique de la machine et l'état de surface final de la pièce (Strano *et al.*, 2010). Les auteurs proposent une optimisation du couple consommation électrique/état de surface dont la pièce d'étude est illustrée par la figure 2.35a

et les résultats sont présentés sur la figure 2.35b. Cette étude s'appuie en partie sur la modélisation de l'état de surface proposée précédemment par Campbell et al. (Campbell2002) et reprise récemment dans une autre étude par Strano et al. (Strano *et al.*, 2013)



(a) Pièce d'étude (b) Résultats sous forme de front de Pareto

Figure 2.35 - Objet d'étude à fabriquer et front de Pareto correspondant

Verma et al. proposent une approche d'optimisation multi-objectifs afin de choisir la meilleure orientation de la pièce ainsi que l'épaisseur de couche permettant de minimiser la consommation de matière et d'énergie électrique pour une pièce réalisé en polycarbonate avec le procédé de frittage sélective par laser (Verma2013). Afin de ne pas avoir un état de surface trop déplorable, les auteurs mettent en place une valeur de rugosité minimale à ne pas dépasser lors du choix de l'orientation et de la hauteur de couche. La figure 2.36 résume l'algorithme d'optimisation mis en place par les auteurs.

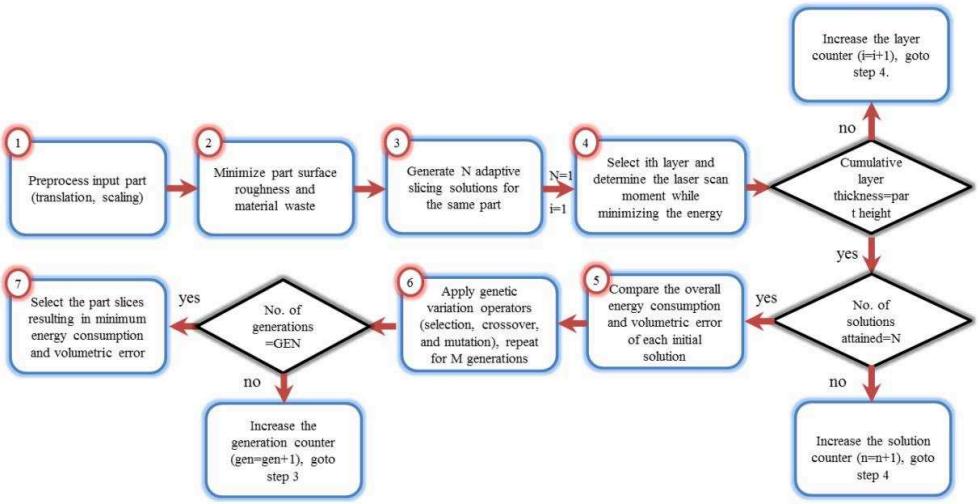


Figure 2.36 - Structure de l'optimisation développée pour un tranchage adaptatif (Verma2013)

5.2. Combinaison de la performance environnementale avec les performances de coûts

Dans une approche de combinaison mêlant performance environnementale et coût du couple pièce/procédé, Baumers et al ont développé un outil afin d'estimer la consommation d'énergie électrique ainsi que le coût pour le procédé de fusion sur lit de poudre (Baumers2013). Ils montrent que ces deux paramètres sont directement influencés par le nombre de pièces produites en même

temps. En effet, plus le nombre de pièces produites simultanément est grand, plus la consommation d'énergie électrique par kilogramme de matière consommé de la machine ainsi que le coût seront bas. Enfin les auteurs concluent qu'afin de diminuer la consommation d'énergie électrique totale, il faut diminuer le coût de fabrication.

5.3. Synthèse

Comme nous avons pu le constater, la combinaison des indices de performances environnementaux avec des données techniques et de coûts est très peu étudié dans la littérature. Quelques auteurs seulement se sont lancés dans cette entreprise en proposant une combinaison entre performances environnementales/caractéristiques techniques ou performances environnementales/coût. De plus c'est la consommation d'énergie qui est le majoritairement combinée avec les données de techniques ou de coût. Or il faudrait prendre en compte tous les flux entrants et sortants dans le cadre d'une combinaison de critère afin d'avoir une vision globale des consommations la plus fine possible.

Ainsi, les efforts pour combiner les performances environnementales d'un couple pièce/procédé avec des données techniques et de coût doivent s'accentuer afin d'avoir une combinaison en fonction des trois critères.

6. Synthèse et positionnement de nos travaux de recherche

6.1. Synthèse

L'ensemble des parties de ce chapitre nous a permis de réaliser l'état de l'art concernant les méthodes d'évaluation et de caractérisation technico-économico-environnementale des procédés de fabrication additive.

D'un point de vue environnemental, l'évaluation de ces procédés est généralement très centrée sur le procédé et ne prend pas en compte l'ensemble des étapes nécessaires à la production d'un produit. En effet, de nombreuses études sont focalisées sur l'étape de fabrication du produit laissant de côté les autres étapes telles que la préparation du fichier ou la finition de la pièce.

L'impact environnemental causé pendant l'étape de transformation de la matière première est à ce jour très peu documenté. L'intérêt des travaux actuel est essentiellement porté sur l'atomisation de la poudre métallique utilisée pour le procédé de projection de poudre et de fusion sur lit de poudre métallique. Par exemple, aucune donnée n'est disponible dans les base de données sur l'impact environnemental généré par la transformation des granules plastiques en bobine de filament pour le procédé d'extrusion de matière.

De plus, les études traitant d'impacts environnementaux s'intéressent principalement à la consommation d'énergie électrique. Or cette dernière ne peut être considérée comme la seule source d'impact environnemental. Il est nécessaire de prendre en considération l'ensemble des flux entrants et sortants. Les bases de données concernant ces procédés n'étant pas suffisamment renseignées, le nombre d'études sur l'analyse de cycle vie complète d'un produit en fabrication additive est relativement faible.

La modélisation de ces procédés d'un point de vue environnemental est très récente par rapport à la modélisation technique et économique. Bien que les modèles étudiés dans ce chapitre soient assez

précis dans la représentation du procédé, ils sont exclusivement centrés sur une machine en particulier.

Enfin, on remarque que de manière générale, la communauté scientifique s'accorde à dire que d'un point de vue environnemental, les procédés de fabrication additive sont une bonne alternative à la réalisation de pièces à géométrie complexe et de petites séries de pièces, en comparaison des procédés conventionnels. La comparaison entre ces deux catégories de procédés est très souvent réalisée avec le même cas d'étude. Ainsi, la consommation d'énergie électrique rapportée par les auteurs dans ce cas est entre une et deux fois supérieure pour la fabrication additive.

La modélisation de ces procédés d'un point de vue technique et économique a également évolué au cours du temps. En effet, les modèles disponibles dans la littérature sont passés d'équations très générales à des équations de plus en plus fines prenant en compte l'ensemble des paramètres pendant le cycle de production de la pièce.

En revanche, la combinaison des performances environnementales avec des données techniques ou économiques d'un couple pièce/procédé est un phénomène très peu, voire pas du tout, étudié. Cependant, il parait intéressant dans le contexte actuel de l'industrie manufacturière mondiale, de combiner ces différents paramètres entre eux afin d'avoir une évaluation multicritère du couple pièce/procédé.

Ainsi, les différents verrous que nous avons pu identifier sont les suivants :

- Verrou 1 : Données d'inventaires pour les procédés de fabrication additive pas assez renseignées ;
- Verrou 2 : Les données d'inventaires disponibles pour ces procédés sont essentiellement basées sur l'étape de mise en forme de la pièce et ne prennent pas en compte les autres étapes (pré-process et post-process) ;
- Verrou 3 : L'étude des données d'inventaires des procédés de fabrication additive est focalisée sur la consommation d'énergie électrique. Ce qui implique un manque d'information sur la consommation de matière et de fluide pour ces procédés ;
- Verrou 4 : Combinaison technico-économico-environnemental des procédés de fabrication additive très peu analysée ;

6.2. Positionnement de nos travaux de recherche

Au cours de ce chapitre, il a été montré que :

- ***Le « SEC » n'est pas approprié dès lors que l'on souhaite définir finement le procédé de fabrication :***

Une grande partie des travaux concernant l'analyse environnementale des procédés de fabrication additive sont orientés vers l'acquisition de la consommation d'énergie électrique avec l'expression du « SEC ». Cette unité est utilisée afin de déterminer la consommation d'énergie électrique d'un procédé par kilogramme de matière déposé/projeté et dépend de la géométrie de la pièce utilisée. En effet, certains auteurs comme Mognol (Mognol2006), Baumers (Baumers2010) et Verma (Verma2013) montrent que pour une même machine et une même pièce avec différentes orientations de fabrication, que le « SEC » peut grandement varier. Par conséquent, dès lors que l'on souhaite comparer des procédés ou des machines entre elles, l'utilisation de cette unité perd tout son sens car

celle-ci ne donne aucune information sur les paramètres de fabrication sélectionnés qui permettent d'aboutir à la valeur de « SEC ».

Ainsi, afin de prendre en compte l'influence des différents paramètres de fabrication sur l'impact environnemental pendant l'étape de mise en forme, il devient nécessaire de définir finement le procédé de fabrication. C'est notamment ce qu'a fait Florent Le Bourhis dans ces travaux de thèse en modélisant finement le procédé de dépôt de matière sous énergie concentrée (Le Bourhis,2014).

- ***Il est important de prendre en compte l'ensemble des étapes de fabrication d'une pièce :***

En effet au cours de ce chapitre, nous avons montré que l'analyse environnementale des procédés de fabrication additive dans la littérature sont principalement centrées sur la mise en forme d'un produit. Or, la mise en forme de la pièce n'est pas la seule étape à réaliser afin d'obtenir cette pièce. En effet, d'autres étapes telles que la préparation du fichier, la finition ou encore la transformation de la matière première sont nécessaires afin d'obtenir la pièce finale. Par conséquent, il est primordial de **prendre en compte l'ensemble des étapes de fabrication d'une pièce**.

- ***Il faut considérer l'ensemble des flux entrants et sortants pendant la fabrication d'un produit :***

L'analyse environnementale d'un procédé de fabrication ne peut pas se faire uniquement sur des considérations de consommation d'énergie électrique. En effet, il est nécessaire de prendre en compte l'ensemble des flux de matière et d'énergie intervenant dans l'impact environnemental global afin d'avoir une analyse la plus exhaustive possible. Ainsi, il est nécessaire de **prendre en compte l'ensemble des flux d'énergie et de matières en jeu pendant la fabrication d'un produit**.

- ***La combinaison des données environnementaux avec des données techniques et économiques est très peu étudié :***

Ainsi, nous avons également intégré des données techniques et économiques dans cette méthodologie. En effet, au jour d'aujourd'hui, toutes les décisions dans le monde industriel sont réalisées à la fois sur le plan économique et technique. Ainsi, prendre une décision sur un choix de procédé ou de machine seulement sur le volet environnemental n'est pas suffisant. Il parait donc intéressant de **combiner ces données environnementales avec des données technico-économique** afin d'avoir une vision plus globale lors d'une prise de décision.

Ces travaux montrent qu'à cause d'un manque cruel de données d'inventaires pour les procédés de fabrication additive, on a besoin de **données fiables** afin de caractériser le procédé de fabrication. Il est donc essentiel de mettre en place des modèles prédictifs permettant d'avoir un levier d'action sur tous ces paramètres dès la phase de conception du produit.

Pour cela, nous avons proposé dans ces travaux de thèse une méthodologie d'évaluation multicritère pour les procédés de fabrication additive afin de pouvoir prédire, dès l'étape de conception d'un produit, des informations sur les aspects techniques, économiques et environnementaux du couple pièce/procédé. Afin de proposer aux concepteurs la possibilité d'évaluer un produit dès son étape de conception, il est nécessaire de mettre en place des modèles de consommation fins traduisant le comportement du procédé. Or la création de ces modèles passe par l'acquisition de données fiables au préalable.

Ainsi, la méthodologie d'évaluation est décomposée en deux parties :

- Dans un premier temps nous avons proposé une méthode **d'acquisition des données** où toutes les informations nécessaires à la création de ces modèles sont collectées. Ces informations sont ainsi obtenues à l'aide des différentes **mesures** réalisées aux pieds d'une machine et à des **données extraites** de la littérature. Ces multiples acquisitions sont réalisées une seule fois par machine et à l'issue de ces mesures, il est possible d'obtenir des équations permettant de **modéliser le comportement du procédé de cette machine**.

- Une fois ces modèles connus, il est possible dans un deuxième temps, d'évaluer un couple pièce/procédé pour différent modèle numérique (CAO) en utilisant directement les modèles obtenus précédemment. Les résultats concernant les données d'inventaires (kWh, kg, litres), le coût (euros) et les données techniques (Ra) sont ensuite affichés sur un même graphique.

Cette méthode d'acquisition permet de répondre aux verrous deux, trois et quatre identifiés dans le paragraphe précèdent. Dans la suite de ce manuscrit, nous présenterons la méthodologie d'évaluation multicritère développée dans ces travaux de thèse (figure 2.37) :

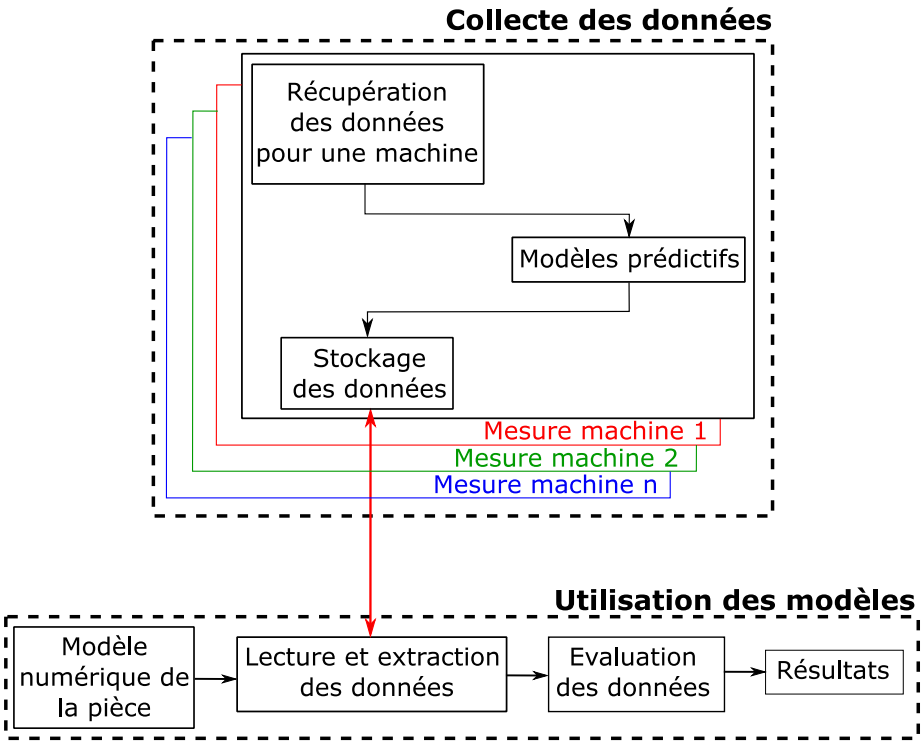


Figure 2.37 - Méthodologie d'évaluation multicritère

Ainsi, la méthode d'acquisition sera présentée dans le chapitre 3 de ce manuscrit. Nous présenterons dans ce chapitre comment les données sont collectées ainsi que l'obtention des modèles mathématiques. Afin d'obtenir ces modèles, il est nécessaire de caractériser localement le procédé de fabrication. Par conséquent, nous présenterons également la décomposition de procédé qui nous a permis d'avoir une vision fine de ce qu'il se passe pendant la fabrication d'un produit.

Dans le chapitre 4 de ce manuscrit, nous développerons la méthode d'acquisition sur des procédés de fabrication additive. Nous nous intéresserons d'abord au procédé d'extrusion de matière avec l'étude des consommations d'électricité de matière et d'eau d'une ligne d'extrusion qui permet de transformer la matière première sous forme de granulés plastiques en bobine de fil. Puis nous

présenterons en détail les expérimentations qui ont été réalisées afin de caractériser chaque étape de mise en forme d'une pièce ainsi que l'écriture des modèles prédictifs pour une machine d'extrusion de matière et de projection de matière afin de démontrer la généricité de la méthodologie. Ces modèles décrivent le comportement électrique des différentes phases des machines. De plus, des modèles permettant d'estimer la consommation de matière et de fluide. Ces modèles environnementaux ont été ensuite combinés avec des modèles techniques et économiques, ce qui rend possible l'évaluation de ces machines en fonction de ces trois critères.

Dans le chapitre 5 de ce manuscrit nous exploiterons les modèles afin de comparer les machines d'extrusion de matière et de projection de matière pour une pièce industrielle. La comparaison de ces machines a été réalisée en fonction des critères techniques, économiques et environnementaux. Le positionnement de ces trois critères sur le même niveau graphique nous a permis de faire un choix de machine permettant un bon compromis entre la minimisation des données d'inventaires, du coût de revient de la pièce et de la qualité de l'état de surface.

Chapitre 3 : Méthodologie d'évaluation multicritère

Sommaire

1	Approche générale	79
2	Modélisation du procédé de fabrication	80
3	Utilisation des modèles	93
4	Synthèse sur la méthodologie	94

Dans le troisième chapitre du manuscrit, nous allons présenter la méthodologie d'évaluation multicritère afin de répondre aux verrous scientifique identifiés dans le chapitre précédent. Ce chapitre est décomposé en trois parties.

Dans la première, nous allons nous intéresser à **l'approche générale** du processus de fabrication conduisant à la réalisation d'une pièce sous sa forme finale. En effet, dans le cadre d'une étude d'analyse de cycle de vie d'un produit, il est important de s'intéresser à toutes les étapes de fabrication d'une pièce.

Dans la seconde partie, nous nous intéresserons plus précisément aux **procédés de fabrication** en proposant **une modélisation** d'un point de vue environnemental. Les impacts environnementaux générés lors de la fabrication d'un produit étant essentiellement dus à l'ensemble des consommations et rejets, c'est cette approche couplant l'ensemble des consommations qui sera présentée dans un premier temps.

Ces **indices de performances environnementaux** sont ensuite couplés à **des données techniques et de coût** dans une troisième partie. Ainsi, c'est cette approche couplant l'ensemble des consommations et rejets aux données technique et de coût qui seront présentées.

Enfin, nous **synthétiserons** sur les apports de cette méthodologie.

1. Approche générale

La méthodologie d'évaluation multicritère des procédés de fabrication qui a été développée durant ces travaux de thèse a pour objectif de lever les verrous scientifiques qui ont été identifiés dans le chapitre précédent.

La production d'une pièce s'effectue généralement par la succession d'étapes permettant la mise en forme d'une pièce finie à partir de matière première. La figure 3.1 illustre l'agencement de ces étapes.

Il est donc nécessaire, lorsque que l'on s'intéresse, entre autre, à la performance environnementale d'un couple pièce-procédé(s), de prendre en compte l'ensemble des étapes nécessaires à fabrication du produit final. Par exemple, il semble peu raisonnable de ne s'intéresser qu'à la mise en forme d'un produit réalisé par fabrication additive sans s'intéresser aux étapes de pré-process et/ou de post-process. En effet, certains procédés de fabrication additive utilisent un matériau support afin de maintenir les zones de la pièce qui sont en porte-à-faux. Ce matériau est par la suite extrait de la pièce manuellement ou automatiquement lors de l'étape de finition et cette dernière étape est bien souvent très énergivore. Ainsi, une vision concentrée exclusivement sur l'étape de mise en forme de la pièce peut conduire à une réduction globale des données d'inventaires et donc à une minimisation des impacts environnementaux.

La prise en compte de l'ensemble des étapes nécessaires à la fabrication d'une pièce va également avoir une influence sur les propriétés mécaniques et le coût de celle-ci. En effet, pour la plupart des procédés de fabrication, l'étape de finition permet d'obtenir la pièce finale aux dimensions et caractéristiques souhaitées. L'ajout de machines supplémentaires pour la réalisation automatique de la finition d'une pièce va fatalement augmenter le coût de revient total.

Par conséquent, il est indispensable de s'intéresser à l'ensemble des étapes de fabrication de la pièce dans une vision complète.

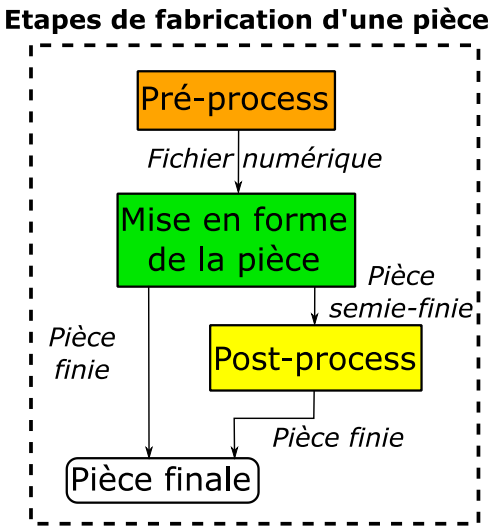


Figure 3.1 - Les différentes étapes de fabrication d'une pièce

Ainsi, la méthodologie que nous proposons est basée sur une connaissance fine des procédés de fabrication. Cette méthodologie s'intéresse à deux aspects primordiaux. Le premier est la prise en compte de l'ensemble des étapes de fabrication d'une pièce et le second, l'évaluation quantitative de

l'ensemble des consommations et rejets du couple pièce-procédé. De plus, nous nous sommes focalisés sur la deuxième étape du cycle de vie d'un produit qui est la fabrication de celui-ci à cause d'un manque cruel de données d'inventaires qui servent à alimenter les bases de données d'analyse de cycle de vie.

Les étapes de fabrication prises en compte dans le cadre de cette analyse sont les suivantes :

- **Etape de pré-process** : Cette étape consiste à transformer le fichier obtenu en sortie du logiciel de CAO, qui est généralement un fichier d'objet 3D, dans le format attendu par le logiciel de préparation de la fabrication. Pour la fabrication additive, le modèle numérique de la pièce est transformé en format STL et est importé dans le logiciel de tranchage afin d'y sélectionner les paramètres de fabrication, la position de la pièce sur le plateau et son orientation. Une fois tous ces paramètres choisis, les trajectoires de fabrication sont générées et sont envoyées à la machine permettant ainsi le début de la mise en forme.

- **Etape de mise en forme de la pièce** : Cette étape consiste, grâce à un ensemble de processus de fabrication, à transformer la matière première en un produit. La pièce en sortie de cette étape n'est pas forcément finie. On parle alors de pièce semi-finie nécessitant une finition afin de respecter les caractéristiques structurelles ou dimensionnelles attendues par le cahier des charges.

- **Etape de post-process** : Cette dernière étape permet d'obtenir la pièce finale aux caractéristiques mécaniques et dimensions attendues. Pour la fabrication additive, cette étape peut être un enlèvement de support ou un traitement mécanique ou chimique afin d'améliorer l'état de surface de la pièce.

La connaissance de l'ensemble des étapes de fabrication est essentielle afin de proposer une vision globale et complète des consommations et rejets associés à la pièce produite. À partir de cette connaissance, il sera ensuite possible de définir une modélisation de chacune de ces étapes d'un point de vue environnemental couplé à des aspects techniques et économiques.

2. Modélisation du procédé de fabrication

La modélisation de chacune des étapes de fabrication est essentielle à l'évaluation des performances environnementales du moyen de production. Des informations sur l'ensemble de ces étapes de fabrication sont disponibles dans les bases de données utilisées pour la réalisation d'analyses de cycle de vie tel que EcoInvent ou le module Solidworks Sustainability. Pour les procédés de fabrication additive, les bases de données de ces outils d'évaluation environnementales sont soit peu renseignées, soit elles utilisent une valeur moyenne globale. Par exemple, les bases de données du module Solidworks Sustainability sont à ce jour dépourvues de données sur la réalisation de pièce plastique en fabrication additive. Pour les procédés dont il existe des données, ces valeurs sont exprimées en kilowattheure par kilogramme de matière utilisée. La figure 3.2 montre un exemple d'affichage des résultats pour le procédé d'extrusion de matière contenue dans le module Solidworks Sustainability.

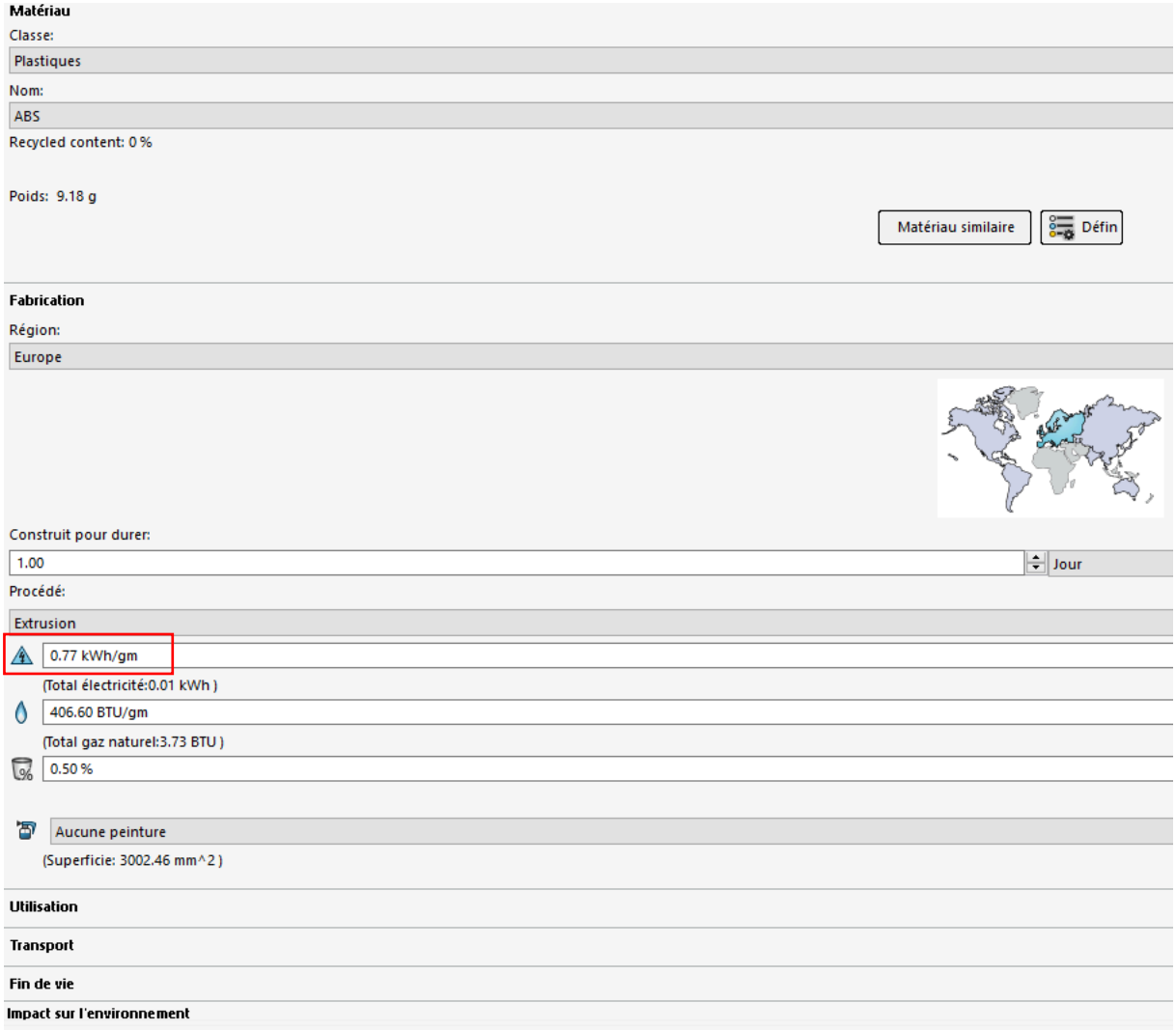


Figure 3.2 - Affichage des résultats sur Solidworks Sustainability

Ainsi, ces outils caractérisent un procédé en fournissant une valeur de consommation énergétique par kilogramme de matière déposée/projetée pour la fabrication additive ou enlevé pour l'usinage. Or cette vision globale du procédé ne donne aucune information sur les différentes étapes de fabrication prise en compte pour justifier cette valeur. De plus, elle ne permet pas de prendre en compte l'influence des paramètres de fabrication sur les données d'inventaires finaux. Par conséquent, ces données sont souvent peu précises voire inexistantes pour certains procédés innovants.

Ainsi, une modélisation fine des différentes étapes de fabrication prenant en compte les paramètres d'entrée de la machine est nécessaire. L'objectif de ce modèle est de pouvoir prédire l'ensemble des données d'inventaires pour n'importe quelle géométrie de pièces.

La modélisation des différentes étapes de fabrication doit être la plus exhaustive possible afin que la traduction des données d'inventaires en impact environnemental soit la plus précise possible. Ainsi, il est nécessaire de prendre en compte l'ensemble des flux d'énergie, de matière et d'information. Avant la mise en place des modèles, il est nécessaire de définir l'ensemble de ces flux qui seront pris en compte. En effet, il est important de définir correctement les limites de l'étude même si la méthodologie propose de prendre en compte l'ensemble des flux intervenant dans la fabrication du produit.

Ainsi, notre intérêt se porte plus particulièrement sur la deuxième étape de l'analyse de cycle de vie d'un produit qui est la réalisation de l'inventaire des flux élémentaires définit par la norme ISO 14040 (*ISO. 14040.*2006) (figure 3.3).

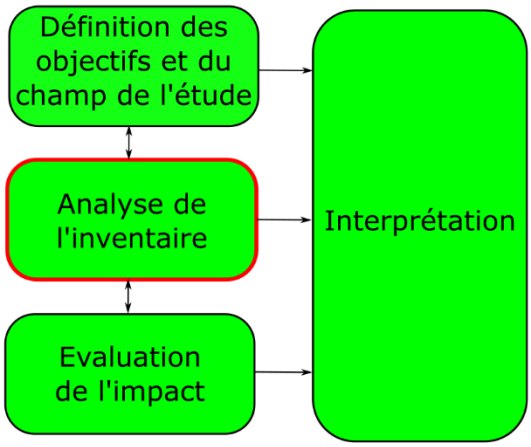


Figure 3.3 - Focalisation sur l'étape d'inventaire des flux élémentaires

La figure 3.4 illustre les limites imposées à l'étude environnementale d'un procédé de fabrication. Les flux entrants et sortants sont décomposables en 3 catégories :

- L'énergie électrique
- La consommation et le rejet de matériaux
- La consommation et le rejet des fluides

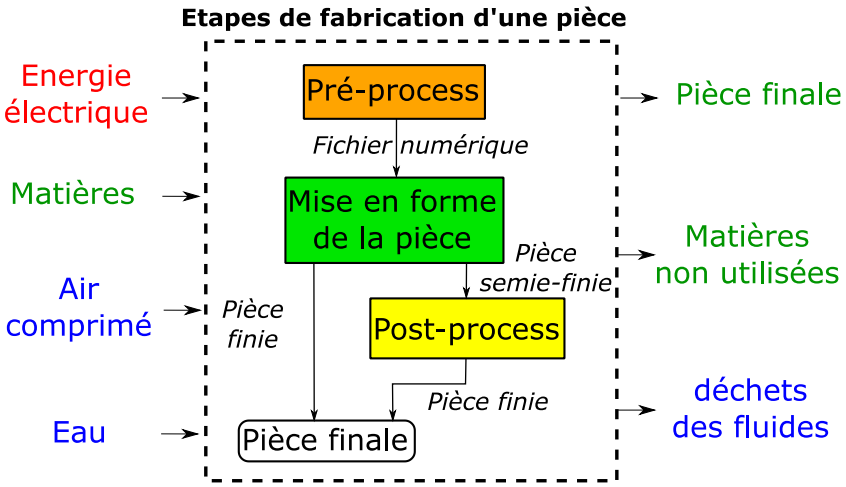


Figure 3.4 - Limites de l'étude

Les limites de l'étude étant définies, il est maintenant possible de définir les données nécessaires à la mise en place de l'évaluation des données d'inventaires du couple pièce-procédé.

2.1. Données requises pour la modélisation

L'objectif dans la suite de ce chapitre est de présenter la méthode d'évaluation multicritère développé dans ces travaux de thèse illustrée par la figure 3.5.

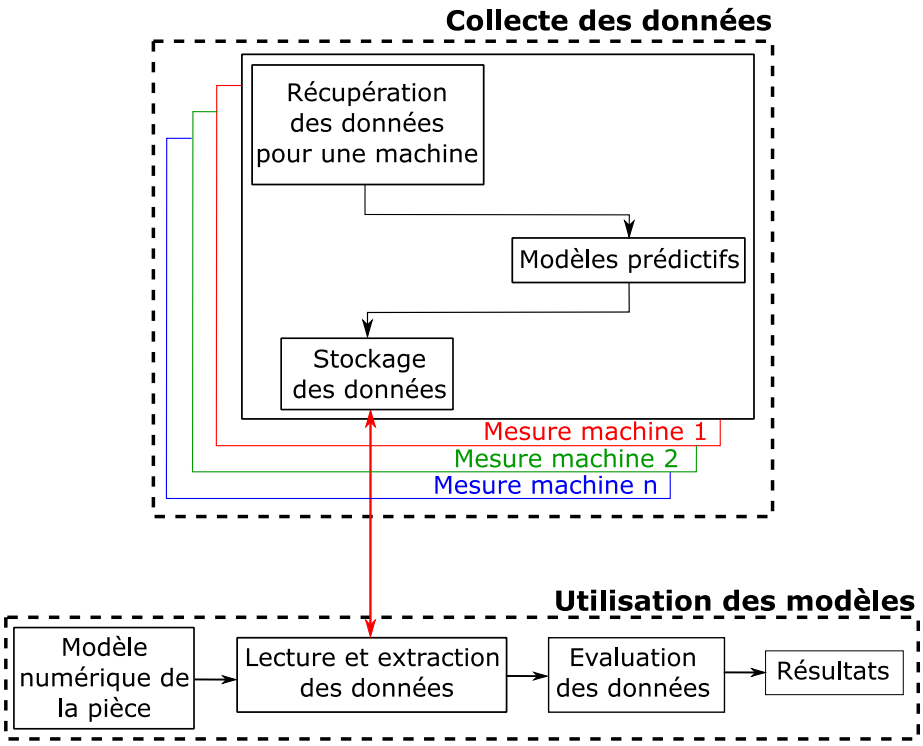


Figure 3.5 - Méthodologie d'évaluation multicritère

Cette méthodologie d'évaluation est décomposée en deux parties, ainsi nous présenterons d'abord la méthode **d'acquisition des données** où toutes les informations nécessaires à la création de ces modèles sont collectées.

Afin de proposer aux concepteurs la possibilité d'évaluer un couple pièce/procédé dès l'étape de conception d'un produit, il est nécessaire de mettre en place des modèles de consommation fins traduisant le comportement du procédé. Ainsi, la création de ces modèles passe par l'acquisition de données au préalable. Dans la suite de cette section, nous présenterons dans un premier temps la méthodologie d'acquisition permettant d'aboutir aux différents modèles puis nous montrerons comment ces modèles sont utilisés.

2.2. Structuration de la méthode d'acquisition des données

La figure 3.6 présente la méthodologie d'acquisition et de caractérisation des données. Dans un premier temps, un ensemble de mesure est réalisé sur une machine afin de collecter toutes les données nécessaires à la création de ces modèles.

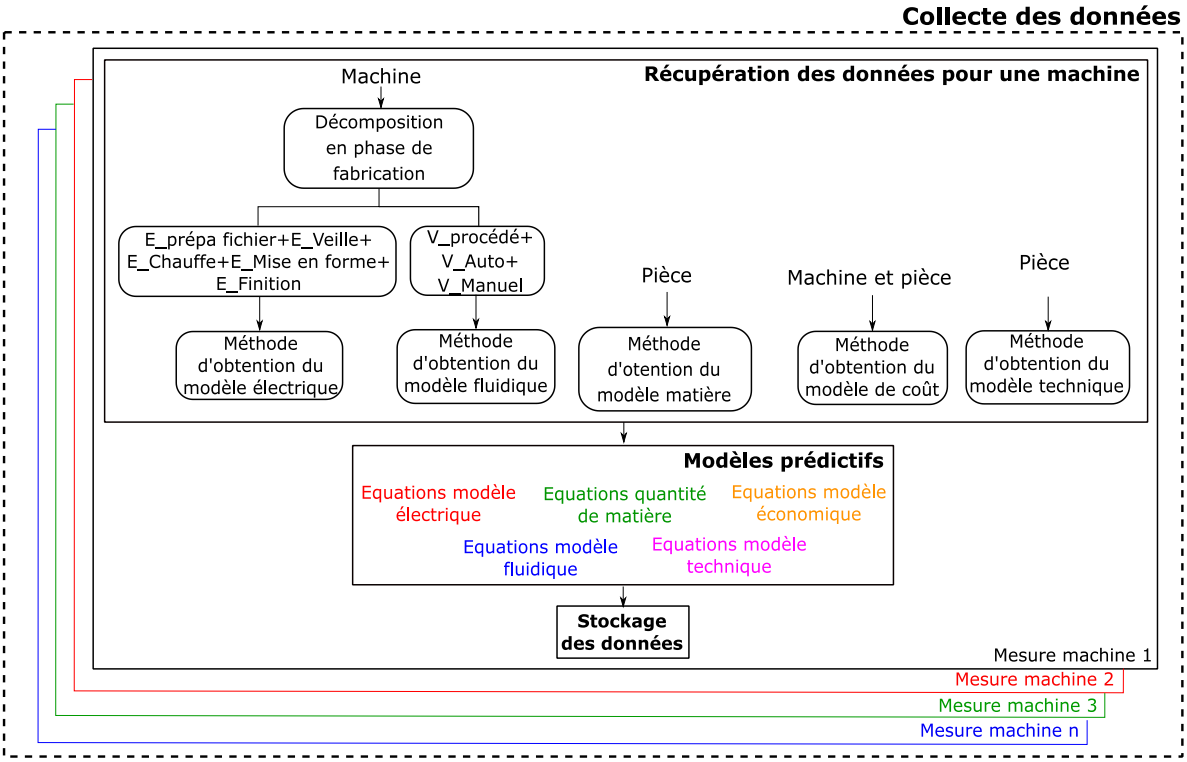


Figure 3.6 - Méthode d'acquisition des données

A l'aide des différentes mesures réalisées aux pieds de la machine et des données extraites de la littérature, il est possible d'obtenir des équations permettant de modéliser le comportement du procédé de fabrication. Ces différentes étapes de mesures sont réalisées une seule fois par machine afin de construire les modèles puis toutes ces équations sont ensuite stockées dans une base de données permettant ainsi leur utilisation/réutilisation pour n'importe quelle forme de pièce. Dans la suite de cette section, la méthodologie sera détaillée pas à pas afin de comprendre la démarche qui a été mise en place permettant d'obtenir les différents modèles mathématiques.

2.3. Méthode d'obtentions des modèles environnementaux

Cette première partie de la méthodologie a été développée afin de lever les verrous scientifiques deux, trois et quatre présentés dans le chapitre deux de ce manuscrit. Comme nous avons pu le montrer dans le chapitre précédent, de nombreux auteurs se sont intéressés à l'analyse des phénomènes environnementaux pendant l'étape de mise en forme de la pièce laissant au dépourvu le pré-process et le post-process. Ainsi, il parait intéressant de proposer une méthode d'acquisition globale prenant en compte l'ensemble des étapes de fabrication afin d'obtenir une modélisation du procédé la plus réaliste possible.

Dans cette première partie, toutes les données nécessaires à la création des modèles sont collectées. On parle alors de méthode pour « alimenter » les modèles. Dans le cadre de cette méthodologie, l'acquisition des données d'inventaires a été réalisée à l'aide de dispositifs de mesures. Ces données sont ensuite traitées afin d'obtenir des modèles prédictifs fiables.

Ainsi, un protocole expérimental a été mis en place présenté dans le tableau 3.1 qui permet d'aboutir à l'établissement des modèles prédictifs.

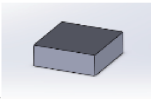
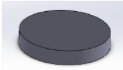
Pièces	Propriétés géométriques	Nombre de Fabrications
1 	Dimension : 30 x 30 x 10 mm	5
2 	Dimension : R = 15 mm, h = 4 mm	2
3	Dimension : 30 x 10 x 10 mm	2
4	Dimension : 10 x 10 x 30 mm	2

Tableau 3.1 - protocole expérimental

Nous avons fait le choix de développer les modèles sur des pièces-test. La géométrie de ces pièces a été sélectionnée de telle sorte que pendant la mise en forme de la pièce, les deux axes X et Y soient sollicités. Les matériaux utilisés pour la fabrication des pièces dépendent du procédé. Ainsi, les pièces sont réalisées plusieurs fois sous les mêmes conditions initiales afin d'avoir des données fiables. Nous avons souhaité fabriquer la première pièce assez de fois afin d'observer la répétabilité du système. Ainsi, la pièce 1 a été réalisée cinq fois. Après la fabrication d'une pièce, un temps de refroidissement des composants de la machine est respecté afin de ré-atteindre la température initiale. Nous avons également fait attention à ce que la température de l'atelier soit la même pendant toute la durée des expériences. Au vu des faibles variations de puissances moyennes observées pendant la fabrication des pièces, nous avons diminué le nombre de fabrication des pièces 2,3 et 4. A titre d'illustration, le tableau 3.2 montre la puissance moyenne de la phase de mise en forme pour les cinq essais de la pièce 1 pour une machine de dépôt de fil fondu (HP designjet 3D). Davantage de détails sur ces résultats seront donnés dans le chapitre 4 de ce manuscrit.

Essai	1	2	3	4	5	Ecart type (W)
Puissance moyenne pendant la mise en forme (W)	85,30	86,42	87,22	87,02	87,04	0,79

Tableau 3.2 - Ecart de puissance en phase de mise en forme

2.3.1. Décomposition des différentes étapes de fabrication

La définition des limites de l'étude a permis de connaître précisément les flux d'entrée et de sortie. Cependant, il est nécessaire d'avoir une vision précise de la façon dont ces flux circulent dans le cycle de fabrication de la pièce. Pour cela, nous avons choisi de décomposer les étapes de fabrication en différentes phases de fabrication. La figure 3.7 illustre la décomposition des étapes de fabrication.

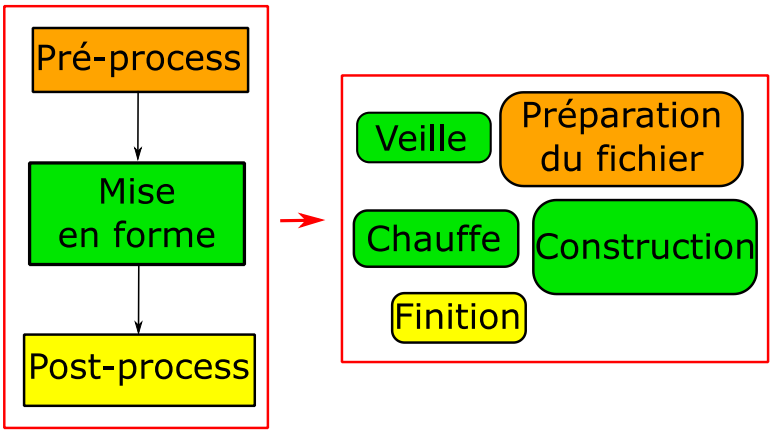


Figure 3.7 - Décomposition des étapes de fabrication

Ainsi, les trois étapes de fabrication sont décomposées en cinq phases de fabrication :

- Préparation du fichier
- Phase de veille de la machine
- Phase de chauffe ou de préparation de la machine
- Phase de construction
- Finition de la pièce

L'un des principaux points de la méthodologie est de combiner une vision globale du procédé de fabrication et une vision locale des différentes phases de fabrication. L'avantage de décomposer un procédé de fabrication en phases de fabrication plutôt qu'en sous-système mécanique (moteurs, buses, axes) est d'avoir une méthode applicable à un ensemble de machines d'un ou plusieurs procédés de fabrication. Ainsi la méthode n'est pas spécifique à une machine en particulier.

La première phase du processus de fabrication est la préparation du fichier CAO. A ce stade, le modèle numérique 3D est chargé dans le logiciel de tranchage afin d'y être préparé (paramètres de fabrication, positionnement des pièces, découpage). La préparation du fichier terminée, ce dernier est transmis à la machine et la mise en forme peut ainsi commencer. La deuxième phase est la chauffe de la machine. Cette phase peut également être vue comme un mode de préparation. En effet, avant de procéder à la mise en forme des pièces, certains composants de la machine doivent être chauffés pour que la transformation du matériau se fasse correctement. C'est le cas pour les procédés de fabrication additive qui nécessitent une élévation de température afin de pouvoir traiter le matériau. Enfin, lorsque la préparation est terminée, l'étape de construction peut commencer. Certaines pièces peuvent nécessiter une finition après la construction. Cette dernière phase de fabrication concerne la plupart des procédés de fabrication et est bien souvent effectuée par un appareil externe pour les procédés de fabrication additive. Par conséquent, il est nécessaire de se concentrer également sur les équipements périphériques qui sont essentiels à la bonne réalisation de la pièce. Enfin, la dernière phase de mise en forme est la veille. Dans ce mode, la machine est allumée mais tous les composants participant à la transformation du matériau sont hors tension.

L'objectif suivant sera d'associer à chaque phase de mise en forme une consommation d'énergie électrique, de matières et de fluides consommées, mais également une durée à chaque phase afin de créer les modèles. Ainsi, l'acquisition de la consommation d'énergie électrique est réalisée grâce à des instruments de mesures.

2.3.2. Méthode d'obtention du modèle électrique

L'identification des différentes phases de mise en forme permet d'obtenir une formule générique pour la consommation totale d'énergie électrique lors de la fabrication d'une pièce (équation 3.1) qui est la somme de l'énergie électrique de chaque phase :

$$E_{Totale} = E_{Préparation_fichier} + E_{Veille} + E_{Chauffe} + E_{Construction} + E_{Finition} \quad (3.1)$$

Où $E_{Préparation\ fichier}$ est l'énergie électrique associée à la préparation du fichier CAO, E_{Veille} est l'énergie électrique associée à la phase de veille, $E_{Chauffe}$ est l'énergie électrique associée à la phase de chauffe des composants, $E_{Construction}$ est l'énergie électrique associée à la phase de construction de la pièce et enfin $E_{Finition}$ est l'énergie électrique associée à la phase de finition de la pièce.

Au cours de cette thèse, nous avons été amenés à faire des essais d'acquisition de données sur des machines de certains laboratoires partenaires et industriels. Ainsi, une valise permettant de transporter en toute sécurité tout le matériel d'acquisition a été conçue et réalisée. La figure 3.8 illustre la mallette d'acquisition.

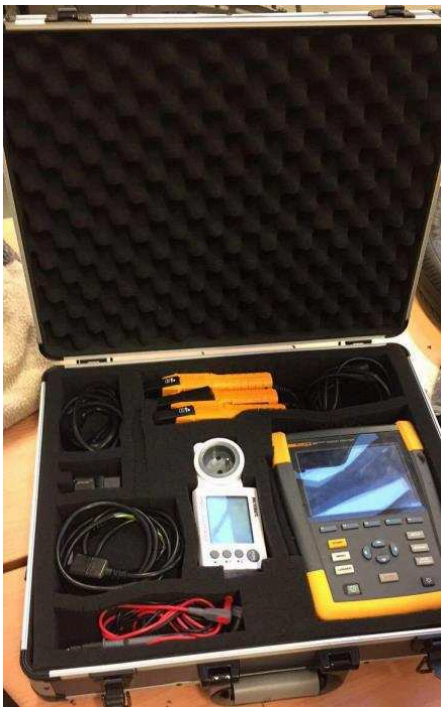


Figure 3.8 - Mallette d'acquisition

Les mesures d'énergie électrique sont effectuées avec un analyseur de réseau de marque Fluke 434-2 avec une précision de lecture de 0.5%. La figure 3.9 illustre le dispositif de mesure mis en place afin de faire l'acquisition de l'énergie électrique.

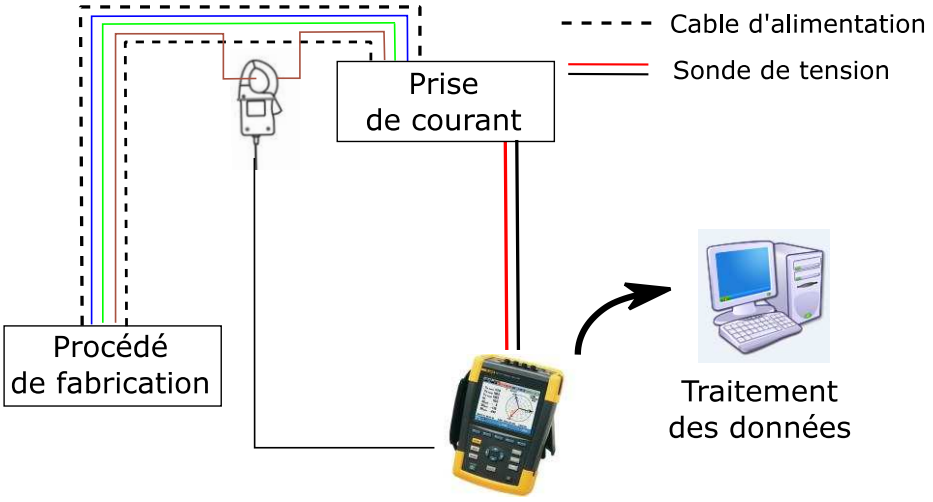


Figure 3.9 - Dispositif de mesure

La sonde de tension est branchée dans la prise de courant afin de mesurer la valeur de tension en temps réel. La pince de courant est directement branchée dans le câble d'alimentation dénudé de la machine. Ce capteur de courant a une précision de lecture de 1% et une résolution de ± 1 mA. Par conséquent, la perte d'énergie due au transformateur électrique est prise en compte pour l'étude de l'énergie électrique. La puissance instantanée est calculée directement par l'analyseur de réseau en multipliant la tension efficace, le courant efficace et la valeur du facteur de puissance. Toutes les données sont ensuite enregistrées et traitées sur ordinateur.

La figure 3.10 montre les différentes étapes d'obtention du modèle électrique en partant de la machine jusqu'aux équations dans l'ordre chronologique.

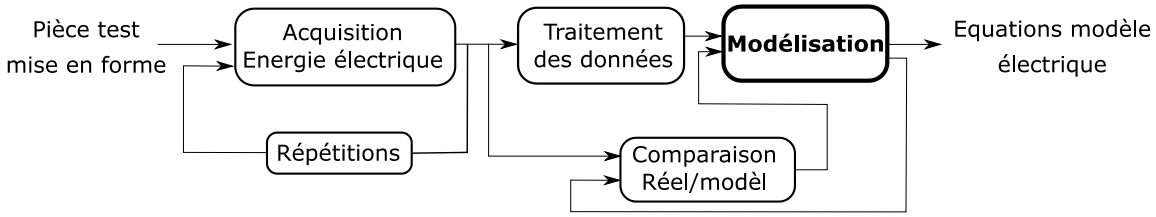


Figure 3.10 - Méthode d'obtention du modèle électrique

L'acquisition de la consommation d'énergie électrique se fait pendant les 3 étapes de fabrication (pré-process, mise en forme, post-process). Ainsi, l'acquisition commence pour la pièce 1 du tableau 3.1 dans un premier temps et est réalisée pour chaque phase de mise en forme autant de fois que le nombre de pièces fabriquées.

L'intérêt ici d'avoir fabriqué la première pièce autant de fois est de voir si pour une pièce réalisée dans les mêmes conditions initiales, les valeurs de puissance moyennes des différentes phases restent constantes. Il s'avère que les différents procédés étudiés dans le cadre de cette thèse ont montré une très bonne stabilité en matière de puissance en jeux pendant les étapes de fabrication d'une pièce. C'est pour ces raisons que nous avons décidé par la suite de diminuer le nombre de pièces à réaliser pour les autres géométries.

Toutes ces données acquises sont ensuite traitées afin d'avoir des valeurs moyennes de puissance et de durée pour chaque phase et ainsi être implémentées dans le modèle électrique. Enfin, les valeurs entre le réel et le modèle électrique sont comparées permettant de tester la robustesse du modèle. Les systèmes étudiés étant plutôt stables, les écarts sont acceptables.

Ces étapes sont ensuite réitérées sur d'autres géométries de pièces afin d'observer le comportement de la consommation d'énergie électrique lorsque les axes de la machine se déplacent différemment.

2.3.3. Méthode d'obtention du modèle fluidique

L'évaluation de la consommation de fluides pour les procédés de fabrication additive est une donnée souvent manquante lors de l'analyse environnementale de l'étape de fabrication (verrou 3 dans le chapitre deux). Dans la méthodologie développée, cette consommation est prise en compte. Pour cela, il est nécessaire de distinguer l'ensemble des sources de fluides susceptibles d'être consommées ou non lors de la production de la pièce.

En effet, on peut distinguer d'une part les fluides consommés pendant la phase de mise en forme du produit. C'est le cas des gaz inertes utilisés par exemple dans le procédé de projection de poudre ou des fluides tels que les lubrifiants utilisés en usinage. Dans les deux cas, ces fluides sont essentiels au bon fonctionnement du procédé et donc à la réalisation du produit. La consommation de ces fluides dépend de la géométrie et des dimensions de la pièce produite. Il est donc possible de relier leur consommation avec le temps de fabrication si l'on connait le débit associé à ces fluides.

D'autre part, il y a les fluides consommés pendant la phase de finition de la pièce. C'est le cas pour certains procédés de fabrication additive de matières polymères qui utilisent un matériau soluble pour générer le support de la pièce. C'est le cas pour le procédé de dépôt de fil fondu où la pièce semi-finie est trempée dans un bain de soude permettant ainsi la dissolution de la matière support. Dans ce cas, le volume de solution compris dans le bain dépend du volume de la pièce produite. On parle alors dans ce cas d'une finition « automatique », dans le sens où l'utilisateur a très peu d'opérations manuelles ou techniques à réaliser pour obtenir la pièce finie.

La finition peut également être manuelle. C'est le cas pour le procédé de jet de matière où une surépaisseur de matière support est volontairement laissée. Ce surplus de matière sur le produit peut être ensuite enlevé tout simplement avec de l'eau sous pression.

La figure 3.11 illustre les différentes étapes d'obtention du modèle de consommation de fluide. Comme pour les modèles électriques, l'obtention de ces modèles passe par une étape d'acquisition des données, de répétitions et de traitement de données.

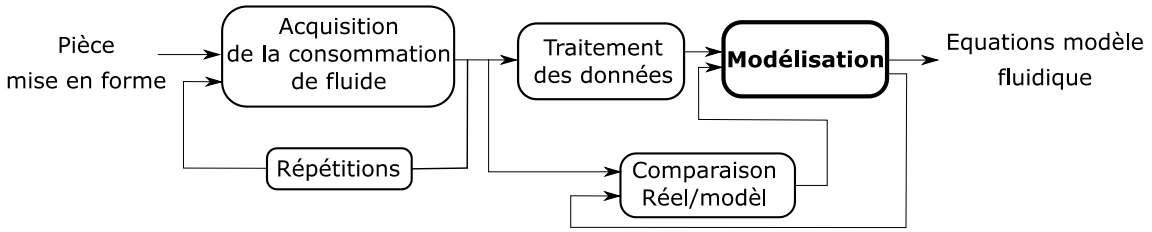


Figure 3.11 - Méthode d'obtention du modèle de consommation de fluide

Ainsi, la consommation totale de fluide est estimée selon l'équation (3.2) :

$$
\begin{aligned}
V_{Totale} &= V_{Procédé} + V_{Auto} + V_{Manuel} \\
V_{Procédé} &= d_{Gaz} \ \text{x} \ t_{Gaz} + d_{Eau} \ \text{x} \ t_{Eau} \\
V_{Auto} &= V_{(\text{Eau finition automatique})}(V_{Pièce}) \\
V_{Manuel} &= V_{(\text{Eau finition manuelle})}(d_{Pompe}, t_{Opération})
\end{aligned}
\tag{3.2}
$$

Dans cette équation d_{Gaz} et d_{Eau} sont respectivement le débit de gaz ($kg.s^{-1}$) et le débit d'eau ($l.s^{-1}$). Les deux durées t_{Gaz} et t_{Eau} sont respectivement la durée où le gaz et l'eau sont activés. Comme exprimé précédemment, la consommation de fluide au cours de la finition peut être mesurée de deux manières différentes. Si la finition est automatique, le volume de fluide dépend du volume de la pièce ($V_{Pièce}$). Si l'étape de post-traitement est manuelle, le volume de fluide dépend du débit de la pompe (d_{Pompe}) et du temps de manipulation associé ($t_{Opération}$) pour l'opération.

2.3.4. Méthode d'obtention du modèle de consommation de matière

La consommation de matière première est bien évidemment une source d'impacts environnementaux liée au procédé de fabrication. Cependant, l'étude de cette source de consommation n'est pas toujours étudiée pour les procédés de fabrication additive (verrou 3 du chapitre deux). Il est donc nécessaire de pouvoir déterminer et surtout de prendre en compte cette consommation dans une méthodologie d'évaluation multicritère ayant une composante environnementale.

Pour les procédés par ajout de matière, la consommation de matière est due à deux sources. La première est la matière nécessaire à la fabrication de la pièce. La deuxième est la matière support nécessaire au maintien en position des zones de la pièce qui sont en porte à faux. Cette matière est supprimée pendant la phase de finition.

Dans une optique de comparaison de procédés, la prise en compte de la consommation de matière est primordiale. En effet si le concepteur doit faire un choix de procédé afin de minimiser au maximum la masse de la pièce, il parait intéressant d'avoir ces informations.

La figure 3.12 illustre les différentes étapes d'obtention du modèle de consommation de matière.

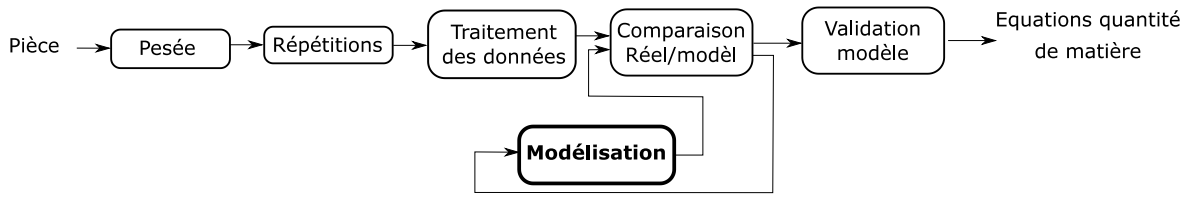


Figure 3.12 - Méthode d'obtention du modèle de consommation de matière

Dans ce cas, on part de la masse réelle de l'objet afin de trouver le modèle qui minimisera l'écart entre la masse réelle et la masse estimée.

Ainsi, un modèle empirique est utilisé dans cette méthodologie afin de prédire la consommation de matière selon l'équation 3.3.

$$
\begin{aligned}
M_{Totale} &= M_{Pièce} + M_{Support} \\
M_{Totale} &= \rho_{Pièce} \ \text{x} \ V_{Pièce} + \rho_{Support} \ \text{x} \ V_{Support}
\end{aligned}
\tag{3.3}
$$

Où $\rho_{Pièce}$ et $\rho_{Support}$ sont respectivement la densité du matériau utilisé pour la mise en forme de la pièce et le matériau utilisé pour générer le support. $V_{Pièce}$ et $V_{Support}$ le volume associé à la pièce et au support. L'information sur le volume de la pièce est facilement obtenue à l'aide du fichier CAO et la densité du matériau connue à l'aide des informations contenues dans les bases de données de certains logiciels tels que CES EduPack ou dans certaines fiches techniques des matériaux.

2.4. Méthode d'obtention des modèles économiques et techniques

La combinaison des critères techniques économiques et environnementaux est très peu analysée pour les procédés de fabrication additive (verrou 4 du chapitre deux). Ainsi, la méthodologie développée prend en compte ces trois critères lors de l'évaluation du couple pièce/procédé. Le niveau de détail des trois critères est le même. Ainsi, il est possible de proposer un outil de visualisation graphique qui permettra de faire un choix de machines selon le critère que le concepteur souhaite mettre en avant.

Pour le modèle de coût de revient du produit, une formule empirique a été utilisée. Enfin, les modèles de propriétés mécanique de la pièce ont été extraits de la littérature.

2.4.1. Méthode d'obtention du modèle de coût

L'estimation du coût de revient d'une pièce en fonction des paramètres de fabrication de cette dernière est une étape intéressante à réaliser. Comme nous avons pu le voir dans le chapitre précédent, il existe de nombreux modèles de coûts dans la littérature. Ainsi le modèle de coût qui a été développé dans le cadre de cette thèse s'inspire de ces modèles.

L'estimation du coût total se fait à l'aide de l'équation (3.4). Les trois sources de consommation, en matière de coût, sont liées au coût de l'équipement, de la matière et du personnel.

$$\text{Coût}_{\text{Total}} = \text{Coût}_{\text{Equipement}} + \text{Coût}_{\text{Matière}} + \text{Coût}_{\text{Personnel}} \quad (3.4)$$

Le coût lié à l'équipement (équation 3.5) prend en compte le coût de la machine, l'amortissement par an et le nombre d'heures d'utilisation de la machine par an. En utilisant ces données, un coût horaire est calculé à l'aide de l'équation 3.6. Enfin, le coût horaire est multiplié par le temps de fabrication de la pièce afin de connaitre le coût lié à l'équipement. Nous avons considéré que l'amortissement de la machine est réalisé sur cinq ans dans ce modèle (équation 3.7) :

$$\text{Coût}_{\text{Equipement}} = \text{Coût}_{\text{Horaire}} \text{ x } T_{\text{Mise en forme}} \quad (3.5)$$

$$\text{Coût}_{\text{Horaire}} = \frac{\text{Amortissement}}{\psi} \quad (3.6)$$

$$\text{Amortissement} = \frac{\text{Coût}_{\text{Machine}}}{\text{cinq}} \quad (3.7)$$

$T_{Mise\ en\ forme}$: Temps de fabrication de la pièce ;

ψ : Nombres d'heures d'utilisation de la machine par an ;

Le coût lié à la consommation de matière (équation 3.8) utilisé lors de la fabrication prend en compte la masse de matériau utilisée pour la pièce et le support et du prix par kg pour les deux types de matériaux.

$$\text{Coût}_{\text{Matière}} = \text{Masse}_{\text{Pièce}} \text{ x Prix/kg}_{\text{Pièce}} + \text{Masse}_{\text{Support}} \text{ x Prix/kg}_{\text{Support}} \quad (3.8)$$

Enfin, le coût du personnel (équation 3.9) prend en compte le coût horaire pour un opérateur et la durée pendant laquelle l'opérateur travaille pendant les phases de préparation du fichier et de finition. Dans cette étude, le coût de l'opérateur est de 53,25 euros par heure.

$$\text{Coût}_{\text{Personnel}} = \text{Coût}_{\text{Opérateur}} \text{ x } (\mu + \eta) \quad (3.9)$$

μ : Temps mis par l'opérateur à réaliser la phase de préparation de fichier ;

η : Temps mis par l'opérateur à réaliser la phase de finition ;

Ce modèle de coûts représente une estimation des coûts bruts. Aucune marge n'est appliquée dans ce calcul.

2.4.2. Méthode d'obtention du modèle technique

Dans le cadre de cette thèse, nous avons décidé de nous concentrer d'abord sur l'état de surface des pièces produites par un procédé de fabrication additif et notamment pour le procédé de dépôt de fil fondu qui fait partie d'un des procédés les plus utilisés à ce jour. Les sept procédés de fabrication additive sont techniquement différents dans la fabrication d'une pièce (*ISO 17296-2.* 2015), ainsi, la caractérisation de l'état de surface n'est pas la même d'un procédé à l'autre.

L'idée est donc d'extraire de la littérature une formule permettant de prédire la rugosité arithmétique (Ra) d'une pièce en fonction de l'angle de dépôt et de la hauteur de couche pour chaque procédé de fabrication additive afin d'évaluer son état de surface.

La formule retenue provient du travail effectué par Boschetto et Al (Boschetto, Giordano and Veniali, 2013). L'équation 3.10 montre la formule pour prédire la rugosité arithmétique d'une pièce réalisée par dépôt de fil fondu :

$$\text{Ra} = \frac{\text{L}.\csc(\alpha)}{9.\sqrt{3}} \quad (3.10)$$

Dans cette équation, L est la hauteur de la couche en millimètre et α est l'angle de dépôt en degré.

2.4.3. Synthèse sur la méthode d'acquisition

Dans cette section, nous avons présenté la méthodologie d'acquisition et de caractérisation des données d'un procédé de fabrication additive. Cette première partie permet ainsi de répondre à un des verrous scientifiques identifiées dans le chapitre précèdent qui est la nécessité d'avoir des données d'inventaires fiables et homogènes.

En effet, cette méthodologie permet de palier à la problématique des travaux sur l'analyse environnementale des procédés qui sont exclusivement focalisés sur l'étape de fabrication d'un produit laissant de côté les consommations et rejets générées par les étapes de pré-process et de post-process (verrou 2). L'autre problématique levée par cette méthodologie est la prise en compte de l'ensemble des flux entrants et sortants pendant les trois étapes de fabrication d'une pièce (verrou 3).

Nous avons montré dans le chapitre précédent que la combinaison des indices de performances environnementaux avec les données techniques et économiques d'un produit est très peu étudiée (verrou 4). Or les produits étant bien souvent évalués par le triptyque coût-qualité-délai dans le monde industriel, il est intéressant de combiner ces aspects avec le volet environnemental afin de répondre aux enjeux environnementaux du futur. Ainsi, nous avons proposé une méthodologie qui permet de combiner les données d'inventaires avec des données techniques et économiques d'un produit permettant ainsi de lever le verrou 4 du chapitre 2.

3. Utilisation des modèles

L'acquisition de toutes ces données, qu'elles soit relevées pendant les différentes étapes de fabrication de la pièce ou extraites de la littérature, permet d'obtenir les différents modèles prédictifs liés à la caractérisation multicritère d'un procédé de fabrication. Ces modèles peuvent ensuite être exploités dans un second temps. Les données acquises sont rassemblées dans une base de donnée afin que n'importe quel utilisateur puisse utiliser le modèle, avec facilité, en entrant uniquement les données fournies par le logiciel de génération de trajectoire (tranchage) ou le logiciel de CAO. Ainsi, les données que l'utilisateur a à entrer dans le démonstrateur informatique sont les suivantes :

- La durée totale de fabrication estimée par le logiciel de génération de trajectoire ;
- La durée qu'estime mettre l'utilisateur à préparer le fichier et à faire la finition de la pièce ;
- Le volume de la pièce et la masse volumique des matériaux utilisés lors de la mise en forme ;
- La hauteur de couche pour les procédés de fabrication additive ainsi que l'angle de fabrication pour la zone étudiée ;

Une fois tous ces paramètres rentrés, les données correspondantes à la machine utilisée sont extraites de la base de donnée afin d'évaluer la pièce que l'on souhaite réaliser. Ainsi, les modèles permettent d'évaluer un produit de n'importe quelle forme en fonction des différents critères étudiés dans cette méthodologie et ceci dès la phase de conception.

3.1. Affichage des résultats

Finalement, la dernière étape de la méthodologie est l'affichage des résultats grâce à l'outil de visualisation graphique. Ces résultats sont affichés simultanément sur un seul et unique graphique. La figure 3.13 illustre un exemple d'affichage des résultats. L'outil numérique utilisé dans le cadre de cette thèse est Matlab r2017a.

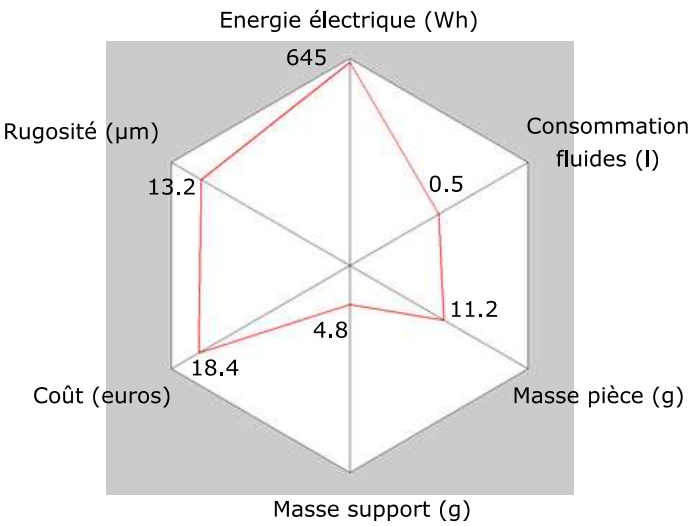


Figure 3.13 - Exemple d'affichage de résultats

L'outil numérique permet également d'afficher les résultats de plusieurs machines sur un même graphe, permettant ainsi à l'utilisateur de faire un choix en fonction des critères qu'il souhaite mettre en avant.

4. Synthèse sur la méthodologie

Dans ce chapitre nous avons présenté la structure générale de la méthodologie qui a été développée durant ces travaux de thèse. Cette méthodologie a pour objectif de lever les verrous scientifiques qui ont été identifiés dans le chapitre précédent. Cette méthodologie permet ainsi de:

1. Prendre en compte l'ensemble des étapes de fabrication nécessaires à la production d'une pièce (verrou 2).

2. Prendre en compte l'ensemble des flux d'énergies, de matières et de fluides utilisés pendant les différentes étapes de fabrication identifiées (verrou 3).

3. Combiner les indices de performances environnementales avec des données techniques et économiques du couple pièce-procédé (verrou 4).

4. D'évaluer le couple pièce-procédé selon les critères environnementaux, technique et de coût dès la phase de conception.

La méthodologie proposée répond à l'ensemble des contraintes imposées par l'analyse environnementale d'un procédé de fabrication. Elle associe à la fois une vision globale du procédé de fabrication et une vision locale associée aux différentes phases de fabrication. Le couplage de ces indices de performances environnementaux aux caractéristiques techniques et de de coûts d'une pièce permet ainsi d'évaluer un couple pièce-procédé en fonction des critères de coût, de qualité et de délai avec une composante d'analyse environnementale.

Dans le chapitre suivant, nous allons voir de quelle manière, il est possible d'obtenir les différents modèles techniques économiques et environnementaux en appliquant cette méthodologie au procédé de fabrication additive et en particulier aux technologies d'extrusion de matière et de jet de matière.

Chapitre 4 : Application aux procédés de fabrication additive

Sommaire

1	Introduction aux machines étudiées	98
2	Transformation du granulé plastique en bobine de fil	100
3	Fabrication par extrusion de matière	109
4	Fabrication par projection de matière	120
5	Stockage des données	128
6	Synthèse	129

Dans ce chapitre, la méthodologie présentée précédemment sera appliquée aux procédés de fabrication additive. Nous verrons comment les différents modèles prédictifs ont été mis en place à l'aide de la méthodologie d'acquisition et de caractérisation des données.

Ainsi, les **machines étudiées** seront présentées dans une **première partie**.

Afin d'évaluer un procédé selon la vision globale d'analyse de cycle de vie, nous allons nous intéresser **dans une deuxième partie**, à l'analyse environnementale de la **transformation de la matière première sous forme bobine de fil pour le procédé d'extrusion de matière**.

Dans une **troisième partie**, nous **évaluerons** en détaille, **les performances technico économico environnementales** d'une des **machines d'extrusion de matière** en utilisant des modèles analytiques ou empiriques.

Dans une **quatrième partie**, nous présenterons **les résultats** obtenus pour une machine de projection de matière. Ces travaux menés permettent de mettre en évidence la **généricité de la méthodologie**.

Nous discuterons dans une **cinquième partie** du **stockage des données** une fois que celle-ci sont **collectées**.

La **dernière partie** de ce chapitre permettra de synthétiser nos travaux.

1. Introduction aux machines étudiées

La méthodologie présenté dans le chapitre précédent a été appliquée sur le procédé d'extrusion de matière, de projection de matière et de fusion sur lit de poudre. Ainsi, nous avons appliqué et validé la méthodologie au total sur neuf machines différentes, allant de la machine de bureau (moyenne gamme) à des machines industrielles (haute gamme). Le tableau 4.1 illustre les différentes machines étudiées dans le cadre de cette thèse.

Code	Machine	Procédé	Année d'acquisition
FDM1	Makerbot replicator 2X		2014
FDM2	Rapman 3.2		2011
FDM3	Stratasys Mojo	Extrusion de matière	2012
FDM4	HP designjet 3D		2010
FDM5	Dimension Elite		2009
JET1	Objet 30 pro		2012
JET2	Objet260 connex	Projection de matière	2011
JET3	Objet350 connex		2012
SLS	ProX DMP 100	Fusion sur lit de poudre	2011

Tableau 4.1 - les différentes machines utilisées

Dans la suite de cette section, nous allons présenter pas à pas les différentes étapes de la méthodologie en nous focalisant sur deux machines. Nous avons fait le choix de détailler les résultats pour la **Designjet 3D de HP** qui est une machine d'extrusion de matière de typologie industrielle et l'**Objet 30 pro** qui est une machine de projection de matière (figure 4.1). Par conséquent, nous proposerons des modélisations fines de l'ensemble des phases de fabrication pour des produits obtenus avec ces machines en commençant par le procédé d'extrusion de matière.

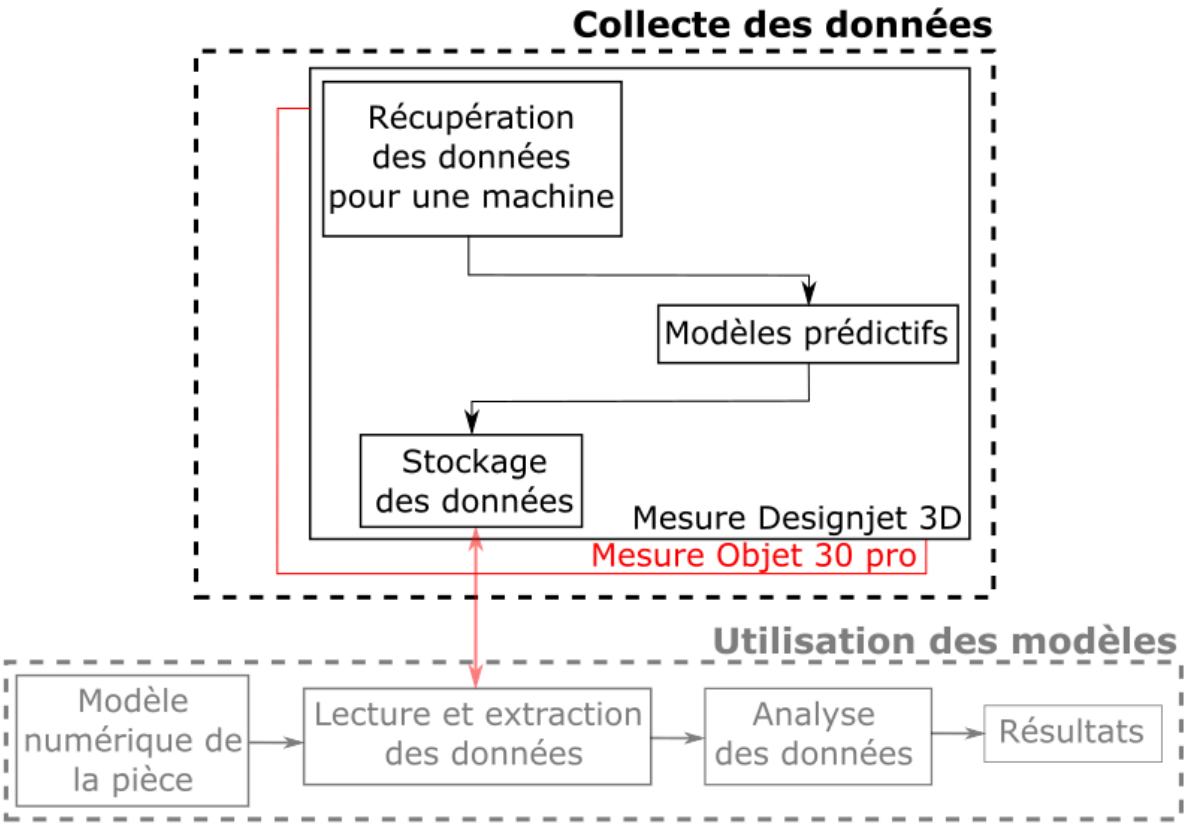


Figure 4.1 - Méthodologie d'évaluation multicritère appliquée aux deux machines de fabrication additive

Dans la suite de ce chapitre, nous présenterons en détail les résultats obtenus pour les différentes pièces de la méthodologie afin de mettre en place les modèles prédictif (tableau 3.1). Comme nous avons pu le voir au chapitre 1, les phases prises en compte dans le cadre d'une analyse du cycle de vie d'un produit sont au nombre de quatre. On retrouve alors la phase d'extraction des matières premières, la phase de fabrication des pièces, la phase d'utilisation de ces pièces et enfin la phase de fin de vie. Pour un produit mis en forme par extrusion de matière, la phase de fabrication se décompose en trois phases, la préparation du fichier, la mise en forme de la pièce ainsi que la finition si la pièce en a besoin. Il est donc naturel de prendre en compte ces trois phases car ils représentent les phases de fabrication de la pièce. Afin d'aller plus loin dans la démarche de prise en compte des aspects environnementaux lors de la fabrication d'un produit par extrusion de matière, nous nous sommes également intéressés aux données d'inventaires générés par la transformation des granulés plastiques en bobine de fil. En effet, la majorité des travaux sur la transformation de la matière première étant essentiellement orientée vers l'atomisation de la poudre métallique, il parait également intéressant d'avoir des données sur la mise en fil des bobines plastiques pour le procédé d'extrusion de matière. La figure 4.2 illustre les différentes phases de fabrication considérées pour les 5 machines d'extrusion de matière.

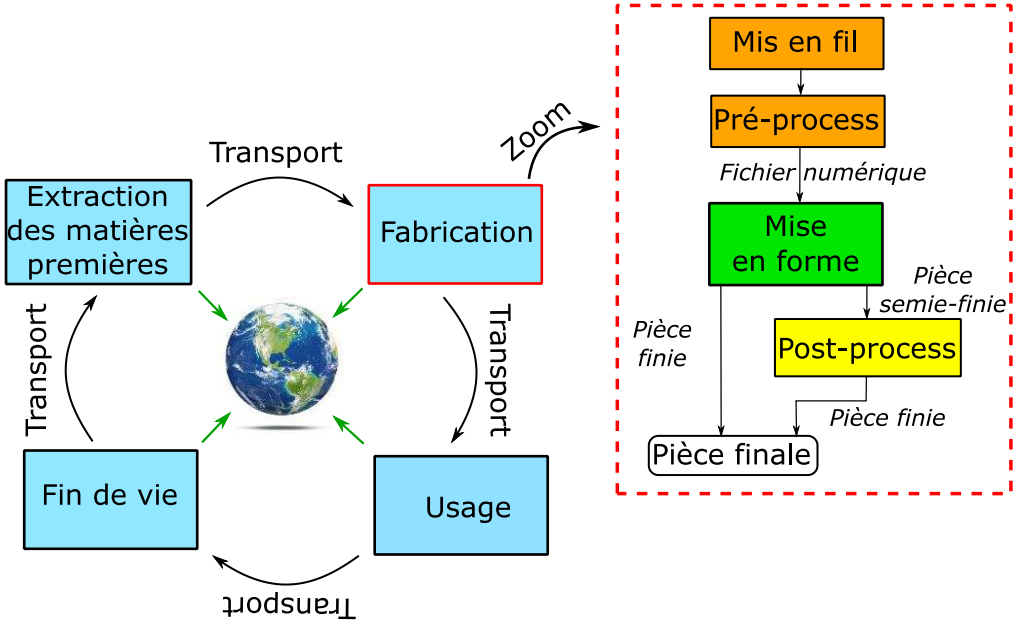


Figure 4.2 - Focus sur l'étape de fabrication

Les modèles numériques développés pour modéliser le comportement des étapes de fabrication seront construits à partir de modèles empiriques ou analytiques. L'ensemble de ces modèles permettent l'évaluation des données d'inventaires associées à des données techniques et économiques d'une pièce à partir de son modèle numérique.

2. Transformation du granulé plastique en bobine de fil

La transformation de la matière plastique, initialement sous forme de granulés, en bobine de fil, est une étape importante lors de la fabrication d'un produit par extrusion de matière car elle sert de matière première pour ce procédé. Néanmoins cette étape est souvent négligée lors de la réalisation d'analyse de cycle de vie pour des produits réalisés par extrusion de matière. En effet, on peut trouver dans les base de données des informations allant de l'extraction de la matière première jusqu'à sa transformation sous forme de granulés plastiques. En revanche, aucune donnée n'est disponible sur la transformation du granulé en bobine de fil plastique. C'est pour ces raisons qu'il est intéressant de quantifier les données d'inventaires générées par cette étape.

De plus, dans le chapitre 2 de ce manuscrit, nous avons montré que l'étude des impacts environnementaux associé à l'atomisation de la poudre est importante car elle est souvent vue comme une étape énergivore. Par conséquent, il semble également judicieux d'observer la part de consommation et des rejets pour la transformation du granulé plastique en bobine de fil.

Le principe de mise en œuvre pour les matériaux thermoplastiques et thermodurcissables ne sont pas les mêmes. Dans notre cas nous nous somme intéressés exclusivement à la transformation de la matière pour les matériaux thermoplastiques qui est généralement faite par extrusion. Les thermodurcissables ne se mettent pas en fil, ils sont mis en forme à l'état liquide. Le procédé

d'extrusion le plus connu est l'extrusion monovis qui sert à fabriquer des pièces de grande longueur comme des tubes, des tuyaux, ou des produits semi-finis comme des profilés.

2.1. Principe

La transformation du granulé plastique en bobine de fil consiste en une succession d'étapes permettant de faire passer le matériau brut sous forme de granulés à l'état de fil plastique enroulé autour d'une bobine. La première étape consiste à étuver le granulé plastique afin d'éliminer l'humidité contenue dans le matériau. La matière est ainsi placée dans une cuve qui est chauffée pendant une certaine durée en fonction du matériau utilisé. Cette étape est indispensable à la bonne réalisation du produit final car le granulé plastique doit être impérativement sec avant sa transformation. Si cette étape n'est pas correctement réalisée, la qualité du produit final sera dégradée.

Une fois le séchage des granulés plastique effectué, la matière est placée dans l'extrudeuse. Le schéma de principe d'une extrudeuse monovis est présenté figure 4.3. Celle-ci comporte une vis sans fin V qui tourne à l'intérieur d'un fourreau cylindrique F, régulé en température par des systèmes de chauffe et de refroidissement. Le polymère sous forme solide (granulés) est introduit dans la trémie T située à une extrémité de la machine. La principale fonction de l'extrudeuse est de convoyer le polymère, de le fondre et de le mettre en pression, pour qu'il puisse franchir la filière placée à son extrémité. L'objectif est d'obtenir à la sortie de la machine un débit régulier, avec un matériau homogène, à la température contrôlée, et des conditions de production satisfaisantes (débit maximal, consommation énergétique limitée).

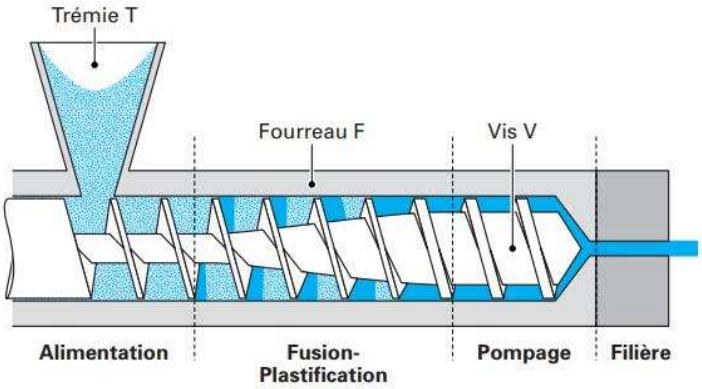


Figure 4.3 - Schéma de l'extrudeuse monovis (Vergnes2002)

En sortie de la filière, on retrouve généralement un système permettant de refroidir le fil plastique et ainsi de le solidifier complétement. Ce fil plastique est positionné sur une tireuse qui permet de régler la vitesse d'avance du fil et donc le diamètre de celui-ci. Puis le diamètre du fil est contrôlé à l'aide d'un dispositif de mesure sans contact. Enfin, une fois que le débit et le diamètre du fil sont validés, le fil est enroulé autour d'une bobine automatiquement.

2.2. Mise en fil réalisée avec le plateau ComposiTIC

Dans le cas de notre méthodologie, nous désirons prendre en compte l'ensemble des processus de fabrication entrant en jeux lors de la fabrication d'un produit réalisé par extrusion de matière. Nous avons donc mené des études sur la production de bobine de fil plastique avec le plateau ComposiTIC

situé à Lorient en Bretagne. Ce plateau technique relié à l'université Bretagne sud est doté d'une ligne d'extrusion permettant de transformer le granulé plastique en bobine de fil (figure 4.4).

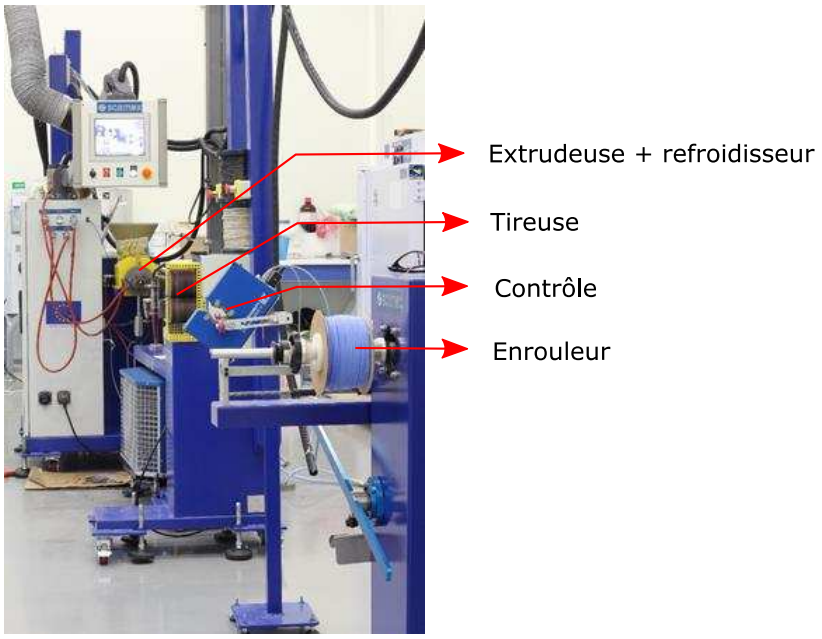


Figure 4.4 - Ligne d'extrusion du plateau ComposiTIC

Lors de cette campagne d'expérimentation, nous avons étudié les consommations et rejets générés par la production d'1 kg d'ABS magnum 34-04.

2.3. Consommation et rejets de la ligne d'extrusion

La figure 4.5 illustre les processus unitaires permettant de transformer la matière de granulés plastiques en bobine de fil ainsi que les flux élémentaires (consommation et rejets) de chaque processus unitaire. On peut remarquer que la principale source de consommation est liée à l'énergie électrique. Chaque entité a besoin d'être alimentée en énergie électrique afin d'assurer son bon fonctionnement. Certaines entités tel que le dispositif d'étuvage de matière ou l'extrudeuse sont plus consommatrices en énergie électrique car elles effectuent des cycles de chauffe. Sur cette ligne d'extrusion, l'enrouleur est mécanique et ne nécessite par conséquent aucune source d'énergie pour fonctionner.

La consommation et la perte de matière se font exclusivement pendant l'extrusion de la matière. L'extrudeuse peut être utilisée pour plusieurs matériaux. Ainsi, lors de la mise en fil d'une nouvelle matière, il faut réaliser une purge du système d'extrusion afin que le fil en sortie de la filière soit homogène en matière et en couleurs. Par conséquent, il y a de pertes matières à chaque changement de matériau.

La consommation de fluides se fait pendant le cycle de refroidissement du fil plastique. La matière chaude en sortie de filière entre en contact avec de l'eau froide, permettant la solidification du fil plastique.

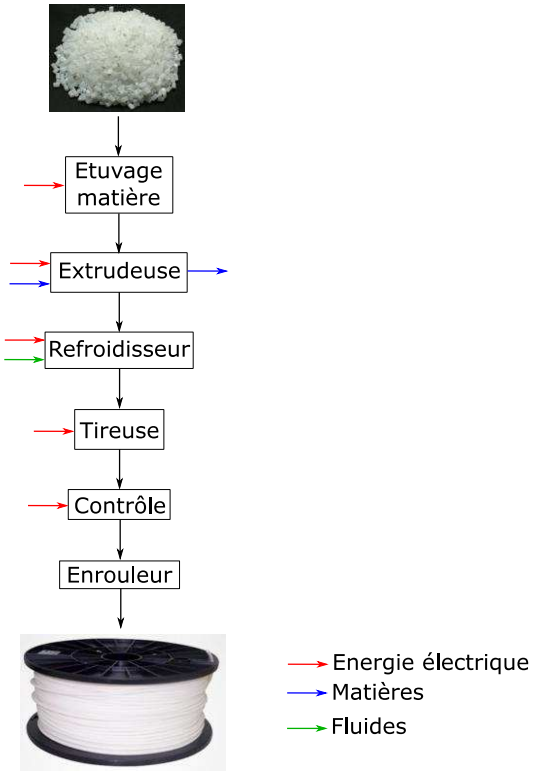


Figure 4.5 - Sources de consommation et de rejets de chaque étape de la ligne d'extrusion

2.3.1. Etuvage des granulés plastiques

La première étape nécessaire à la transformation des granulés plastiques en bobine de fil est l'étuvage de la matière. Nous avons donc réalisé l'acquisition des données d'inventaires pour cette première étape. Ces granulés sont alors placés dans un dispositif illustré figure 4.6. La quantité de granulés plastiques utilisés était de 2kg. La durée associée à cette étape varie en fonction du matériau utilisé. Dans le cas de l'utilisation de l'ABS, la durée est 1 heure et demi ($T_{Total\ étuvage}$). Pendant cette durée, le séchage de la matière commence d'abord par une phase de chauffe où la température à l'intérieur du dispositif passe de la température ambiante à 70°C. Dans notre cas, la phase de chauffe pour passer de 25°C à 70°C a duré 12 min ($T_{Chauffe\ Etuvage}$). La puissance associée à la phase de chauffe est de 650 W ($P_{Chauffe\ Etuvage}$) pour la machine que nous avons utilisée. Une fois la température de consigne atteinte, celle-ci doit être maintenue pendant toute la durée des opérations. Pendant cette phase de maintien en température, la puissance instantanée varie faiblement au cours du temps. La puissance moyenne associé à cette phase est de 405 W ($P_{Maintien\ Etuvage}$). Etant donné la stabilité du système, le protocole de mesure a été réalisé une seule fois pour les phases de chauffe et de maintien en température. On peut donc en déduire la consommation électrique associée au dispositif d'étuvage de la matière selon l'équation suivante :

$$E_{Etuvage} = P_{Chauffe\,Etuvage} \times T_{Chauffe\,Etuvage} + P_{Maintien\,Etuvage} \times (T_{Total\,étuvage} - T_{Chauffe\,Etuvage})$$

(4.1)

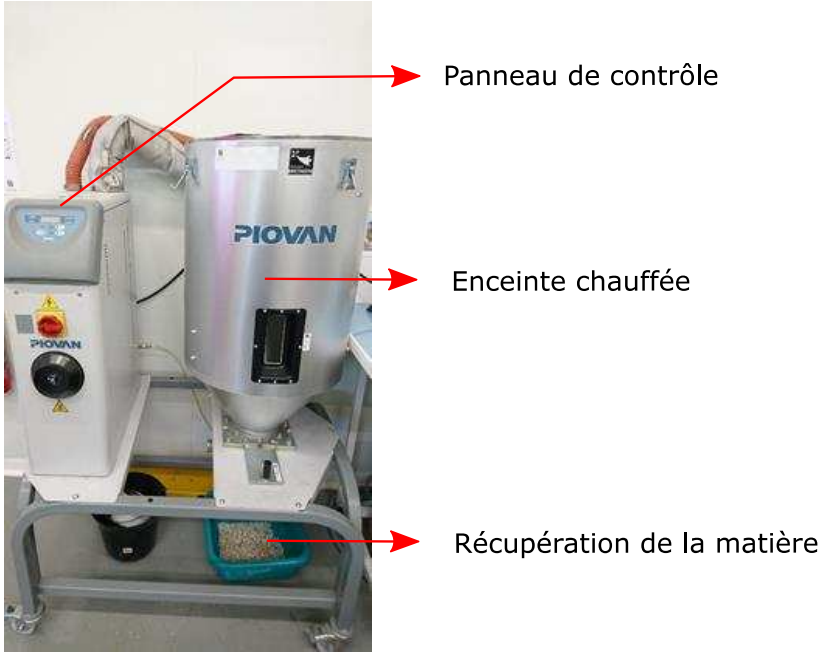


Figure 4.6 - Dispositif d'étuvage des granulés plastique

Finalement, l'énergie nécessaire à l'étuvage des granulé d'ABS est de 656.5 Wh.

2.3.2. Consommation d'énergie électrique de la ligne d'extrusion

Une fois cette première étape terminée, vient l'étape de préparation de l'extrudeuse. Les granulés plastiques sont placés dans la trémie et l'extrudeuse est mise en route. Ainsi, l'extrudeuse est chauffée dans un premiers temps jusqu'à la température de fusion du matériau utilisé. Dans notre cas, la machine est chauffée à 230 °C. Une fois la bonne température atteinte, commence alors une étape de préparation de la machine où l'opérateur sélectionne les paramètres de fabrication qui permettront d'avoir un débit régulier en sortie de la filière et donc d'obtenir un diamètre de fil constant. Une fois que le diamètre du fil souhaité est respecté, les autres modules (Refroidisseur, tireuse et contrôle) de la ligne d'extrusion sont allumés et ainsi commence la mise en bobine automatique.

La figure 4.7 représente la puissance instantanée lors de la mise en route la ligne d'extrusion en bleu et la puissance moyenne associée. Sur ce graphe on peut observer les trois phases qui sont la chauffe de l'extrudeuse, la préparation de la machine et enfin l'allumage des autres modules. Le temps de chauffe de l'extrudeuse est considéré comme fixe. Dans notre cas, l'extrudeuse a mis 12 minutes ($T_{Chauffe\ extrudeuse}$) à atteindre 230°C et la puissance moyenne mesurée pendant cette période est de 8kW ($P_{Chauffe\ extrudeuse}$). Le temps de préparation de la machine peut varier d'un opérateur à un autre car ce temps dépend de l'expertise de celui-ci. Pour notre étude, nous considérons que la préparation se fait avec le même opérateur. Par conséquent, nous avons mesuré un temps de préparation fixe qui est de 32 minutes ($T_{Préparation\ extrudeuse}$). Lors de cette deuxième phase, seule l'extrudeuse est alimentée avec une puissance moyenne de 4,3 kW ($P_{Préparation\ extrudeuse}$). Enfin, la puissance nécessaire au fonctionnement des autres modules est nettement plus faible car elle n'est que de 0,5 kW ($T_{Autres\ modules}$). Le début de l'allumage des autres modules initie également le début de la mise en bobine

automatique. Lors de cette étude, nous avons réalisé 2 bobine d'ABS d'1kg chacune et le temps nécessaire à leur réalisation était de 24 minutes pour chacun.

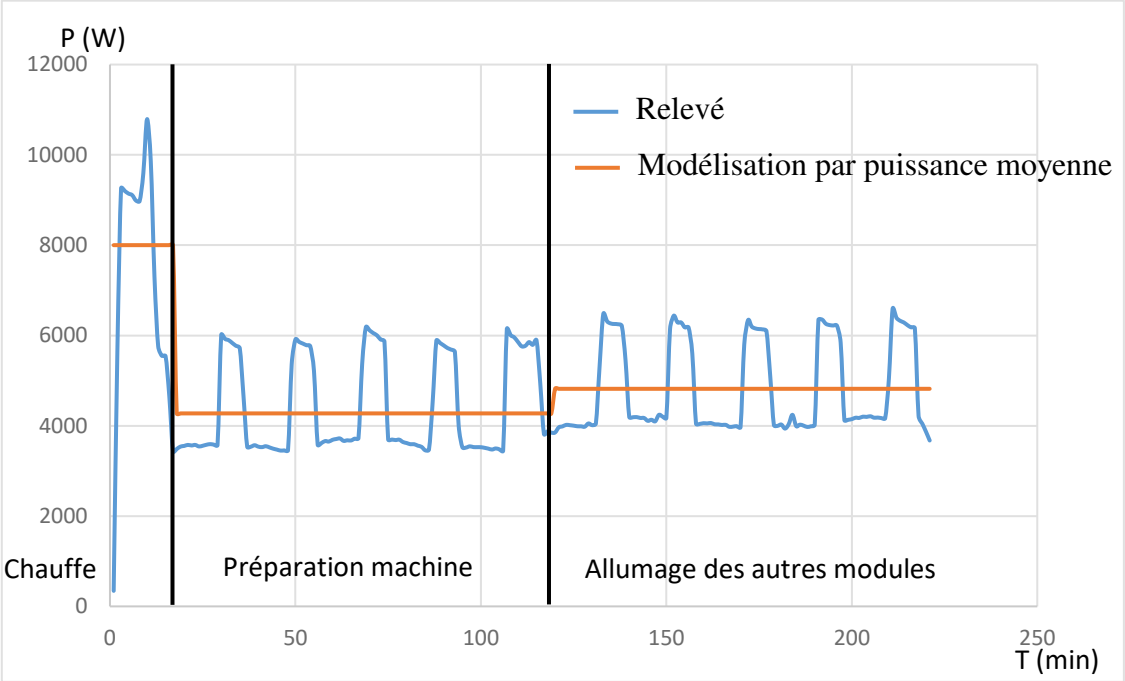


Figure 4.7 - Puissance instantanée des différentes phases de la ligne d'extrusion.

La figure 4.8 illustre les puissances moyennes ainsi que les durées des trois principales phases de fabrication de la ligne d'extrusion pour la mise en fil d'1 kilogramme d'ABS.

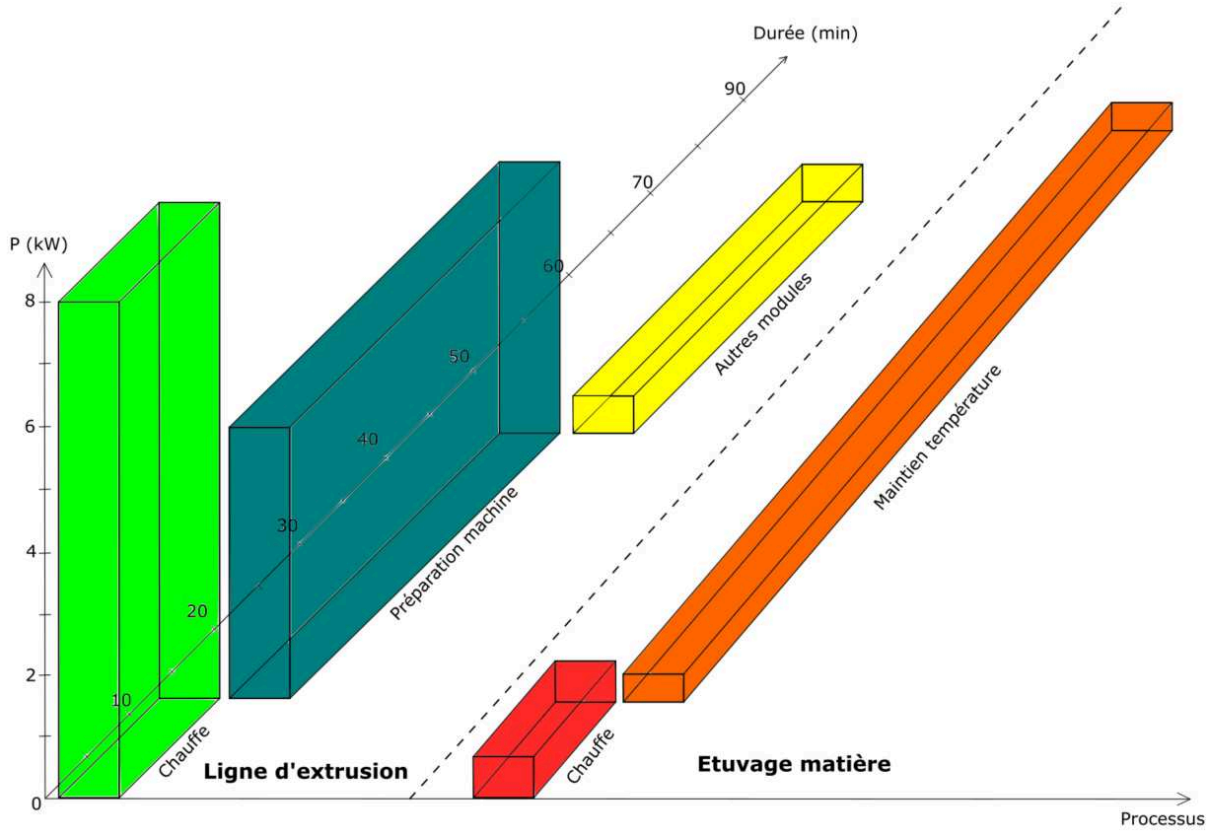


Figure 4.8 - Puissance moyenne et durée des phases de fabrication de la ligne d'extrusion pour la mise en fil d'1 kg d'ABS

Par conséquent, nous pouvons définir la consommation d'énergie électrique de la ligne d'extrusion en fonction de la masse de la pièce ($M_{pièce}$) que l'on souhaite réaliser à l'aide de l'équation suivante :

$$E_{Extrudeuse} = (P_{Chauffe\,extrudeuse} \times T_{Chauffe\,extrudeuse}) + (P_{Préparation\,extrudeuse} \times T_{Préparation\,extrudeuse}) + [(P_{Préparation\,extrudeuse} + P_{Autres\,modules}) \times (\frac{M_{Pièce} \times 24}{1000})]$$

(4.2)

Le tableau 4.2 illustre la consommation d'énergie électrique des différentes étapes pour la fabrication d'1 kg de bobine d'ABS. On remarque que l'étape la plus énergivore correspond à l'extrusion de matière. En effet l'extrudeuse est en fonctionnement pendant toute la durée des opérations, ce qui en fait la source de consommation majeure. La puissance requise pour la chauffe de l'extrudeuse est la plus importante des puissances en jeux. Cependant, la durée associée à cette chauffe est plus faible par rapport à la durée de préparation de la machine et de mise en bobine. Par conséquent, l'énergie associée à cette étape est inférieure à l'énergie nécessaire à l'extrusion de la matière.

	Dispositif d'étuvage	Chauffe extrudeuse	Extrudeuse	Refroidisseur, tireuse et contrôle	Total

Energie (Wh)	656,5	1600,1	3989	218,1	6463,7

Tableau 4.2 - Valeurs des consommations d'énergie

La figure 4.9 représente la part d'énergie en pourcentage des différentes étapes de la ligne d'extrusion. La consommation liée à l'étape d'extrusion de la matière représente 87 % de l'énergie totale. Le dispositif d'étuvage de la matière représente 10% de l'énergie totale. Enfin, les autres modules, le refroidisseur, la tireuse et la machine de contrôle sans contact représentent 3% de l'énergie totale.

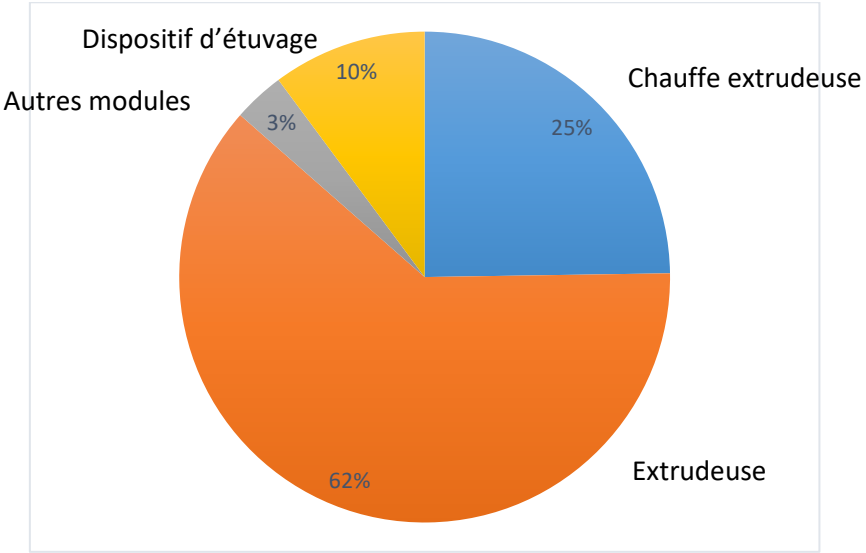


Figure 4.918 - Valeur en pourcentage des différentes étapes de la ligne d'extrusion

2.3.3. Consommation de matières et de fluides

Dans le cas d'une étude générale d'analyse de cycle de vie, il est tout aussi important de considérer la consommation de consommables autres que l'électricité. Il faut donc s'intéresser aux autres sources de consommations et de rejets traversant la ligne d'extrusion qui sont la matière et les fluides.

La consommation et le rejet de de matière se font pendant l'extrusion de matière. La capacité maximale de la trémie pour le modèle de ligne d'extrusion étudié est de 5kg. Cependant, la trémie n'est jamais remplie à son maximum. En effet, la quantité de granulés utilisés dépend de la masse de bobine que l'on souhaite fabriquer. Pour la fabrication d'1 kg de bobine, la quantité de granulé utilisé est de 1 kg à 1,5 kg afin de prévoir la perte matière. Dans le cas de notre étude, la quantité de matière perdue pour la fabrication d'1kg de bobine d'ABS est de 180g. Le rendement global de la mise en fil est de 84.7%.

Cette perte de matière est un phénomène aléatoire car elle dépend de l'expertise de l'opérateur, de la matière que l'on souhaite mettre en bobine et de la couleur des granulés utilisés lors d'une précédente fabrication. Néanmoins, il est possible de modéliser le système, mais l'incertitude associée sera plus grande que pour d'autres étapes.

Concernant la consommation de fluide, l'eau utilisée pendant la fabrication d'une bobine se fait lors du refroidissement du fil plastique. Dans notre cas le refroidisseur est alimenté par un circuit d'eau fermé avec une contenance de 18 litres. La quantité d'eau ne dépend donc pas de la quantité de matière à refroidir. Le contenu de ce volume d'eau est susceptible de diminuer à cause de

l'évaporation de l'eau. Chaque année, la consommation d'eau pour ce bac est de 40 litres. De plus, en moyenne 250 kg de matière sont mise en forme sur cette chaine chaque année. Par conséquent, nous pouvons associer une consommation d'eau moyenne par kilogramme de matière mise en forme. Cette valeur est de 0.16 $l.kg^{-1}$ et c'est ce que nous conserverons pour la suite de l'étude.

2.4. Synthèse sur la transformation de la matière

Les consommations et rejets présentées dans les sections précédentes sont issus d'expérimentations menées lors de la mise en bobine d'1 kg de d'ABS magnum 34-04. Nous nous sommes intéressés à l'ensemble des étapes nécessaire à la transformation de la matière initialement sous forme de granulé jusqu'à sa forme finale. Les modèles ainsi construits permettent de prédire la consommation d'énergie électrique pour la mise en bobine de granulés d'ABS.

Le tableau 4.3 et la figure 4.10 résument la consommation pour l'obtention d'1kg de bobine d'ABS. Dans ce tableau on retrouve la consommation d'énergie électrique, la consommation de matière et d'eau des différentes étapes de transformation de la matière.

$E_{Etuvage}$	656,5 Wh
$E_{Extrudeuse}$	5807 Wh
$T_{Total\ étuvage}$	90 min
$T_{Total\ éxtrudeuse}$	68 min
Perte matière	180 g
Volume de fluide	0.16 litres

Tableau 4.3 - Valeurs des consommations pour l'obtention d'un kilogramme de bobine d'ABS

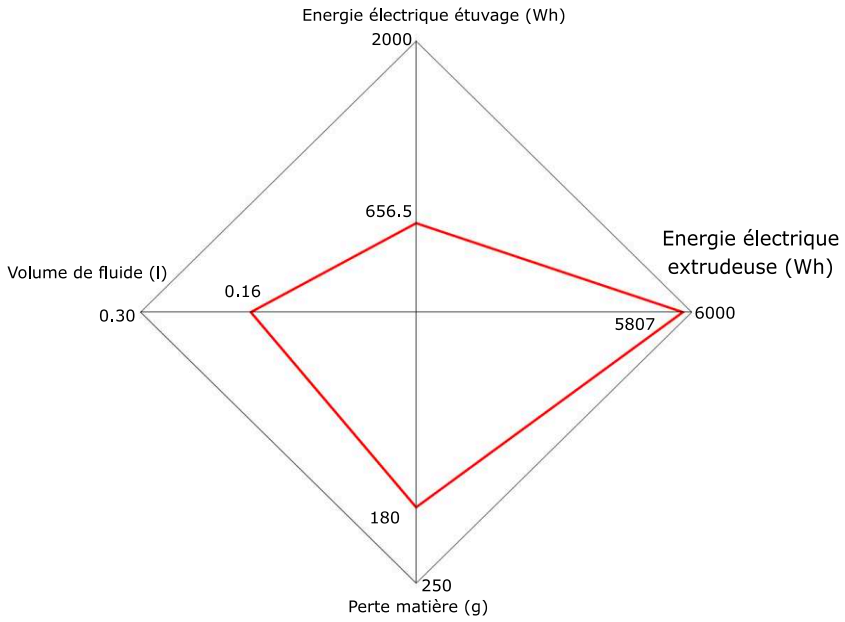


Figure 4.10 - illustration des valeurs pour la mise en fil d'1kg de de bobine d'ABS

Malheureusement, nous n'avons pas d'éléments de comparaison avec d'autres lignes d'extrusions dans la littérature étant donné que les bases de données actuelles ne contiennent aucune information sur les données d'inventaires de ce procédé de mise en forme. **Dans notre cas, la mise en bobine d'1kg d'ABS nécessite 6.8 kWh/kg soit 23 MJ/kg**. Par rapport aux données biobibliographiques concernant l'atomisation de la poudre, l'énergie électrique que nous avons mesurée est légèrement supérieure

aux valeurs donnée par Le Bourhis (Le Bourhis2014) qui considère une énergie de 18 MJ/kg nécessaire à l'atomisation d'1,3 kg de poudres de verre métallique. Ainsi, cette étude montre que l'énergie et la matière nécessaire à la **transformation de matière plastique** ne doivent pas être négligées dans le cadre d'une analyse de cycle de vie complète.

Dans cette première section, l'étude menée montre que la consommation énergétique due à la transformation de la matière plastique initialement sous forme de granulés en bobine de fil plastique est très énergivore. On peut penser que cette transformation de matière **plastique** nécessite moins d'énergie par rapport à **l'atomisation de matière métallique** et donc s'affranchir de cette étape de production. En réalité, la ligne d'extrusion utilisé est très consommatrice en énergie électrique. Par conséquent, il est essentiel de prendre en compte cette étape de transformation de la matière première lors d'une réalisation d'analyse de cycle de vie complète. De plus dans cette section, nous nous sommes intéressés à la consommation de matière et de fluide de ce procédé de mise en forme. Ainsi, les données issues de cette étude pourront servir de valeurs moyennes lors de la réalisation d'ACV.

3. Fabrication par extrusion de matière

3.1. Présentation de la machine étudiée

La machine étudiée est une machine d'extrusion de matière de typologie industrielle, HP designjet 3D. Cette machine contient deux têtes d'extrusion, une pour la fabrication de la pièce en ABS et l'autre pour la fabrication du support avec un matériau soluble dans une solution d'hydroxyde de sodium (soude). Les deux têtes sont chauffées à la même température (310°C) malgré la différence des matériaux. Cette machine contient également une enceinte chauffante, chauffée jusqu'à 70°C, afin de réduire la différence de température entre la matière sortante de la tête et le plateau.

Etant donné que la méthodologie développée est multi-étape, nous avons pris en compte les consommations et rejets de l'ensemble des étapes de fabrication de la pièce. Par conséquent, nous nous sommes également intéressés aux consommations et rejets liées aux pré-process et au post-process.

Pour cette étude nous avons donc pris en compte l'ensemble des flux consommés qui sont l'électricité, la matière et les fluides. Dans notre cas, la consommation d'énergie électrique se fait pendant les trois étapes de fabrication, la consommation de matière se fait pendant la mise en forme de la pièce ainsi que pendant le post-process. Finalement, la consommation de fluide se fait pendant la phase de finition du produit. La figure 4.11 illustre les étapes de fabrication de la machine étudiée.

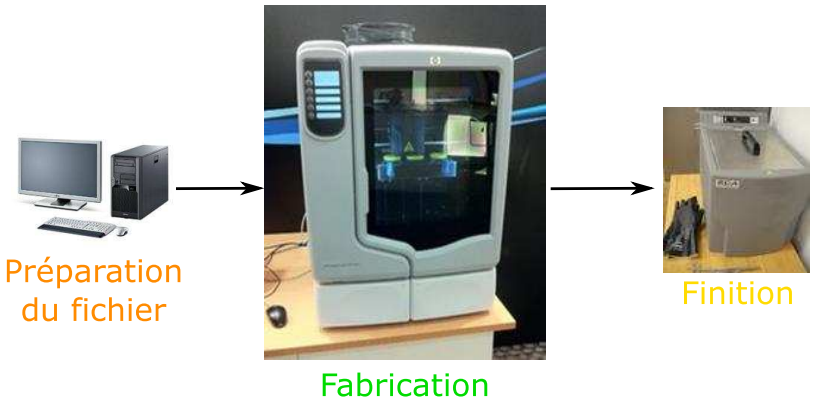


Figure 4.11 - Illustration de la HP designjet 3D

Dans la suite de cette section consacrée à l'analyse des données d'inventaire du procédé de d'extrusion de matière, nous développerons les modèles mis en place pour l'évaluation de chacune des sources de consommation citées précédemment. Nous nous intéresserons dans un premier temps aux données d'inventaires de l'ensemble des phases de fabrication et au développement de leurs modèles associés en suivant la méthodologie d'acquisition données (figure 4.12). Puis nous présenterons la combinaison avec les données techniques et économiques.

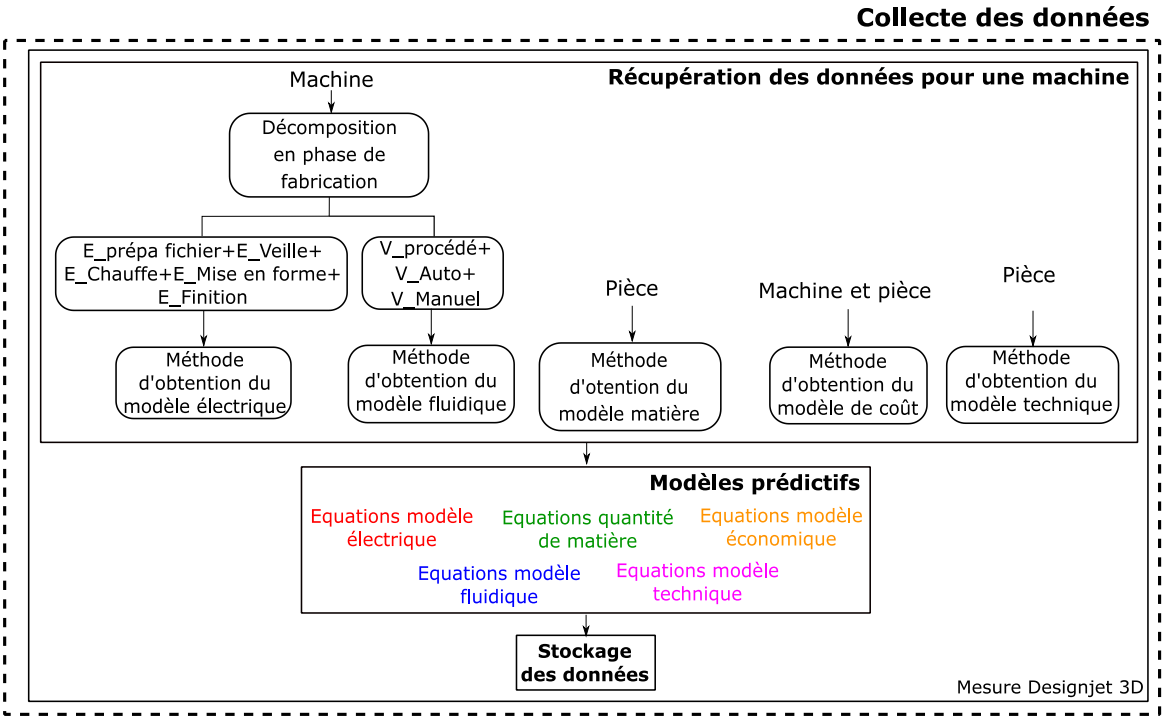


Figure 4.12 - Méthodologie d'acquisition données

3.2. Evaluation de la consommation d'énergie électrique

Afin de déterminer les consommations de notre moyen de production, il est nécessaire de référencer l'ensemble des phases de fabrication du procédé. Comme nous avons pu le voir dans le chapitre 3, les trois étapes de fabrication d'un produit (pré-process, mise en forme et post-process) peuvent êtres déclinés en phases de fabrication. En ce qui concerne les phases de fabrication de cette machine, nous distinguons :

- La préparation du fichier numérique
- La veille
- Le maintien en température de l'enceinte
- La chauffe de la tête
- La construction
- La finition

Nous n'avons pas pris en compte la chauffe de l'enceinte dans cette étude car l'enceinte de la machine est chauffée dès son allumage et est par la suite, maintenue en température jusqu'à l'extinction de la machine. Ainsi, nous avons considéré que la machine est déjà allumée lors d'une première utilisation. Ce qui est le cas en réalité car ces machines sont très rarement éteintes.

Une fois la préparation du fichier réalisée, la machine commence son cycle de fabrication avec la chauffe des deux têtes puis la mise en forme du produit. L'enceinte est maintenue en température pendant ces deux dernières phases. De plus, à cette machine est associée une phase de veille dans laquelle sont prises en compte les consommations liées à l'écran LCD, aux LED et aux composants électroniques.

Il faut également considérer une phase de maintien en température de la tête, cependant, n'ayant pas pu identifier cette phase séparément pendant la fabrication d'un produit, nous intégrerons la puissance moyenne de cette phase à la construction. La machine étudiée peut être considérée comme une boite noire, en effet il n'y a aucun moyen de modifier manuellement les paramètres de la machine. Par conséquent, la décomposition du procédé en phases de fabrication est moins fine que sur une machine open source. Néanmoins, la décomposition proposée pour cette machine suffit à la création de modèles électriques robustes.

Enfin, une fois la construction de la pièce finie, il peut y avoir une phase de finition où la pièce est nettoyée de la matière support. La figure 4.13 illustre l'agencement des différentes identifiés pour cette machine.

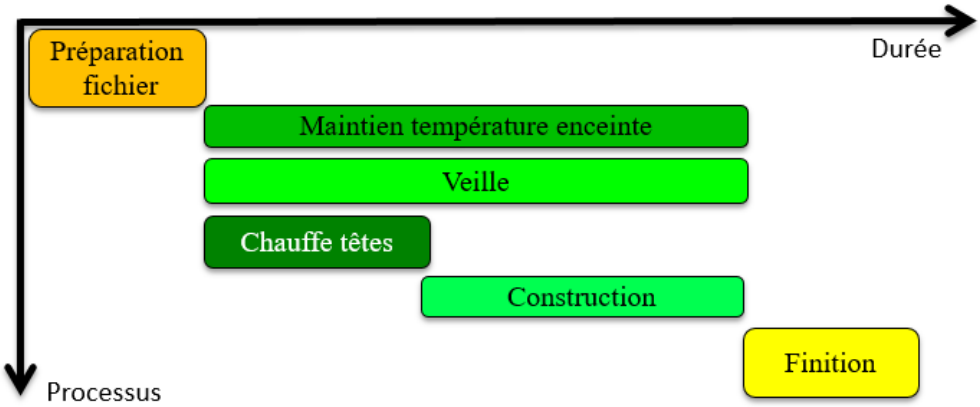


Figure 4.13 - Agencement des différentes phases de fabrication pour la HP designjet 3D

Les différentes phases de la machine identifiées, il s'agit maintenant de construire des modèles afin de prédire les données d'inventaires pour n'importe quelles formes de pièces. Il est donc nécessaire de connaitre finement ce qu'il se passe pendant ces différentes phases de fabrication. Pour cela, il faut passer par des étapes d'acquisition de données et de répétitions qui permettront de traduire les phénomènes physiques présents pendant la fabrication d'un produit.

3.2.1. Puissance moyenne et durée des phases de fabrication

Cette partie a pour objectif de proposer une modélisation du comportement de chacune des phases de fabrication pour cette première machine d'extrusion de matière. L'étude de la consommation d'énergie électrique se fait en deux temps. D'abord nous avons cherché à associer une puissance moyenne à chacune des phases précédemment identifiées, puis nous avons associé une durée à chacune de ces phases. Parmi l'ensemble des phases de fabrication, la consommation d'énergie liée aux phases de préparation de fichier et de finition de la pièce est invariante car nous leur avons associé une durée fixe.

Nous avons considéré le même ordinateur pour la préparation du fichier de toute les machines. Ainsi, nous avons relevé une puissance moyenne 31.6 W et un temps de préparation de fichier de cinq minutes. Par conséquent, l'énergie électrique lié à cette phase est de 2.63 Wh.

La machine de finition étudiée dispose de trois paliers de temps qui sont de quatre heures, six heures et douze heures. Généralement les pièces sont disposées dans la machine pour une durée de six heures peu importe la quantité de matière support. C'est également cette durée qui a été nécessaire à l'enlèvement du support pour la pièce du cas d'étude qui sera présentée dans le chapitre suivant. C'est donc cette durée que nous avons choisie de définir pour cette phase de fabrication. La puissance moyenne relevée pendant cette durée était de 800 W. Le tableau 4.4 résume les puissances et les durées pour la phase de préparation de fichier et de finition.

Phases	Puissance (W)	Durée (min)	Energie (Wh)
Préparation du fichier	31,6	5	2,63
Finition	800	360	4800

Tableau 4.4 - Valeurs des consommations d'énergie et de durée des phases de préparation de fichier et de finition

En ce qui concerne les puissance moyennes et durées des autres phases de fabrication, il faut nécessairement passer par de l'acquisition pendant la mise en forme des pièces. Pour cela, nous avons réalisé ces acquisitions en suivant le protocole expérimental du tableau 3.1 pour les quatre différentes pièces.

La figure 4.14 représente la courbe de la puissance instantanée en fonction du temps pour la pièce une du tableau 3.1. Cette première pièce étant réalisé 5 fois, les résultats présentés ci-dessous concernent la première pièce de cette série.

Sur ce graphe nous pouvons observer les différentes phases de fabrication. Pour la chauffe des deux têtes (1), on remarque un plateau de puissance constant pendant un certain temps. Pendant la mise en forme de la pièce (2), on observe des pics de puissances qui correspondent au maintien en température de l'enceinte. Enfin, une fois la pièce finie (3), la machine est en attente et on continue malgré cela à observer une consommation liée au maintien en température de l'enceinte. La phase de veille est présente pendant toute la fabrication et même après (1-2-3). Grace à la partie 1 de la courbe, nous pouvons déterminer une puissance moyenne liée à la chauffe des deux têtes. Avec la troisième partie de la courbe, nous pouvons déterminer une puissance moyenne liés à la phase de veille ainsi qu'à à la phase de maintien en température. Nous avons observé pour cette pièce ainsi que pour les autres, que les pics de puissance liée à au maintien en température interviennent de façon périodique en moyenne toutes les soixante secondes. Ainsi, nous avons pu déterminer une puissance moyenne sur cette période. Enfin, l'écart de puissance en hauteur entre les pics de puissances de la deuxième et de la troisième partie du graphe représente la puissance moyenne liée à la phase de mise en forme.

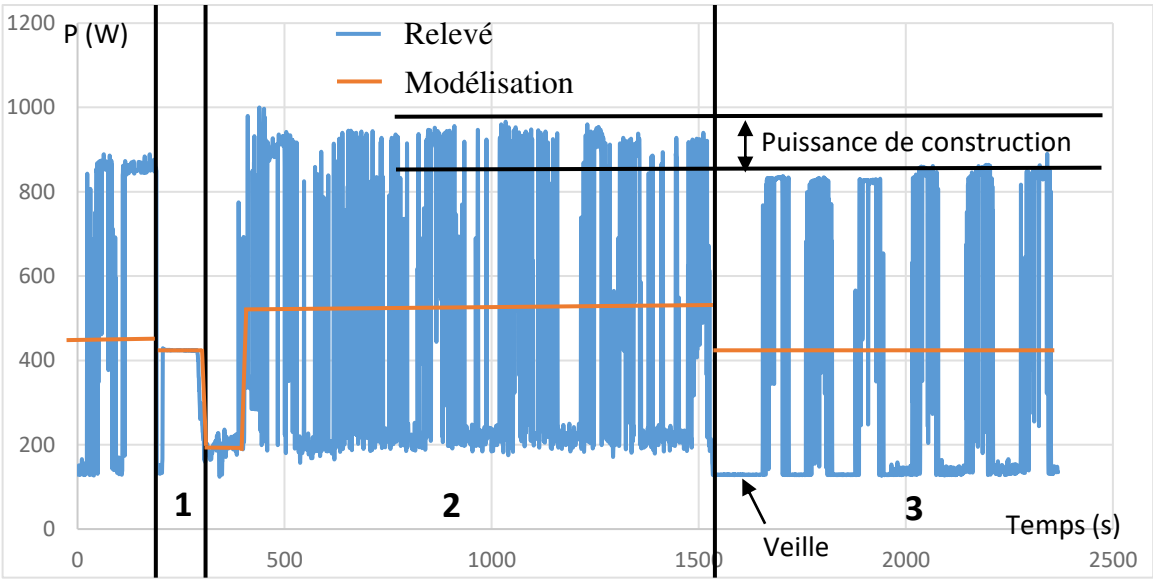


Figure 4.4 - Courbe de puissance pour la fabrication de la pièce 1 du protocole expérimental

Au total, cette première pièce a été réalisée cinq fois dans les mêmes conditions initiales. Le tableau 4.5 illustre les puissances moyennes des différentes phases de fabrication pour cette première pièce. Cet essai de répétabilité montre que l'écart entre les valeurs de puissance pour les différentes pièces sont relativement faibles. Finalement, ces premiers essais montrent la stabilité du procédé d'extrusion de matière à travers la réalisation d'une même pièce plusieurs fois.

	N° essai						
	1	2	3	4	5	Puissance moyenne	Ecart type
P_{moy} Veille (W)	129,25	129,25	129,25	129,25	129,25	129,25	0
P_{moy} maintien température enceinte (W)	274,3	276,7	277	275,2	276,7	276	1,17
P_{moy} Chauffe têtes (W)	294,9	294,9	294,9	294,9	294,9	294,9	0
P_{moy} construction (W)	85,30	86,42	87,22	87,02	87,04	86,60	0,79

Tableau 4.5 - Puissance moyenne des phases de fabrication du parallélépipède rectangle

Nous pouvons remarquer que les phases de fabrication les plus consommatrices sont liées à la chauffe et au maintien en température de la machine. La figure 4.15 illustre la puissance moyenne des différentes phases de fabrication ainsi que leur durée pour la fabrication de la première pièce du protocole expérimental. On observe sur ce graphe que la chauffe de la tête est très énergivore sur une courte période. La phase de maintien en température étant dépendant de la géométrie de la pièce, cette phase consomme beaucoup d'énergie pendant toute la durée de la fabrication.

A l'aide de ce graphique, nous pouvons identifier des leviers d'actions si on se place dans une démarche d'optimisation de la machine d'un point de vue environnemental. En effet il faudrait soit réduire la

puissance moyenne nécessaire au maintien en température de l'enceinte, soit réduire la durée de la fabrication et donc modifier la conception de la pièce.

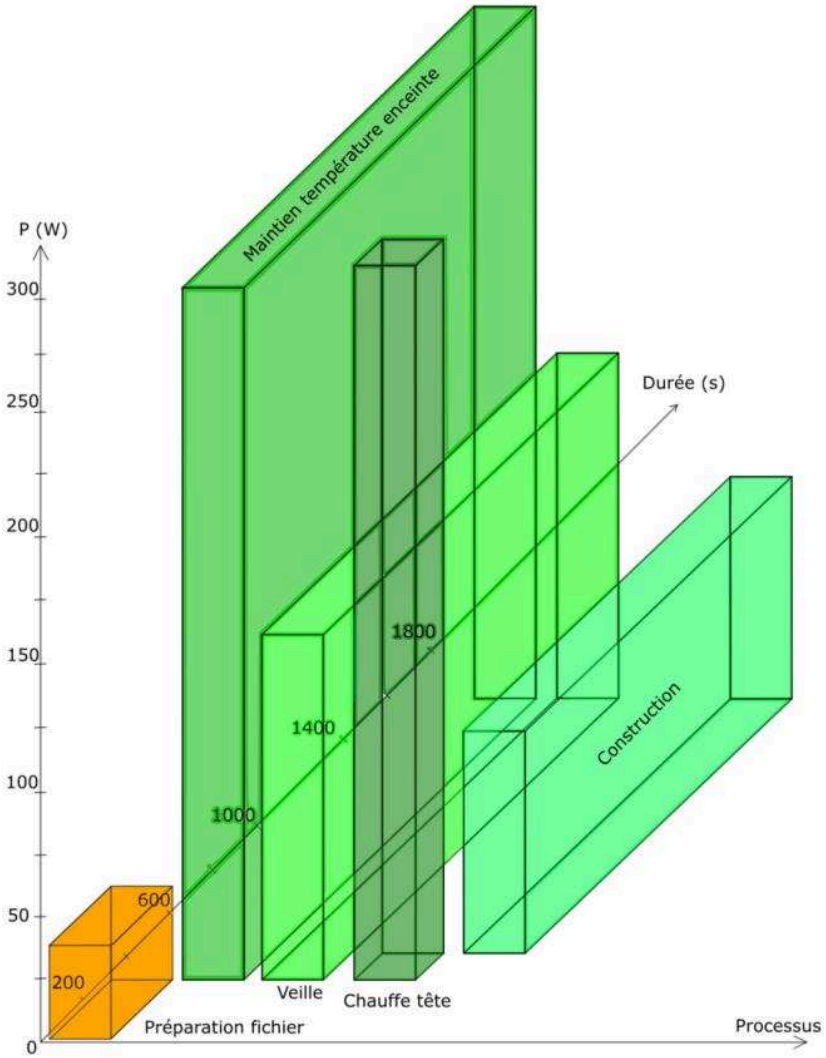


Figure 4.15 - Puissance moyenne et durée des phases de fabrication pour la première pièce du protocole expérimental (Extrusion de matière)

Finalement, l'identification des phases de fabrication ainsi que l'association d'une puissance moyenne et d'une durée pour chacune de ces phases nous permet de définir une consommation d'énergie électrique par phase. La figure 4.16 illustre l'arbre des processus élémentaires pour le parallélépipède rectangle (première pièce du protocole expérimental). Les valeurs d'énergie électrique de chaque phase sont obtenues pour une durée totale de 22 minutes de fabrication.

Il n'y a pas de consommation d'énergie pour la phase de finition car les pièces du protocole expérimental ne nécessitent pas de support interne. Cependant, la machine étudiée fabrique un léger tapis de matière sous la pièce qui est enlevée manuellement. Les pièces ne sont donc pas placées dans le bain de soude.

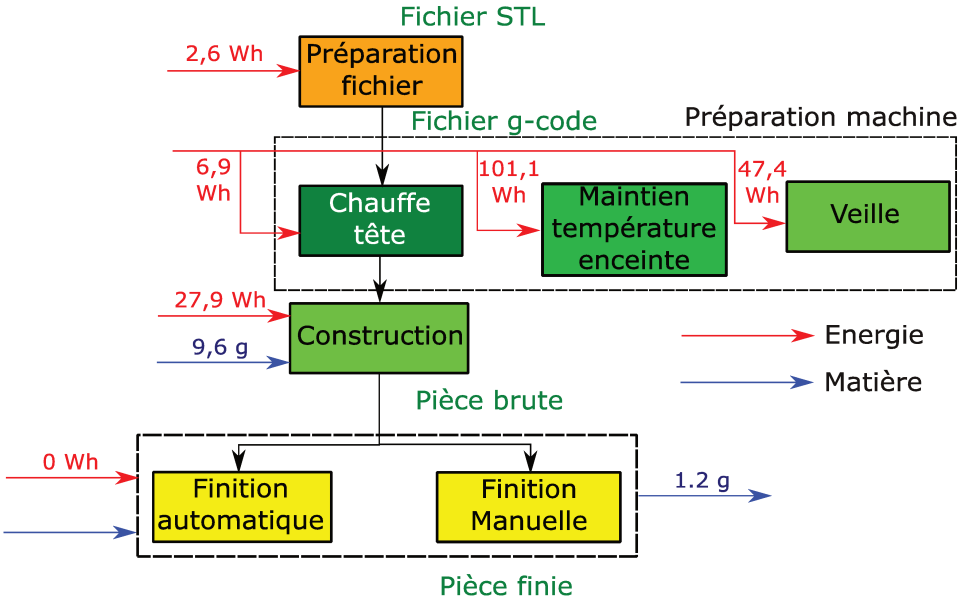


Figure 4.16 - Arbre des processus élémentaire pour la première pièce du protocole expérimental

Dans la suite du protocole expérimental, nous avons fait l'acquisition des puissances moyennes des phases de fabrication pour des géométries de pièces différentes. L'objectif est d'observer si l'écart des puissances moyennes de chaque phase est élevée d'une pièce à une autre. Le tableau 4.6, 4.7 et 4.8 représentent les résultats pour les autres pièces du protocole expérimental.

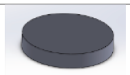
	N° essai		
	1	2	Puissance moyenne
P_{moy} Veille (W)	129,25	129,25	129,25
P_{moy} maintien température Enceinte (W)	275,2	276,5	275,9
P_{moy} Chauffe têtes (W)	293,3	293,6	293,5
P_{moy} construction (W)	86,8	86,42	86,61

Tableau 4.6 - Puissance moyenne des phases de fabrication du cylindre

	N° essai		
	1	2	Puissance moyenne
P_{moy} Veille (W)	129,25	129,25	129,25

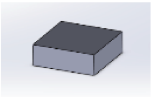
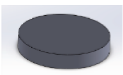
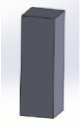
P_{moy} maintien température Enceinte (W)	275,2	276,7	275,9
P_{moy} Chauffe têtes (W)	293,7	294,1	293,9
P_{moy} construction (W)	85,30	86,42	85,86

Tableau 4.7 - Puissance moyenne des phases de fabrication du rectangle fabriqué dans le plan X/Y

	N° essai		
	1	2	Puissance moyenne
P_{moy} Veille (W)	129,25	129,25	129,25
P_{moy} maintien température enceinte (W)	276,8	276,7	276,75
P_{moy} Chauffe têtes (W)	294,8	294,2	294,5
P_{moy} mise en forme (W)	85,5	85,7	85,60

Tableau 4.8 - Puissance moyenne des phases de fabrication du rectangle fabriqué suivant Z

L'acquisition de toutes ces données nous permettent ainsi de définir une puissance moyenne à chaque phase de fabrication. Le tableau 4.8 illustre la puissance moyenne définit à chaque phase de fabrication pour la machine étudiée.

Phase					Puissance moyenne
P_{moy} Préparation fichier (W)	31.6	31.6	31.6	31.6	**31,6**
P_{moy} Veille (W)	129,25	129,25	129,25	129,25	**129,25**
P_{moy} maintien température enceinte (W)	276	275,9	275,9	276,75	**276**
P_{moy} Chauffe têtes (W)	294,9	293,5	293,9	294,5	**294,2**

P_{moy} construction (W)	86,60	86,61	85,86	85,6	**86,1**
P_{moy} finition (W)	0	0	0	0	**0**

Tableau 4.9 - Puissance moyenne des phases de fabrication de la HP designjet 3D

Afin de définir une équation permettant de déterminer la consommation d'énergie électrique d'un produit, il faut associer une durée à chacune des phases de fabrication. Parmi ces phases de fabrication, il y en certaines qui ont une durée fixe et d'autres qui ont des durées qui vont dépendre de la géométrie de la pièce. Dans notre cas, les phases ayant une durée fixe sont les phases de préparation de fichier, de finition et de chauffes des têtes. Le tableau 4.10 représente les durées mesurés pour le passage des têtes de la température de départ à la température de consigne pour les différentes pièces du protocole expérimental.

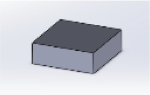
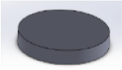
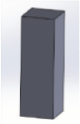
Phase					**Durée moyenne**
Durée chauffe têtes (s)	84	83	84	84	**83,75**

Tableau 4.10 - Durée moyenne de la chauffe des têtes

Parmi les phases dont les durées dépendent de la géométrie de la pièce, on retrouve les phases de maintien en température de l'enceinte, de veille et de construction. Etant donné que les phases de veille et de maintien en température sont actives pendant toute la fabrication, leurs durées dépendent du temps total de mise en forme ($T_{Mise\ en\ forme}$). La durée de construction est déterminée à l'aide de l'équation suivante (équation 4.3) :

$$T_{Construction} = T_{Mise\ en\ forme} - T_{Chauffe\ têtes} \quad (4.3)$$

En connaissant les puissances moyennes et les durées de l'ensemble des phases de fabrication, nous avons déterminé une équation permettant d'évaluer la consommation d'énergie électrique de la machine étudiée illustrée par l'équation 4.4 :

$$E_{Totale} = (P_{préparation\ fichier} x T_{préparation\ fichier}) + (P_{Veille} x T_{Mise\ en\ forme}) + (P_{Chauffe\ têtes} x T_{Chauffe\ têtes}) + (P_{Maintien\ température enceinte} x T_{Mise\ en\ forme}) + (P_{Construction} x T_{Construction}) + (P_{Finition} x T_{Finition}) \quad (4.4)$$

3.2.2. Synthèse la consommation d'énergie électrique

La consommation électrique des machines de fabrication représente une grande part des impacts environnementaux qu'elle génère. Dans le cas de la machine d'extrusion de matière, on peut remarquer qu'une grande partie de cette consommation énergétique est due aux phases de chauffe et de maintien en température de la machine. Les modèles mis en place précédemment permettent de caractériser avec précision la consommation énergétique de notre moyen de production.

Néanmoins, nous nous intéressons ici à l'ensemble des données d'inventaires, par conséquent, il est tout aussi important d'évaluer la consommation de matières et de fluides. C'est ce que nous allons présenter dans la suite de cette section.

3.3. Evaluation de la consommation de matière

Cette section a pour objectif de mettre en évidence la prise en compte de la consommation de matières lors de la fabrication par extrusion de matière. Dans notre cas la consommation de matière

est due à la consommation de la matière nécessaire à la fabrication de la pièce et à l'utilisation de matière support. Ainsi, le modèle empirique utilisé dans cette méthodologie afin de prédire la consommation de matière est illustré par l'équation 4.5

$$M_{Totale} = \rho_{Pièce} \text{ x } V_{Pièce} + \rho_{Support} \text{ x } V_{Support} \quad (4.5)$$

La matière utilisé pour la fabrication des produits dans cette machine est de l'ABS plus P430 et la masse volumique associée à ce matériau est de 1040 $kg.m^{-3}$. Comme n'importe quel autre procédé de fabrication, la fabrication additive génère également des déchets. Même si cette production de déchets est plus faible que pour les procédés conventionnels, celle-ci doit tout de même être prise en considération lors de l'évaluation environnementale du procédé. Dans notre cas, les déchets sont générés par l'utilisation de matériau support avec une masse volumique de 1040 $kg.m^{-3}$. Le volume de la pièce ($V_{pièce}$) et le volume du support ($V_{support}$) sont estimés par le logiciel de préparation du fichier fourni avec la machine.

3.4. Evaluation de la consommation de fluide

L'évaluation de la consommation de fluides dans les procédés de fabrication est une donnée souvent manquante lors de l'analyse environnementale de l'étape de production. Dans la méthodologie développée, cette consommation est prise en compte. Ainsi, nous avons déterminé dans le chapitre précèdent une équation (équation 3.3) permettant d'estimer la consommation de fluide. Dans cette équation nous prenons en compte la consommation de fluide pendant la fabrication d'un produit ($V_{Procédé}$) et pendant la finition (V_{Auto} et V_{Manuel}). Pour le procédé d'extrusion de matière étudié, il n'y a pas de consommation de fluide pendant la mise en forme de la pièce et la finition se fait de façon automatique en plongeant le produit semi-fini dans un bain de soude. Par conséquent, le volume de fluide utilisé dépend du volume de la pièce produite. Ainsi, la consommation totale de fluide pour cette machine est estimée selon l'équation 4.6 :

$$\boxed{V_{Auto} = V_{(\text{Eau finition automatique})\,(V_{Pièce})} \quad (4.6)}$$

3.5. Synthèse sur l'évaluation des données d'inventaires

L'étude menée dans cette section permet de modéliser finement le procédé d'extrusion de matière afin d'en évaluer les données d'inventaires. Cette étude nous a permis de mettre en place des modèles locaux permettant de traduire les phénomènes physiques qui se déroulent pendant la fabrication d'un produit en prenant en compte l'ensemble des étapes de production. Cette modélisation nécessite une approche pièce-procédé et une connaissance fine du procédé de fabrication. Ainsi, il est possible de partir du modèle numérique de la pièce pour déterminer les données d'inventaires associé au couple pièce-procédé.

3.6. Combinaison des modèles environnementaux avec des modèles technico-économique

La méthodologie que nous avons développée a pour objectif de fournir à l'utilisateur un outil d'aide à la décision basé sur les trois critères : performances environnementales, propriétés mécaniques et coût. Nous avons montré dans la section précédente les différents modèle d'évaluation environnementaux. Dans cette section, nous présenterons le couplage avec les modèles techniques et économiques afin d'avoir une évaluation multicritère du couple pièce-procédé.

3.6.1. Evaluation du coût de fabrication

L'estimation du coût de fabrication d'une pièce est réalisée à l'aide de l'équation 3.4 présentée dans le chapitre précédent. Certaines données telles que le coût de la machine et de la matière sont spécifiques à la machine étudiée. Ainsi, il faut définir des coûts fixes à certains paramètres qui nous permettront par la suite d'évaluer le coût de revient en fonction de la durée de fabrication total et de la quantité de matière utilisée. Le tableau 4.11 illustre les coûts associés à ces paramètres fixes pour la machine étudiée :

$Coût_{Machine}$	10 000 Euros
Nombres d'heures d'utilisation de la machine/an	640 heures
$Coût_{Matière\ pièce}$	0,37 euros /cm^3
$Coût_{Matière\ support}$	0,37 euros /cm^3
Prix plateau	10 euros
Coût opérateur	53,25 euros/heure

Tableau 4.11 - Coûts fixes des paramètres de la HP designjet 3D

Finalement, l'évaluation du coût de fabrication pour cette machine se fait à l'aide de l'équation 4.7

$$Coût_{Total} = [Coût_{Horaire} \text{ x } T_{Mise\ en\ forme}] + [Volume_{Pièce} \text{ x } 0{,}37 + Volume_{Support} \text{ x } 0{,}37] + [53{,}25 \text{x } (\mu + \eta)] + 10 \quad (4.7)$$

$T_{mise\ en\ forme}$: Temps de fabrication de la pièce ;

μ : Temps mis par l'opérateur à réaliser la phase de préparation de fichier ;

η : Temps mis par l'opérateur à réaliser la phase de finition ;

3.6.2. Evaluation technique

L'évaluation technique du couple pièce-procédé est réalisée à l'aide de l'équation 4.8. A l'aide cette équation extraite des travaux de Boschetto (Boschetto2013), il est possible de prédire la rugosité arithmétique (Ra) d'une pièce en fonction de l'angle de dépôt et de la hauteur de couche. Dans notre cas, la hauteur de couche (L) pour toutes les pièces réalisées avec cette machine est de 0.25 millimètre. L'angle de dépôt varie en fonction de la géométrie de la pièce étudié.

$$Ra = \frac{L.\csc(\alpha)}{9.\sqrt{3}} \quad (4.8)$$

3.7. Synthèse de l'étude sur l'évaluation multicritère du procédé d'extrusion de matière

L'étude menée dans cette section nous a permis de modéliser finement le procédé d'extrusion de matière afin d'évaluer le procédé en fonction des critères environnementaux combinés à des critères techniques et économiques. Nous avons présenté la méthodologie développée dans le chapitre 3 à une machine d'extrusion de matière de typologie industrielle ; la HP designjet 3D. Plusieurs points ont été mis en avant au cours de cette étude :

Nous avons d'abord montré l'importance de prendre en compte l'ensemble des étapes de production d'une pièce. Pour cette étude, les étapes de production pris en compte sont la transformation de la matière première, la préparation du fichier, la fabrication de la pièce et la finition. Bien souvent, on retrouve dans la littérature des travaux qui sont essentiellement focalisés sur l'évaluation des données d'inventaires pendant la fabrication de la pièce. Cependant, nous avons remarqué dans notre cas que pour l'énergie électrique, cette étape n'est pas la plus consommatrice. Ainsi il est essentiel de s'intéresser à l'ensemble de ces étapes.

Au cours de cette étude, nous nous sommes également intéressés à l'ensemble des données d'inventaires et pas seulement à la consommation d'énergie électrique. En effet, les consommation et rejets de matières et de fluides peuvent être important. Par conséquent, il faut les prendre en compte dans une démarche d'évaluation environnementale.

Finalement, nous avons combinés les modèles environnementaux à des modèles techniques et économiques permettant l'évaluation multicritère du couple pièce-procédé. Nous avons également appliqué la méthodologie sur quatre autres machine d'extrusion de matière. Les résultats sont disponibles en annexe A.

4. Fabrication par projection de matière

La méthodologie présenté dans le chapitre 3 a été développé dans l'objectif d'être générique. Ainsi, il est possible d'évaluer d'autres procédés de fabrication additive. Nous avons donc appliqué la méthodologie sur le procédé de projection de matière.

L'ensemble des machines de projection de matière dans cette section sont des machines de typologie industrielle. Dans la suite de cette section, nous présenterons la méthodologie sur l'Objet 30 pro (JET1). Pour ce procédé de fabrication, nous n'avons pas eu l'occasion d'évaluer les données d'inventaires de la transformation de la matière première. Par conséquent, les étapes de production prise en compte pour ces procédés sont la préparation du fichier, la fabrication du produit et la finition. La figure 4.17 illustre les phases prises en compte pour les machines de projection de matière.

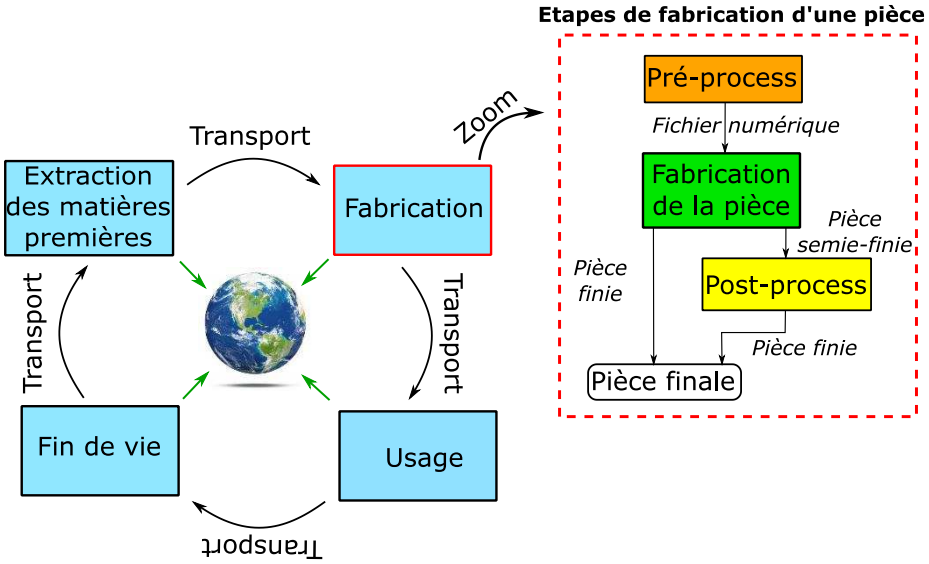


Figure 4.17 - Phases prises en compte pour les machines de projection de matière

4.1. Présentation de la machine étudiée

Le principe de la machine étudiée consiste en la projection d'une résine photosensible sur un plateau de fabrication. Cette matière est par la suite flashée à l'aide d'une lampe UV permettant ainsi le durcissement de la matière. Chaque hauteur de couche est de 8 micromètres. Cette machine contient deux têtes de projection. Une pour la fabrication de la pièce en résine transparente (VeroClear) et l'autre la fabrication du support. Enfin, les deux têtes sont chauffées en même temps à une température de 70°C. Le système de projection de matière est le seul composant sur cette machine qui nécessite une montée en température. La figure 4.18 illustre la machine étudiée dans cette section.

Figure 4.18 - Illustration de l'objet 30 pro

Une fois la pièce fabriquée, la matière support est enlevée manuellement à l'aide d'un jet d'eau à haute pression lors de la finition de la pièce. Dans la suite de cette section, nous nous intéresserons dans un premier temps aux données d'inventaires de l'ensemble des étapes de production et au développement de leurs modèles associés, puis nous présenterons le couplage avec les données technico-économiques.

Le protocole expérimental pour la mise en place des modèles environnementaux du procédé de projection de matière a été revu. En effet, nous avons pu observer au cours des expérimentations que ce procédé de fabrication est très stable. Par conséquent, la première pièce du protocole expérimentale a été réalisée 2 fois au lieu de 5 pour montrer la répétabilité du système. Puis les pièces deux et trois ont été réalisées une fois chacune. Le tableau 4.12 illustre le nouveau protocole expérimental pour la mise en place des modèles environnementaux du procédé de projection de matière :

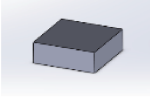
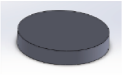
Pièces	Propriétés géométriques	Nombres de Fabrications
 1	Dimension : 30 x 30 x 10 mm	2
 2	Dimension : R = 15 mm, h = 4 mm	1
3	Dimension : 30 x 10 x 10 mm	1

Tableau 4.12 - Protocole expérimental utilisé pour le procédé de projection de matière

4.2. Evaluation de la consommation d'énergie électrique

Nous avons tout d'abord décomposé le procédé en différentes phases de fabrication. Ainsi, les phases de fabrication de cette machine que nous avons distinguées sont les suivantes :

- La préparation du fichier numérique
- La veille
- La chauffe des têtes
- La préparation de la machine
- La construction
- La finition

Une fois la préparation du fichier réalisée, le début du cycle de fabrication de la pièce commence avec les têtes qui sont chauffées jusqu'à la température de consigne (Phase de chauffe) suivie d'une mise à zéro du plateau de fabrication (phase de préparation). Une fois la préparation terminée, la mise en forme de la pièce peut commencer. Pour ce procédé de fabrication, la finition de la pièce est obligatoire car la machine construit du support tout autour de la pièce. La figure 4.19 illustre l'agencement des différentes phases identifiées pour cette machine. Nous pouvons désormais procéder à l'acquisition des données afin de construire le modèle prédictif de la consommation d'énergie électrique à l'aide du matériel présenté dans le chapitre 3 (figure 3.8).

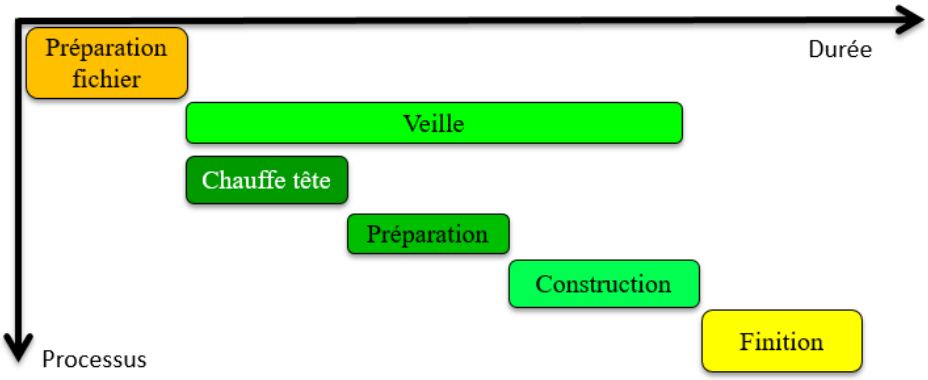


Figure 4.19 - Agencement des différentes phases de fabrication pour l'objet 30 pro

4.2.1. Puissance moyenne et durée des phases de fabrication

Pour ce procédé de fabrication, nous avons considéré le même ordinateur pour la préparation du fichier. Ainsi, nous avons la même puissance moyenne et la même durée associé à cette phase que pour le procédé d'extrusion de matière. Le tableau 4.13 résume les puissances et les durées pour la phase de préparation de fichier.

Phases	Puissance (W)	Durée (min)	Energie (Wh)
Préparation du fichier	31,6	5	2.63

Tableau 4.13 - Valeurs des consommations d'énergie et de durée des phases de préparation de fichier

Les puissance moyennes et durées des autres phases de fabrication sont déterminées par de l'acquisition pendant la fabrication des pièces. Pour cela, nous avons réalisé ces acquisitions en suivant le protocole expérimental du tableau 4.12 pour les quatre différentes pièces. La figure 4.20 représente la courbe de la puissance instantanée en fonction du temps pour la pièce une du tableau 4.12.

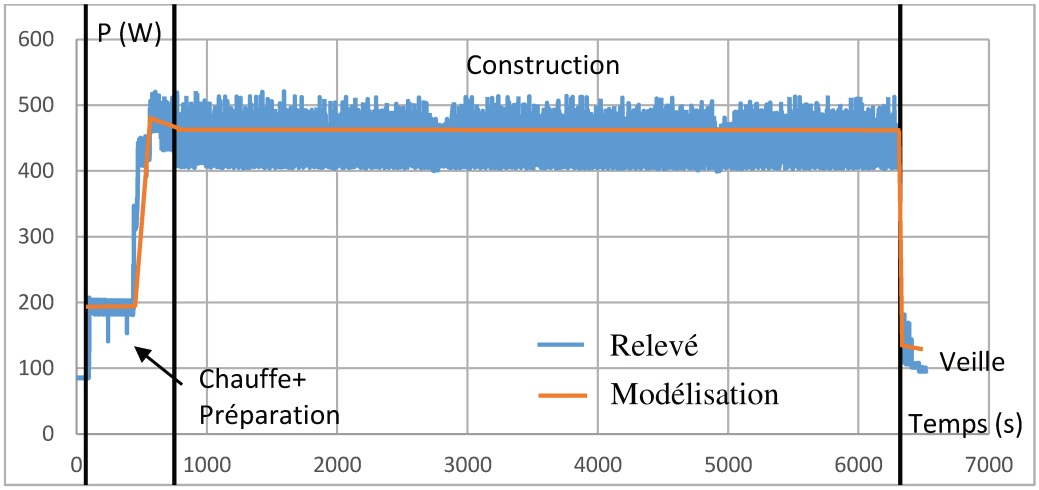


Figure 4.20 - Puissance en fonction du temps pour la fabrication de la pièce 1 du protocole expérimental

Au total, cette première pièce a été réalisé deux fois dans les mêmes conditions initiales. Le tableau 4.14 illustre les puissances moyennes des différentes phases de fabrication pour cette première pièce. L'écart entre les valeurs de puissance pour les deux pièces est relativement faible. Ce faible écart est principalement dû à la stabilité du procédé. En effet, nous pouvons constater sur la figure 4.19 la stabilité du procédé même pendant la phase de mise en forme.

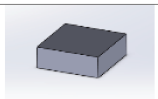
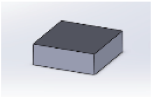
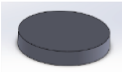
	N° essai		
	1	2	Puissance moyenne
P_{moy} Veille (W)	85,7	85,5	85,6
P_{moy} Chauffe têtes (W)	189	186	187,5
P_{moy} Préparation (W)	301,9	298,6	300,25
P_{moy} Construction (W)	357,4	356,2	356,8

Tableau 4.14 - Puissance moyenne des phases de fabrication du parallélépipède rectangle

L'acquisition des puissance moyennes des phases de fabrication a ensuite été réalisée pour des géométries de pièces différentes. Le tableau 4.15 représente les résultats des puissances moyennes par phase pour les trois pièces de ce nouveau protocole expérimental ainsi que la puissance moyenne globale attribuée à chaque phase à l'issu de ces expérimentations.

Phase				Puissance moyenne
P_{moy} Veille (W)	85,6	85,5	85,5	**85,5**
P_{moy} Chauffe têtes (W)	187,5	186	188	**187,2**
P_{moy} Préparation (W)	300,25	299,6	302,3	**301**

P_{moy} Construction (W)	356,8	356,2	357,5	**357**

Tableau 4.15 - Puissance moyenne des phases de fabrication de l'objet 30 pro

La finition de la pièce se fait à l'aide d'un jet d'eau à haute pression. Nous avons donc mesuré la puissance nécessaire au fonctionnement de cet appareil et avons relevé une puissance moyenne de 740,5 Watts. L'appareil consomme de l'énergie seulement lorsque le jet d'eau est activé. En veille la consommation de puissance est nulle. La durée associée à cette phase dépend du temps passé par l'opérateur à nettoyer la pièce. Etant donné qu'il y a un facteur « humain », il est difficile de prédire exactement la durée nécessaire au nettoyage car cette durée varie d'un opérateur à un autre. En effet, un opérateur avec une meilleure expertise mettra moins de temps à réaliser la phase de finition. Néanmoins, après avoir chronométré cette phase pour plusieurs nettoyages, nous avons estimé une durée moyenne de 3 min. Le tableau 4.16 récapitule la puissance et la durée moyenne pour la phase de finition :

Phases	**Puissance (W)**	**Durée (min)**	**Energie (Wh)**
Finition	740,5	3	18,5

Tableau 4.16 - Puissance et durée moyenne de la phase de finition

Afin de définir une équation permettant de déterminer la consommation d'énergie électrique d'un produit, il faut associer une durée à chacune des phases de fabrication. Parmi ces phases de fabrication, la phase de chauffe des têtes et de préparation ont une durée fixe. Le tableau 4.17 représente les durées mesurées pour le passage des têtes de la température de départ à la température de consigne pour les différentes pièces du protocole expérimental.

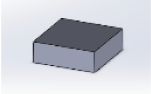
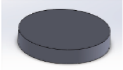
Phase				Durée moyenne
Durée chauffe têtes (s)	780	779	781	**780**
Durée préparation (s)	79,3	79,5	79,8	**79,5**

Tableau 4.17 - Durée moyenne de la chauffe des têtes et de la préparation

La figure 4.21 illustre le graphe des puissances et des durées moyennes en fonction des différentes phases de fabrication pour la pièce 1 du protocole expérimental (Parallélépipède rectangle).

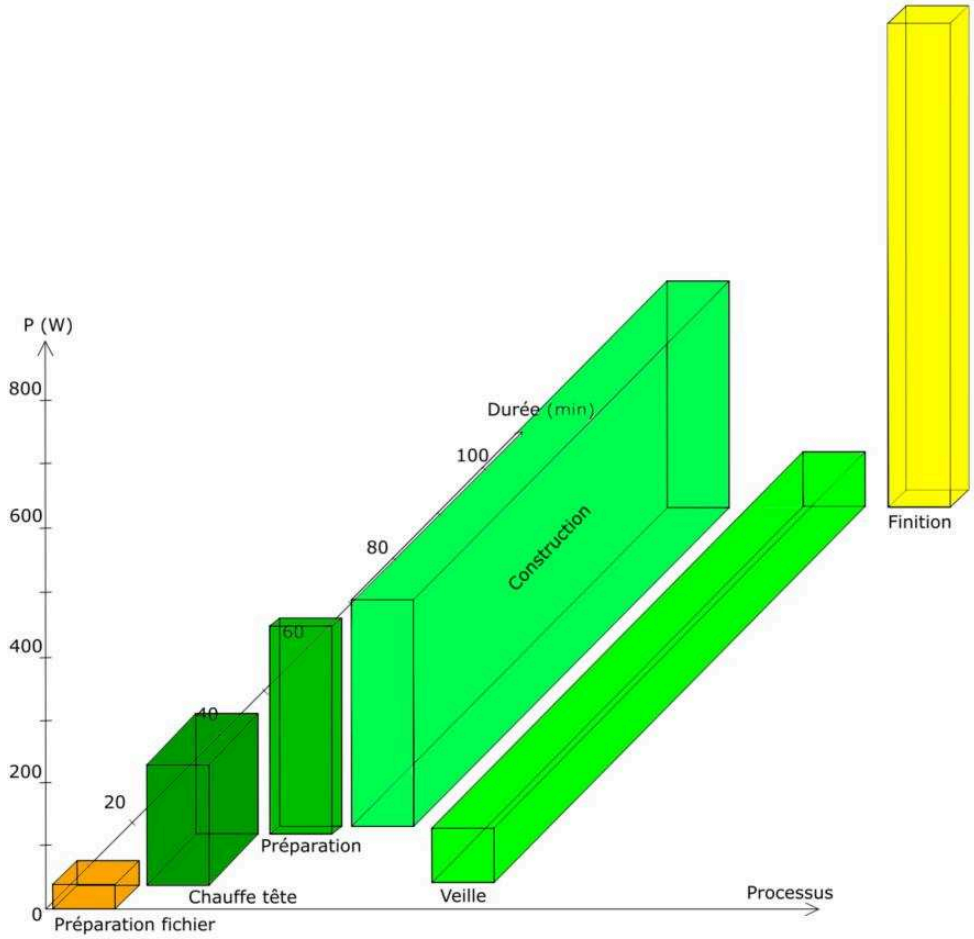


Figure 4.21 - Puissance moyenne et durée des phases de fabrication pour la première pièce du protocole expérimental (Jet de matière)

Parmi les phases dont les durées dépendent de la géométrie de la pièce, on retrouve les phases de veille et de mise en forme. Ainsi, leurs durées dépendent du temps total de fabrication ($T_{Mise\ en\ forme}$). La durée de mise en forme est déterminé à l'aide de l'équation suivante (équation 4.9) :

$$E_{Totale} = (P_{préparation\ fichier} x T_{préparation\ fichier}) + (P_{Veille} x T_{Mise\ en\ forme}) + (P_{Chauffe\ têtes} x T_{Chauffe\ têtes}) + (P_{Préparation} x T_{Préparation}) + [P_{Construction} x (T_{Construction} - (T_{Chauffe\ têtes} + T_{Préparation}))] + (P_{Finition} x T_{Finition}) \quad (4.9)$$

4.2.2. Synthèse sur la consommation d'énergie électrique

L'étude menée dans cette section nous a permis de modéliser finement le procédé de projection de matière afin d'évaluer le procédé en fonction des critères environnementaux combinés à des critères techniques et économiques.

L'objectif de cette section était de montrer que la méthodologie développée n'est pas spécifique à une machine ou à un procédé mais à un ensemble de procédé de fabrication additive. C'est ce que nous avons démontré dans cette section en appliquant et en développant la méthodologie sur une machine de projection de matière ; l'objet 30 pro.

Ainsi, nous avons pu aboutir aux modèles électrique de l'objet 30pro en appliquant la méthodologie développée précédemment. Contrairement aux machines d'extrusion de matière, ce sont les phases de mise en forme et de veille qui sont les plus consommatrices en énergie.

Dans les sections suivantes, nous présenterons les modèles de consommation de matières et de fluides.

4.3. Evaluation de la consommation de matière

L'évaluation de la quantité de matière diffère légèrement pour ce procédé de fabrication car nous utilisons l'équation 4.10 seulement pour estimer la masse de la pièce. En effet la masse volumique du matériau support n'est disponible, par conséquent, il n'est pas possible de déterminer la quantité de support consommé avec cette formule. Néanmoins, il est possible d'avoir une estimation de la masse de support à l'aide du logiciel de préparation. C'est donc ce que nous avons utilisé pour ce procédé de fabrication.

$$M_{Totale} = \rho_{Pièce} \ \text{x} \ V_{Pièce} \quad (4.10)$$

La matière utilisé pour la fabrication de la pièce sur cette machine est une résine photosensible de 1080 kg.m^{-3}. Le volume de la pièce ($V_{pièce}$) est estimé par le logiciel de préparation du fichier.

4.4. Evaluation de la consommation de fluide

Pour le procédé de projection de matière, il n'y a pas de consommation de fluide pendant la fabrication de la pièce et la finition est réalisé manuellement à l'aide du jet d'eau à haute pression. Par conséquent, le volume de fluide utilisé dépend du débit de la pompe à eau et du temps passé à nettoyer la pièce brute. Afin de mesurer le débit de la pompe, nous avons mesuré la durée qu'il fallait pour remplir un récipient d'1 litre. Dans notre cas, une fois la pompe à eau allumée (mais pas active), celle-ci avait débit de 0.027 l.s^{-1}. Des lors que l'on active le jet d'eau, le débit était de 0,094 l.s^{-1}. Sur les trois minutes de durée estimée pour réaliser la finition d'une pièce, nous avons constaté que pendant la moitié de cette durée, la pompe à eau est active et pendant l'autre moitié du temps la pompe à eau est allumée mais non active.

Cette répartition du temps a été sélectionnée en raison du mode de fonctionnement de l'appareil. En effet, nous avons pu constater pendant les manipulations que l'opérateur n'active pas la pompe pendant toute la durée du nettoyage mais par intermittence.

Ainsi, la consommation totale de fluide pour cette machine est estimée selon l'équation 4.11 :

$$V_{Manuel} = V_{(\text{Eau finition manuelle})}(d_{Pompe}, t_{Opération}) \quad (4.11)$$
$$V_{Manuel} = (0{,}094 * 90) + (0{,}027 * 90)$$

4.5. Synthèse sur l'évaluation des données d'inventaires

L'étude menée dans cette section permet de modéliser finement le procédé de projection de matière afin d'en évaluer les données d'inventaires. La mise en place de ces modèles locaux permettent d'estimer la consommation globale du procédé. Ainsi, il est possible de partir du modèle numérique de la pièce pour déterminer les données d'inventaires associées au couple pièce-procédé.

4.6. Combinaison des modèles environnementaux avec des modèles technico-économiques

Dans cette section, nous présenterons le couplage avec les modèles techniques et économiques afin d'avoir une évaluation multicritère du couple pièce-procédé.

4.6.1. Evaluation du coût de fabrication

L'estimation du coût de fabrication d'une pièce est réalisée à l'aide de l'équation 3.4 présentée dans le chapitre trois de ce manuscrit. Certaines données telles que le coût de la machine et de la matière sont spécifique à la machine étudiée. Ainsi, il faut définir des prix fixe à certains paramètres qui nous permettront par la suite d'évaluer le coût de revient en fonction de la durée de fabrication total et de la quantité de matière utilisée. Le tableau 4.18 illustre les coûts associés à ces paramètres fixes pour la machine étudiée :

$Coût_{Machine}$	60 000 Euros
Nombres d'heures d'utilisation de la machine/an	3000 heures
$Coût_{Matière\ pièce}$	375 euros /kg
$Coût_{Matière\ support}$	375 euros /kg
Coût opérateur	53,25 euros/heure

Tableau 4.18 - Coûts fixes des paramètres de l'objet 30 pro

Finalement, l'évaluation du coût de fabrication pour cette machine se fait à l'aide de l'équation 4.12

$$Coût_{Total} = [Coût_{Horaire}\ x\ T_{Mise\ en\ forme}] + [Masse_{Pièce}\ x\ 375 + Masse_{Support}\ x\ 375] + [53.25x\ (\mu + \eta)] + 10 \quad (4.12)$$

$T_{Mise\ en\ forme}$: Temps de fabrication de la pièce ;

μ : Temps mis par l'opérateur à réaliser la phase de préparation de fichier ;

η : Temps mis par l'opérateur à réaliser la phase de finition ;

4.6.2. Evaluation technique

L'évaluation de la rugosité ne peut être réalisé pour ce procédé de fabrication avec l'équation développé par Boschetto car cette équation n'est valable qu'avec les pièces réalisées par extrusion de matière. Par conséquent, nous ne pouvons pas prédire la rugosité arithmétique des pièces réalisé par projection de matière. Néanmoins, certaines études sur les propriétés mécaniques des pièces fabriquées avec ce procédé de fabrication sont disponibles dans la littérature. Pilipovic et al. ont étudié l'état de surface de pièces normalisés pour les essais de tractions pour deux matériaux différents. Les valeurs de rugosités qu'ils relèvent sont de 1.64 µm pour le matériau VeroBlack et 1µm pour le FullCure (Pilipović2009). Kazmer (Kazmer2017) à l'état de surface et aux respects des spécification géométriques pour une pièce test (figure 4.22) réalisé avec quatre procédés de fabrication additive différents : La stéréolithographie, la fusion sur lit de poudre, l'extrusion de matière et la projection de poudre. Il relève un Ra de 10 µm pour la pièce réalisée par projection de matière.

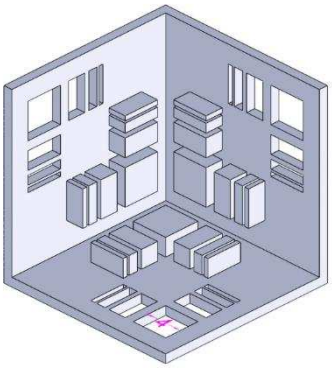


Figure 4.22 - Pièce test utilisée par Kazmer (Kazmer2017)

Velasco et al. ont étudié les propriétés mécaniques et géométriques d'une pièce servant d'échafaudage, associés à des cellules souches et des facteurs de croissance et de différenciation, pour la régénération osseuse. Les auteurs relèvent une rugosité de 4.55 µm pour une pièce réalisée en Fullcure RGD720 (Velasco2016). D'autres études sur les propriétés mécaniques et géométriques de pièces réalisés avec ce procédé sont également disponibles (Li2017)(Mueller2015)(Yap2017).

Bien qu'il existe des études sur l'état de surface des pièces réalisées par projection de matière, celle-ci ne sont pas encore assez mature à ce jour pour proposer un modèle prédictif en fonction de l'angle de dépôt et de la hauteur de couche. Par conséquent, les valeurs de rugosités dans la suite de ce manuscrit pour ce procédé de fabrication additive ont été obtenues par des mesures.

5. Stockage des données

Jusqu'à présent, nous avons appliqué la méthodologie d'acquisition des données présenté dans le chapitre 3 de ce manuscrit sur différentes machines de fabrication additive. Les résultats ont été présentés en détail pour une machine d'extrusion de matière et de projection de matière. Cette étape de « collecte des données » nous a permis de mettre en place des modèles prédictifs concernant les données d'inventaires de ces procédés ainsi que des modèles techniques et économiques. Toutes ces données sont ensuite stockées dans une base de donnée afin de faciliter l'utilisation de ces modèles sur différentes géométries de pièces. Dans notre cas, la création d'une telle base de donnée était nécessaire car nous avons appliqué la méthodologie sur plusieurs machines de fabrication additive et ainsi obtenu une multitude d'équations permettant de prédire différentes données.

De plus, le fait d'avoir regroupé l'ensemble de ces données sur un même logiciel permet de réaliser des comparaisons de machines en montrant les résultats de l'ensemble des machines étudiées sur un même graphique. Dans le chapitre suivant, nous nous intéresserons à l'exploitation de ces modèles sur un exemple industriel.

6. Synthèse

La méthodologie d'évaluation multicritère développée dans ce chapitre considère l'ensemble des étapes de fabrication d'une pièce. Dans le cadre d'une analyse environnementale, il est important d'avoir une vision globale du processus de fabrication. L'évaluation des données d'inventaires est réalisée de la transformation de la matière première jusqu'à la finition de la pièce en passant par la

préparation du fichier et la mise en forme. Ainsi, nous avons appliqué cette méthodologie au procédé d'extrusion de matière sur un total de cinq machines.

Dans l'objectif d'évaluer les données d'inventaires, nous avons développé des modèles locaux permettant d'estimer les consommations globales. Ces modèles, appuyés sur des expérimentations, permettent d'évaluer la consommation énergétique, de matière et de fluide de l'ensemble des phases de fabrication du procédé. De plus, il est tout aussi important de prendre en compte la consommation des fluides et de matières dans le cadre d'une analyse de cycle de vie. Par conséquent, nous avons développé des modèles locaux permettant d'évaluer la consommation de fluides et de matières.

Ces modèles environnementaux ont été combinés avec des modèles techniques et économiques afin de pouvoir comparer des machines sur plusieurs critères en même temps et ainsi laisser le choix à l'utilisateur du ou des critères qu'il souhaite privilégier (Yosofi2018). Ainsi cet outil de modélisation permet de quantifier les données d'inventaire, le coût et la rugosité arithmétique à partir du modèle numérique de la pièce et la durée de fabrication estimée par le logiciel de préparation de fichier. Cet outil peut donc être utilisé dès l'étape de conception afin d'accompagner le concepteur dans son choix de procédés, d'orientation ou de paramètres de fabrication afin de minimiser les critères environnementaux, techniques, économiques ou en fonction de plusieurs critères en même temps.

Dans ce chapitre, nous avons appliqué la méthodologie au procédé d'extrusion de matière dans un premier temps puis sur le procédé de projection de matière. Ainsi nous avons pu montrer la généricité de la méthodologie en l'appliquant sur plusieurs procédés de fabrication additive.

Chapitre 5 : Exploitation des modèles sur un cas industriel

Sommaire

1	Présentation de l'outil informatique	132
2	Présentation de la pièce du cas d'étude	135
3	Fabrication par d'extrusion de matière	136
4	Comparaison des machines d'extrusion de matière	145
5	Fabrication par projection de matière	148
6	Comparaison des machines de projection de matière	152
7	Synthèse	154

Dans ce chapitre, la méthodologie présentée précédemment sera appliquée à la technologie de projection de matière afin de prouver la généricité de la méthodologie sur d'autres procédés de fabrication additive.

Dans une première partie, nous allons présenter **le principe de fonctionnement de l'outil informatique**.

Dans une **deuxième partie**, nous **présenterons** la pièce du cas d'étude.

Dans une **troisième partie**, nous présenterons en détails **les résultats** obtenus pour une machine d'extrusion de matière.

Puis nous **présenterons** les résultats sur **les autres machines d'extrusion de matière** étudiées dans le cadre de cette thèse pour **comparer ces machines** entre elles dans une **quatrième partie**. Nous nous servirons de l'outil graphique d'aide à la décision afin de faire un choix de machine

Dans une **cinquième partie**, nous présenterons en détails **les résultats** obtenus pour une machine de projection de matière.

Puis nous **présenterons** les résultats sur **les autres machines de projection de matière** afin de **comparer ces machines** entre elles dans une **sixième partie**.

La **dernière partie** de ce chapitre permettra de synthétiser nos travaux.

1. Présentation de l'outil informatique

Nous avons montré jusqu'à présent comment il est possible d'aboutir à des modèles prédictifs à l'aide de la méthode d'acquisition des données présentée dans le chapitre 3 de ce manuscrit. Cette méthodologie a été appliqué sur 9 machines de fabrication additives, ce qui nous a permis d'obtenir les différents modèles techniques, économiques et environnementales. Le tableau 5.1 énumère les machines étudiées :

Code	Machine
FDM1	Makerbot replicator 2X
FDM2	Rapman 3.2
FDM3	Stratasys Mojo
FDM4	HP designjet 3D
FDM5	Dimension Elite
JET1	Objet 30 pro
JET2	Objet260 connex
JET3	Objet350 connex
SLS	ProX DMP 100

Tableau 5.1 - Machines étudiées dans le cadre de cette thèse

Dans ce chapitre, nous exploiterons les modèles obtenus à l'aide de la méthodologie sur une pièce industrielle. En effet, l'ensemble des données nécessaire à la création des modèles ont été acquises. Il est désormais possible d'utiliser directement les modèles afin de prédire des données techniques, économiques et environnementales pour n'importe quelle forme de pièce (figure 5.1).

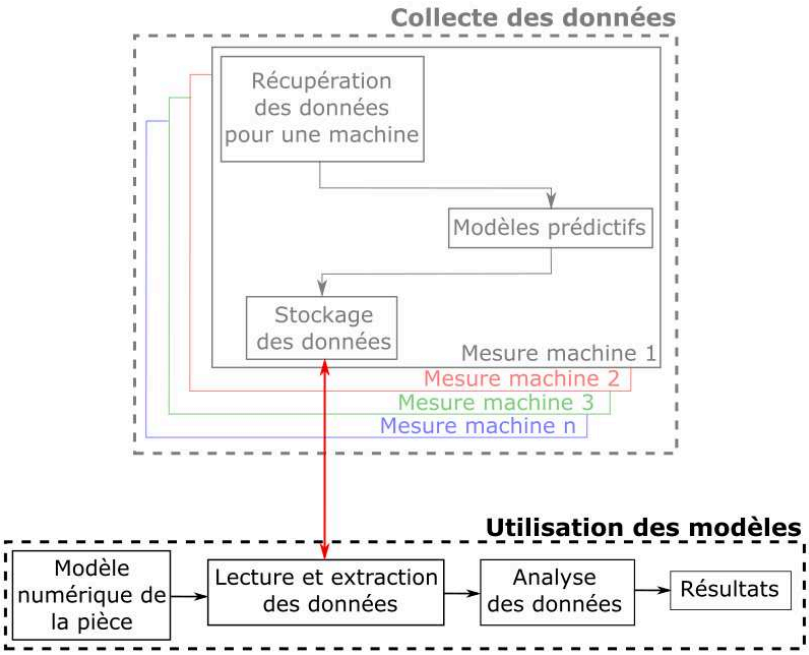


Figure 5.1 - Méthodologie d'évaluation multicritère – utilisation des modèles

1.1. Présentation

L'outil informatique qui a été développé a été créé en lien avec la méthodologie que nous avons présentée dans le chapitre 3 de ce manuscrit. Il permet au concepteur de pouvoir prédire les données d'inventaires, le coût et la rugosité liés à la fabrication du produit qu'il conçoit. Ce démonstrateur a été développé sous le logiciel de calcul numérique Matlab r2017a.

Cet outil informatique est décomposé en trois modules. Le premier est la lecture et l'extraction des informations de la base de données nécessaires à l'évaluation du couple pièce/procédé.

A partir de ces données et de certaines informations fournies par le concepteur, le logiciel analyse les données et calcul l'ensemble des consommations du couple pièce/procédé

Finalement, le dernier module de cet outil propose à l'utilisateur un affichage des résultats environnementaux, techniques et économiques sur le même plan (même graphique).

1.2. Module 1 : lecture et extraction des données

Dans un premier temps, l'utilisateur sélectionne la ou les machines de fabrication additive qu'il souhaite étudier. Il est possible de sélectionner les neuf machines de fabrication additive étudiées dans le cadre de cette thèse. De plus, l'outil offre la possibilité de réaliser l'étude de plusieurs machines en même temps afin de réaliser des comparaisons de machines pour une même pièce.

A partir de la machine sélectionnée, il est possible de renseigner certains paramètres comme le matériau choisi pour la pièce d'étude. Par exemple, pour les machines d'extrusion de matière ayant la capabilité d'utiliser d'autres matériaux que l'ABS, il est possible de sélectionner le matériau souhaité si les données sont disponibles.

Ensuite, l'utilisateur doit rentrer dans l'outil informatique certaines informations qui sont liées à la géométrie de la pièce étudiée. Ces informations sont les suivantes :

- La durée totale de mise en forme ($T_{Mise\ en\ forme}$) de la pièce obtenue par le logiciel de préparation du fichier numérique
- Le volume de la pièce ($V_{Pièce}$) et du support ($V_{Support}$) obtenu également avec le logiciel de préparation du fichier numérique
- La durée nécessaire à la préparation du fichier ($T_{préparation\ fichier}$) et à la finition ($T_{Finition}$) estimée par l'utilisateur
- La hauteur de couche (L) qui est une donnée du procédé de fabrication
- L'angle de dépôt (α) des zones de la pièce que l'on souhaite étudier obtenues à l'aide de la CAO

La figure 5.2 illustre l'interface graphique de la sélection des données :

Date	15/03/2017
Nom de la pièce	Femtocell
Machine	FDM 4
Matériau	
Durée de mise en forme (h)	
Volume pièce (cm^3)	
Volume support (cm^3)	
Durée de préparation de fichier (h)	
Durée de la finition (h)	
Hauteur de couche (mm)	
Angle de dépôt (°)	

FDM 1
FDM 2
FDM 3
FDM 4
FDM 5
JET 1
JET 2
JET 3

Figure 5.2 - Interface graphique de la sélection des données

Dans un second temps, une fois que l'utilisateur a rentré toutes les informations liées à la géométrie de la pièce, l'outil informatique va permettre d'évaluer le couple pièce/procédé d'un point de vue technique, économique et environnemental à l'aide des équations qui ont été obtenu grâce la méthode d'acquisition et de caractérisation des données et qui sont stockées dans la base de donnée. Ainsi, l'ensemble des consommations dues au procédé de fabrication sont calculés.

1.3. Module 3 : Affichage des résultats

Le dernier module de notre outil informatique permet de rendre compte à l'utilisateur de l'ensemble des données d'inventaires estimées, ainsi que le coût et la rugosité associés. Pour la fabrication de la pièce. La figure 5.3 illustre un exemple d'affichage de résultats obtenus à l'issu de ce troisième module. De plus, l'utilisateur est en mesure d'analyser les sources de consommations prédominantes et par conséquent de faire un choix de conception différent à l'aide de la représentation graphique des puissances et des durées des différentes phases de fabrication du procédé de fabrication (figure 4.8 et 4.15).

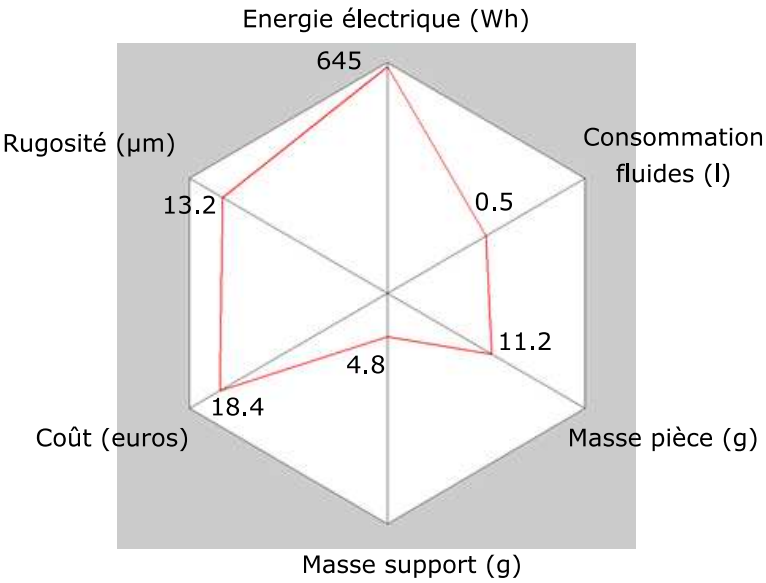


Figure 5.3 - Exemple d'affichage des résultats obtenu à l'issu du troisième module

Dans la suite de ce manuscrit, nous nous intéresserons à l'utilisation des modèles définis dans le chapitre précédent pour une pièce industrielle. Ainsi, nous définirons dans un premier temps la pièce du cas d'étude, puis nous présenterons les résultats pour les machines d'extrusion de matière et enfin nous présenterons les résultats pour les machines de jet de matière.

2. Présentation de la pièce du cas d'étude

2.1. Partenaire scientifiques et industriel

L'exploitation de la méthodologie sur autant de machines de fabrication additive n'aurait pas été possible sans la présence du Réseau EcoSD et le projet de recherche collaboratif (PRC) qui nous a permis de travailler avec d'autres laboratoires et un partenaire industriel.

Le Réseau EcoSD est une association loi 1901 qui regroupe 25 organismes publiques (ENS Rennes, Arts et métiers ParisTech, Grenoble INP…) et 6 organismes privés (Orange, PSA groupe, Evea…). L'objectif principal de l'association est de favoriser des échanges entre chercheurs, entre industriels et entre chercheurs et industriels, afin de créer et diffuser les connaissances dans le domaine de l'Eco-conception de Systèmes pour un Développement durable en France et à l'international.

Ce réseau initie, finance et organise également des projets de recherche collaboratifs auxquels des universitaires et des industriels prennent part à une dynamique de recherche articulée autour de groupes de travail. C'est dans ce cadre que nous avons travaillé avec la société Orange qui s'intéresse à l'impact environnemental de leurs objets connectés à internet. Dans ces catégories d'objets, on retrouve des objets qui sont généralement fabriqués en matériau polymère comme par exemple des modems, des relais wifi (femtocell) ou encore des clés 3G/4G. La société Orange souhaite donc maîtriser l'ensemble des impacts liés à la fabrication de ces pièces, depuis les phases de prototypage (Extrusion de matière, photopolymérisation en cuve, coulée sous vide dans moules silicones, …) jusqu'aux phases de production industrielle grande série (généralement injection plastique).

2.2. Présentation de la pièce d'étude

La pièce étudiée dans le cadre de cette thèse est présentée figure 5.4a. Cette pièce de dimension 100 x 100 x 28 mm représente un prototype de femtocell. Elle est constituée de plusieurs zones avec des angles de fabrication différents et nécessite également du support afin de soutenir les zones de la pièce en porte à faux. Etant donné que cette pièce est un prototype visuel, les deux zones de la pièce qui nous intéresserons pour la caractérisation technique sont les zones A et B qui sont respectivement fabriquées avec un angle de 74.6° et de 55.3° (figure 5.4b).

(a) Vue isométrique

(b) Les zones d'intérêt de la pièce

Figure 5.4 - Prototype de femtocell proposé par la société Orange

Afin d'aboutir à une comparaison des performances environnementales de cette pièce réalisée par diffèrents moyens de fabrication, nous avons appliqué la méthodologie sur les machines de certains partenaires du réseau EcoSD dont l'institut de mécanique et d'ingénierie (I2M) à Bordeaux, le

laboratoire de Conception de Produits et d'Innovation (LCPI) à Paris et le laboratoire de Conception de Système Mécanique et Robotique (COSMER) à Toulon. Ainsi, nous avons caractérisé le parc machines des partenaires du réseau grâce à la méthodologie et nous avons proposé une cartographie des machines permettant de faire un choix de technologies de prototypage en prenant en compte le volet environnemental, associé à des données technico-économiques.

3. Fabrication par extrusion de matière

3.1. Application sur la HP designjet 3D

Cette section a pour objectif de présenter les résultats de l'application de la méthodologie sur le prototype de femtocell proposé par la société Orange (figure 5.4) pour la machine d'extrusion de matière dont les résultats ont été détaillés dans le chapitre précédent (HP designjet 3D (FDM4)).

Pour la fabrication de cette pièce, le logiciel de préparation du fichier numérique a estimé une durée de fabrication de 3h23 min (203 minutes), un volume de matière nécessaire à la fabrication de la pièce et du support de respectivement 62.9 cm^3 et 14.2 cm^3. Nous connaissons également les temps nécessaires à la préparation du fichier (5 minutes) et à la finition de la pièce (360 minutes). De plus, nous connaissons la hauteur de couche (L) et les angles de dépôts des zones de la pièce qui nous intéressent. Le tableau 5.2 récapitule les données d'entrée nécessaire à l'évaluation multicritère du produit.

$T_{Farication}$	3h20
$V_{Pièce}$	62,9 cm^3
$V_{Support}$	14,2 cm^3
$T_{préparation\ fichier}$	5 min
$T_{Finition}$	6 heures
Hauteur de couche (L)	0,25 mm
Angle de dépôt	Zone A : 74,6°
	Zone B : 55,3°

Tableau 5.2 - Données d'entrées nécessaire à l'évaluation multicritère

A l'aide de ces données d'entrées obtenues grâce aux informations du modèle numérique de la pièce, nous sommes capables de prédire les données d'inventaire, le coût de fabrication et la rugosité du couple pièce-procédé. Les tableau 5.3 à 5.7 représentent respectivement les données estimées et réelles pour la consommation d'énergie électrique (tableau 5.3), la consommation de matière et de support (tableau 5.4), la consommation de fluide (tableau 5.5), une représentation du coût (tableau 5.6) et enfin la rugosité pour les deux zones A et B de notre cas d'étude (tableau 5.7).

	Estimée (Wh)							Réelle (Wh)	Ecart
	$T_{Fabrication}$	$E_{Préparation\ fichier}$	E_{Veille}	$E_{Chauffe\ têtes}$	$E_{Construction}$	$E_{Finition}$	$\mathbf{E_{Totale}}$	$\mathbf{E_{Totale}}$	%

FDM 4	3h23	2,63	1370	6,92	266	4800	**6445**	**6340**	**1,63**

Tableau 5.3 - Energie électrique (FDM4)

	Estimée	Réelle	Ecart	Estimée	Réelle	Ecart
	Masse pièce (g)		%	Masse Support (g)		%
FDM 4	65,5	63,3	**3,36**	14,8	13,7	**7,43**

Tableau 5.4 - Masse de la pièce et du support (FDM4)

	V_Procédé	V_Auto	V_Manuel	V_total (l)
FDM 4	0	0,5	0	**0,5**

Tableau 5.5 - Volume d'eau consommé (FDM4)

	Estimée				Réelle	Ecart
	$Coût_{Equipement}$	$Coût_{Matière}$	$Coût_{Personnel}$	**$Coût_{Total}$ (€)**	**$Coût_{Total}$ (€)**	%
FDM 4	10,4	22,8	8,52	**41,7**	**42,5**	**1,92**

Tableau 5.6 - Coût de fabrication (FDM4)

	Ra zone A (µm)		Ecart	Ra zone B (µm)		Ecart
	Estimée	Réel	%	Estimée	Réelle	%
FDM 4	16,6	18,8	**13,3**	19,5	22,6	**15,9**

Tableau 5.7 - Rugosité de la zone A et B (FDM4)

La figure 5.5 illustre les résultats obtenus sous forme de graphe radar. Sur ce graphe, les nombres accompagnés d'un astérisque ainsi que la courbe rouge représentent les résultats estimés. Tandis que les autres nombres et la courbe bleu représentent les résultats réels. On remarque globalement que les écarts pour les données d'inventaires entre les valeurs estimées et réelles sont relativement faible. Une des raisons pour laquelle ces écarts sont faibles est que l'écart entre la durée réelle de mise en forme ($T_{Mise\ en\ forme}$) et sa durée estimée n'est que de 1.5%. Etant donné que cette durée de fabrication intervient dans notre équation électrique et de coût, les écarts sont également faibles. L'utilisation de formule empirique pour estimer la masse de la pièce et de support semble judicieux car nous obtenons un écart inférieur à 10%. Dans notre cas, le volume d'eau consommé représente la quantité d'eau nécessaire à l'immersion totale de la pièce. Finalement la formule développée par Boschetto afin d'estimer la rugosité arithmétique d'une pièce réalisée par extrusion de matière est satisfaisante en vue des écarts obtenues pour les deux zones de notre cas d'étude.

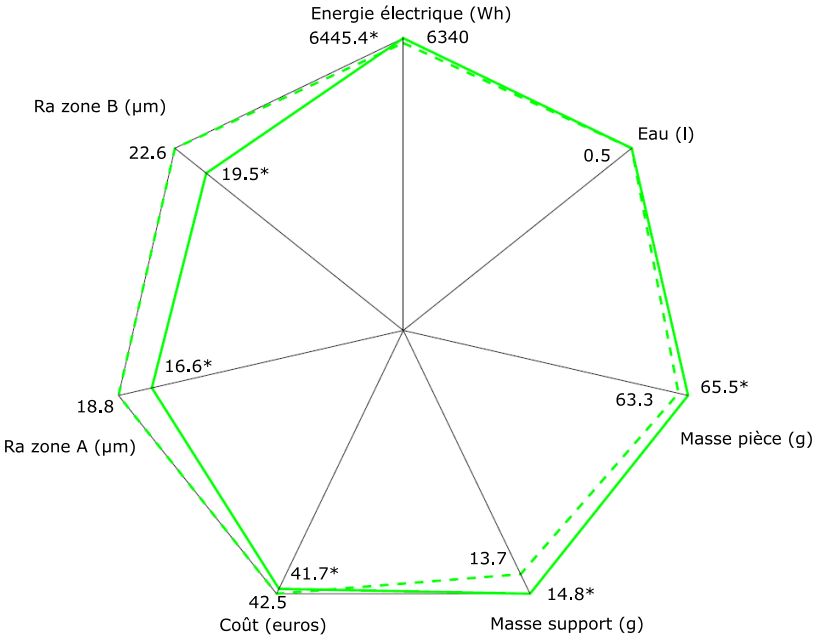


Figure 5.5 - Représentation graphique des données estimées (ligne) et réelles (pointillés)

A travers cette étude, nous avons montré qui est possible d'évaluer le couple pièce-procédé en fonction des critères environnementaux combinés à des aspects technico-économique de façon précise. Il est possible d'aller plus loin dans cette démarche d'évaluation en intégrant les consommation et rejets liées à la transformation de la matière première.

En exploitant les équation 4.1 et 4.2 du chapitre 4, nous pouvons estimer une consommation d'énergie électrique pour la fabrication de 65.5 grammes de matière équivalente à 4005.8 Wh. De plus il faut prendre en compte la perte matière pendant la purge qui est de 180 grammes et l'eau nécessaire au refroidissement du fil plastique de 0,16 L. La figure 5.6 représente l'évaluation multicritère du prototype de femtocell pour la HP designjet 3D **en prenant en compte l'ensemble des étapes de production de la pièce qui sont la transformation de la matière première, la préparation du fichier, la fabrication de la pièce et enfin la finition.**

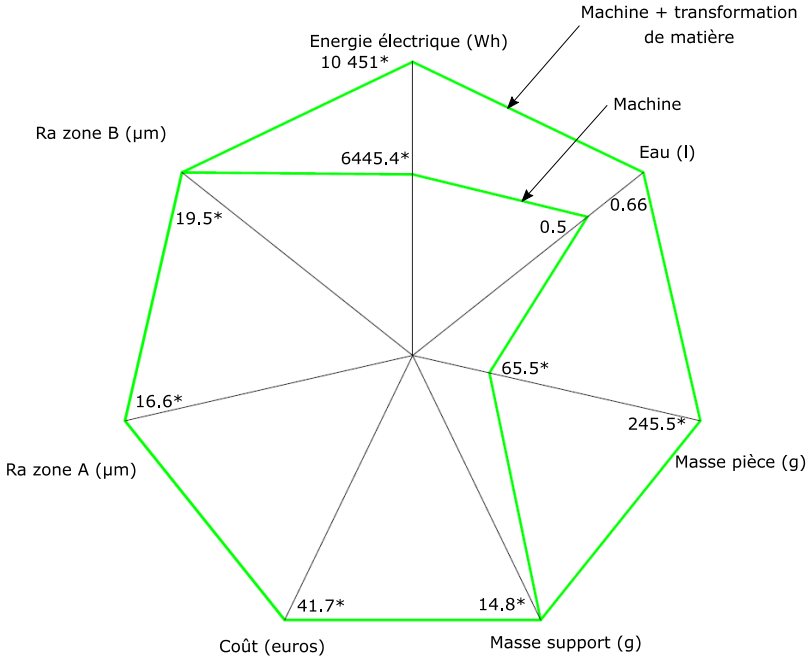
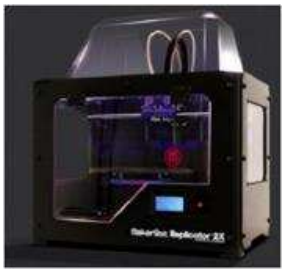


Figure 5.6 - Evaluation multicritère du prototype de femtocell avec et sans la transformation de la matière

3.2. Evaluation multicritère du prototype de femtocell pour d'autres machines d'extrusion de matière.

Cette section a pour objectif de présenter les résultats obtenus pour notre cas d'étude (figure 5.4) sur les quatre autres machines d'extrusion de matière. La figure 5.7 illustre ces différentes machines. Parmi elle, nous pouvons retrouver deux machines de bureau (moyenne gamme) qui sont la Makerbot replicator 2X (FDM1) et la Rapman 3.2 (FDM2) et deux machines de typologie industrielle qui sont la Stratasys Mojo (FDM3) et la Stratasys Dimension elite (FDM5). Le détail de l'ensemble des résultats des différentes machines est donné en annexe A.



(FDM1) Makerbot replicator 2X

(FDM2) Rapman 3.2

(FDM3) Stratasys mojo

(FDM5) Stratasys dimension elite

Figure 5.7 - Machines d'extrusion de matière étudiées

L'application de la méthodologie sur ces autres machines d'extrusion de matière nous permettra de comparer ces machines en fonction des mêmes critères de comparaisons. En effet, la méthode d'acquisition des données est la même pour l'ensemble des machines. De plus les machines seront comparées avec la prise en compte de l'ensemble des étapes de fabrication montrée dans la section précédente.

Le tableau 5.8 illustre les données estimées et réelles pour la consommation d'énergie électrique des quatre autres machines d'extrusion de matière. Nous pouvons constater que pour la réalisation de cette pièce, la machine la plus consommatrice d'un point de vue énergétique est la FDM5 en raison d'une forte consommation électrique pendant la phase de finition de la pièce. De plus les écarts entre les énergies réelles et estimés sont acceptables car ils sont inférieurs à 5 % pour les quatre machines.

	Estimée (Wh)							Réelle (Wh)	Ecart
	$T_{Fabrication}$	$E_{Préparation\ fichier}$	E_{Veille}	$E_{Chauffe\ têtes}$	$E_{Construction}$	$E_{Finition}$	$\mathbf{E_{Totale}}$	$\mathbf{E_{Totale}}$	**%**
FDM 1	4h31	2,63	19,9	21,7	526	0	**571**	**585**	**2,51**
FDM 2	10h11	2,63	33,3	3,02	482	0	**521**	**533**	**2,22**
FDM 3	5h20	2,63	96,6	71	652	1033	**1856**	**1910**	**2,93**
FDM 5	4h22	2,63	202,8	4,7	331	5400	**7666**	**7460**	**2,7**

Tableau 5.8 - Consommation d'énergie électrique du prototype de femtocell pour quatre machines d'extrusion de matière

Le tableau 5.9 présente la consommation de matière estimée et réelle pour les quatre machines. Nous pouvons remarquer que l'utilisation d'une formule empirique pour estimer la masse de la pièce et du support offre des résultats corrects. L'écart entre le réel et l'estimé pour la masse de la pièce est inférieur à l'écart pour la masse du support car les masses en jeux sont plus importantes.

	Estimée	Réelle	Ecart	Estimée	Réelle	Ecart
	Masse pièce (g)		%	Masse Support (g)		%
FDM 1	81,5	78,8	**3,31**	11,4	10,1	**11,4**
FDM 2	92,3	90,1	**2,38**	13	11,2	**13,9**
FDM 3	65,3	62,8	**3,83**	12,4	11,1	**10,5**
FDM 5	52,9	50,4	**4,73**	18,9	16,5	**12,7**

Tableau 5.9 - Consommation de matière et de support du prototype de femtocell pour quatre machines d'extrusion de matière

Le tableau 5.10 représente la consommation de fluide lors de la réalisation du cas d'étude pour les quatre machines. Comme pour la machine précédemment étudiée (FDM4), La consommation de fluide pour la FDM3 et FDM5 se fait pendant la phase de finition. Les machine FDM1 et FDM2 n'ont pas de matière support soluble, par conséquent la matière support est enlevée manuellement.

	V_Procédé	V_Auto	V_Manuel	V_total (l)
FDM 1	0	0	0	**0**
FDM 2	0	0	0	**0**
FDM 3	0	0,5	0	**0,5**
FDM 5	0	0,5	0	**0,5**

Tableau 5.10 - Consommation de fluide lors de la réalisation du prototype de femtocell pour quatre machines d'extrusion de matière

Le tableau 5.11 le coût de revient de la pièce étudié pour les quatre machines. Dans notre cas, c'est la machine FDM5 qui a le coût de revient le plus élevé à cause du coût de machine et nombre d'heures d'utilisation/an.

	Estimée			Réelle		Ecart
	$Coût_{Equipement}$	$Coût_{Matière}$	$Coût_{Personnel}$	$Coût_{Equipement}$	$Coût_{Matière}$	%
FDM 1	6,02	4,35	4,26	**14,6**	**14,8**	**1,37**
FDM 2	5,46	4,35	4,26	**14,1**	**14,2**	**0,71**
FDM 3	17,6	34	8,52	**60,1**	**60,4**	**0,50**
FDM 5	90,2	28,1	8,52	**126,8**	**125,3**	**1,14**

Tableau 5.11 - Coût de revient du prototype de femtocell pour quatre machines d'extrusion de matière

Finalement, le tableau 5.12 représente les valeurs de rugosité arithmétiques des deux zones d'intérêts de la pièce du cas d'étude pour les quatre machines.

	Ra zone A (µm)		Ecart	Ra zone B (µm)		Ecart
	Estimée	Réel	%	Estimée	Estimée	Réel
FDM 1	13.3	14.5	**9.02**	15.5	16.6	**7.10**
FDM 2	16.6	18.8	**13.3**	19.5	22.6	**15.9**
FDM 3	11.8	13.3	**12.7**	13.8	15.2	**10.1**
FDM 5	16.6	18.8	**13.3**	19.5	22.6	**15.9**

Tableau 5.12 - Coût de revient du prototype

Les figures 5.8 à 5.11 illustrent respectivement la représentation graphique de ces résultats pour la machine FDM1, FDM2, FDM3 et FDM5.

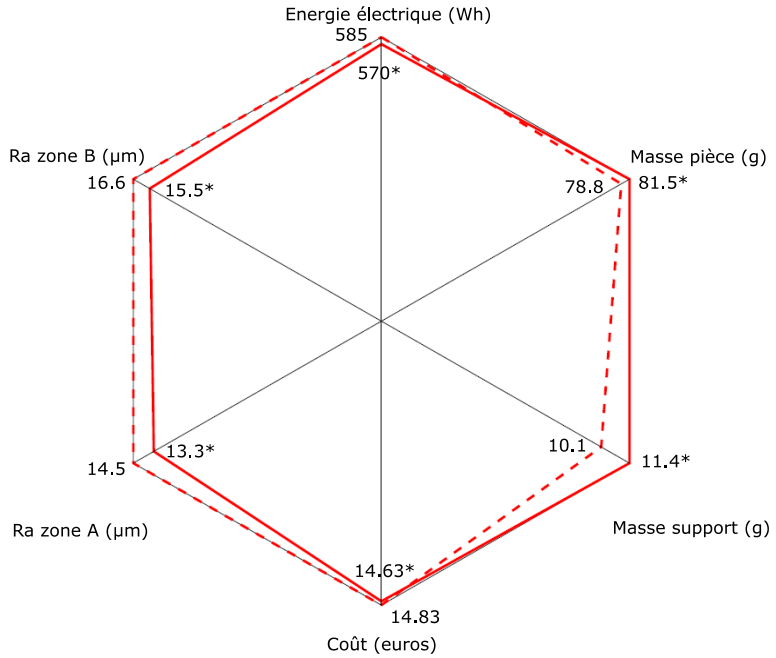


Figure 5.8 - Représentation graphique des données estimées (ligne) et réelles (pointillés) pour la Makerbot replicator 2X (FDM1)

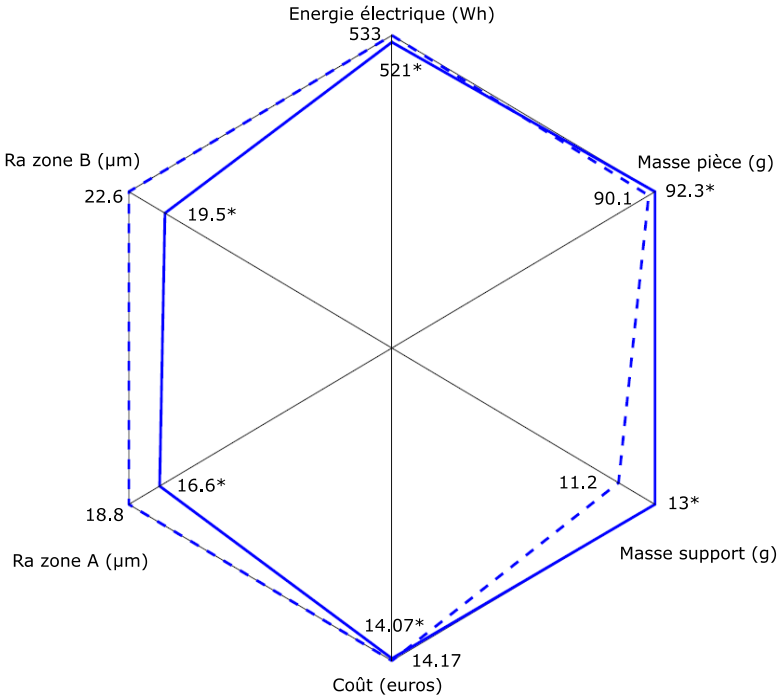


Figure 5.9 - Représentation graphique des données estimées (ligne) et réelles (pointillés) pour la Rapman 3.2 (FDM2)

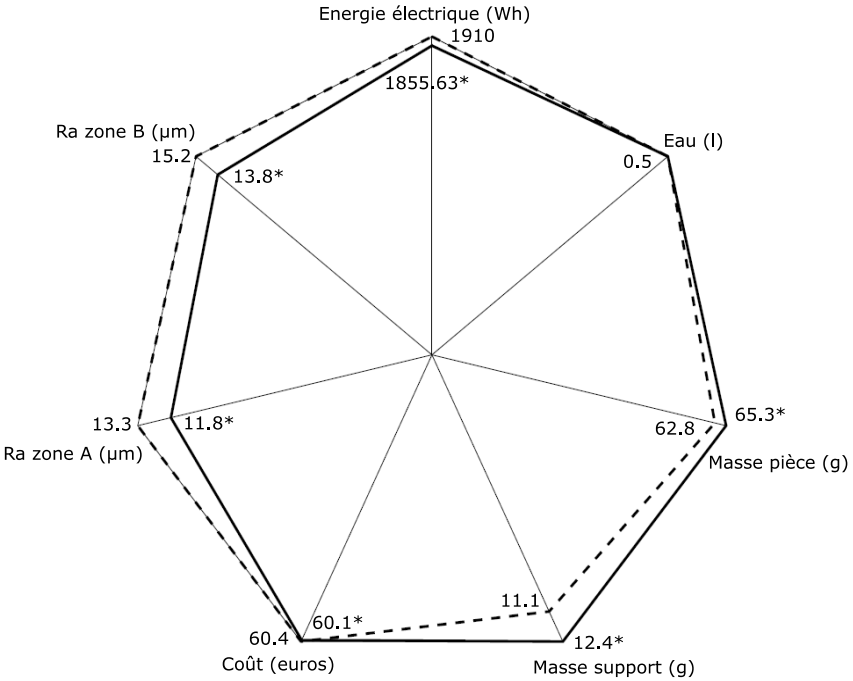


Figure 5.10 - Représentation graphique des données estimées (ligne) et réelles (pointillés) pour la Stratasys mojo (FDM3)

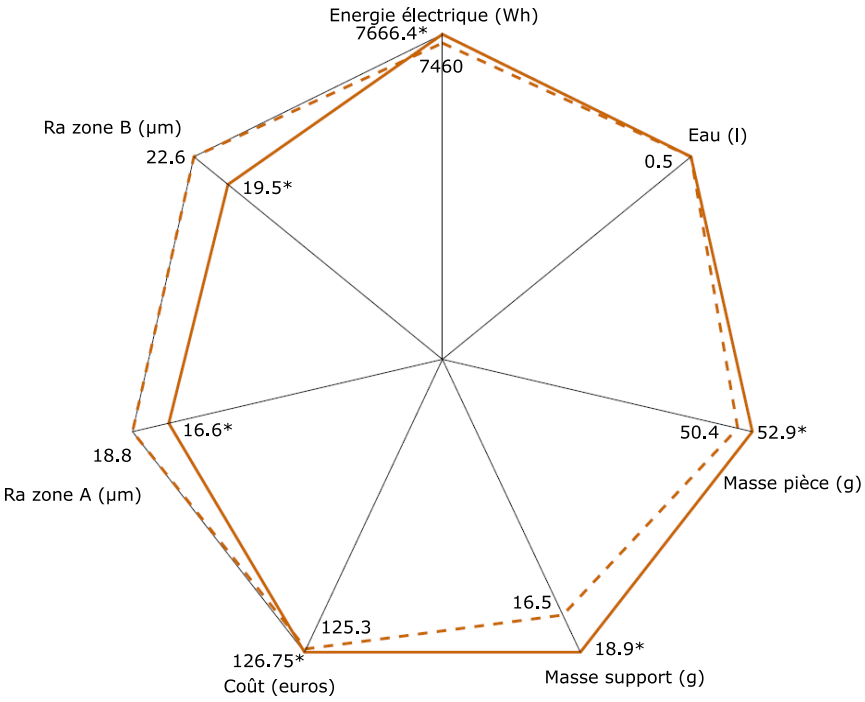


Figure 5.11 - Représentation graphique des données estimées (ligne) et réelles (pointillés) pour la Stratasys Dimension elite (FDM5)

3.3. Synthèse

L'étude menée dans cette section montre que la méthodologie proposée dans ces travaux de thèse permet de modéliser finement les données d'inventaires, la rugosité arithmétique et le coût de revient du couple pièce-procédé. La méthodologie considère l'ensemble des étapes de production de la pièce, de la transformation de la matière jusqu'à la finition de la pièce. Dans cette section, nous avons appliqué la méthodologie sur cinq machines d'extrusion de matière. Les modèles d'évaluation des machines ont été mis en place avec la méthode d'acquisition, ce qui nous permet de comparer ces machines entre elles avec les mêmes critères de comparaison et donc de faire un choix de machine en fonction du critère que l'on souhaite privilégier.

4. Comparaison des machines d'extrusion de matière

Dans cette section, nous avons cherché à comparer les machines entre elles à l'aide de l'outil graphique proposé dans cette méthodologie. En effet, il est possible d'avoir les résultats de plusieurs machines sur un même graphique afin d'aider l'utilisateur à faire un choix de machine.

Dans notre cas, nous avons deux typologies de machine différentes. Ainsi, nous avons comparé les deux machines de bureau entre elles (FDM1 et FDM2) en combinant sur un même graphique les données pour ces deux machines (figure 5.12).

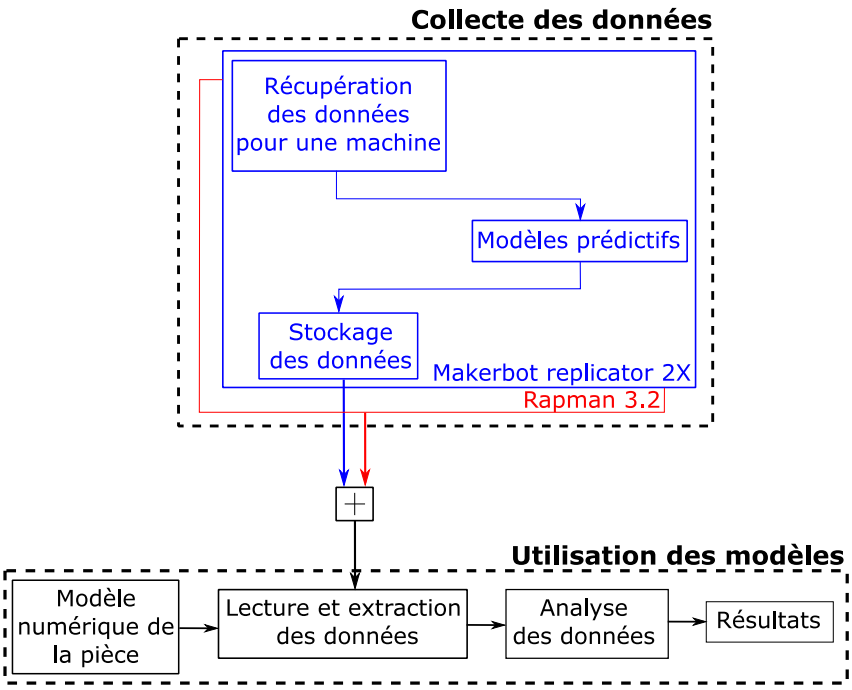


Figure 5.12 - Combinaison des données pour FDM 1 et FDM 2

Les trois machines industrielles sont également comparées entre elles (FDM3, FDM4 et FDM5) sur un même graphique (5.13).

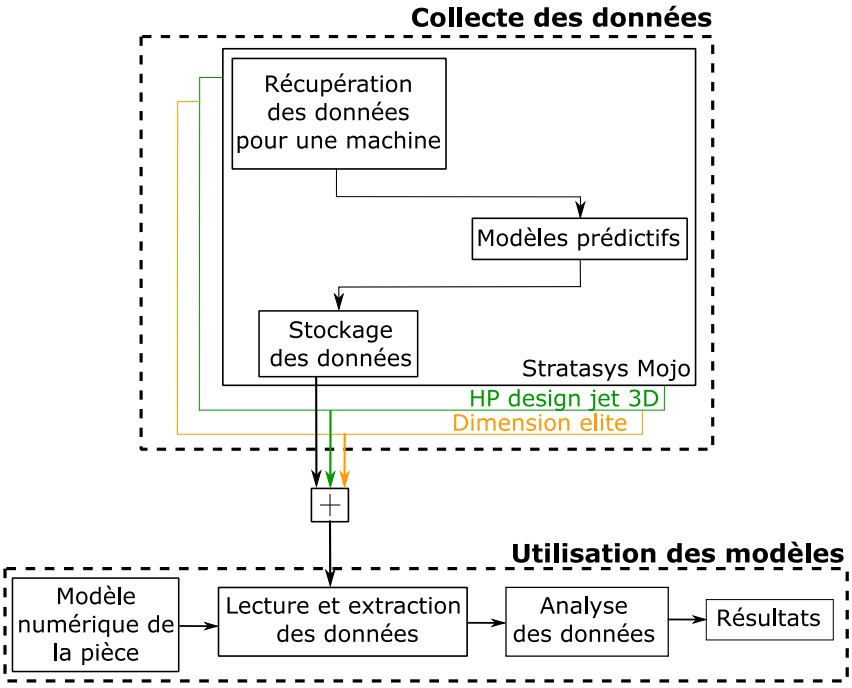


Figure 5.13 - Combinaison des données pour FDM 3, FDM 4 et FDM 5

L'écart des puissances entre les deux typologies de machine étant trop important, le choix, d'un point de vue environnemental, serait toujours porté sur les machines de bureau. La figure 5.14 représente l'évaluation multicritère des deux machines de bureau et la figure 5.15 représente l'évaluation des trois machines industrielles. **Sur ces courbes nous avons également intégré les consommations et**

rejets de la transformation de la matière en fonction des différentes masses estimées de la pièce du cas d'étude.

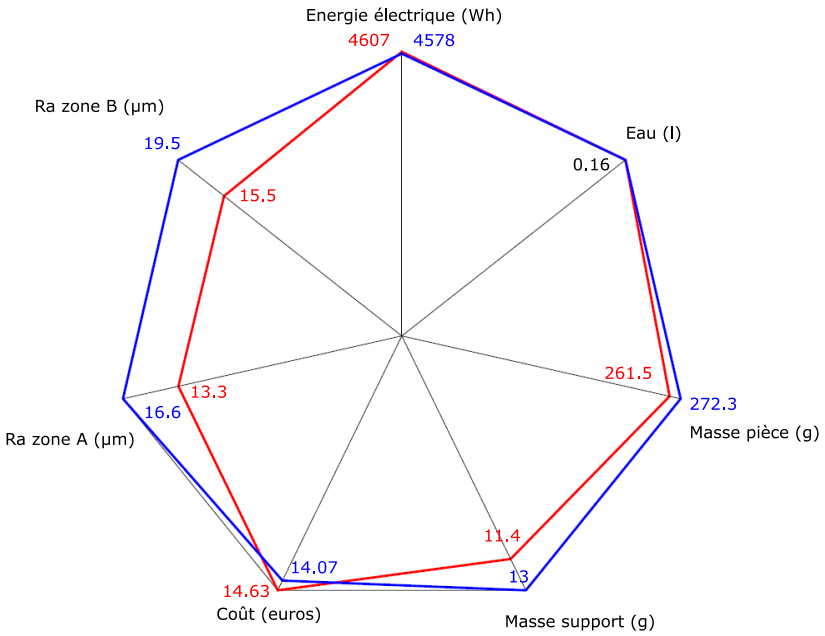


Figure 5.14 - Evaluation multicritère de FDM1 (rouge) et de FDM2 (bleu)

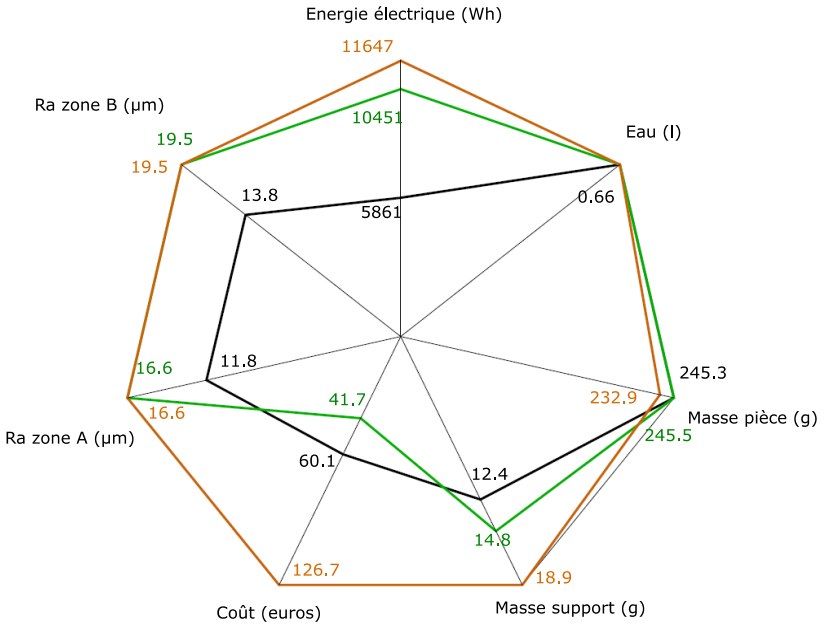


Figure 5.15 - Evaluation multicritère de FDM3 (noir), de FDM4 (vert) et de FDM5 (orange)

La comparaison des deux machines moyenne gamme montre que les données d'inventaires sont quasiment identiques entre ces deux machines. La machine FDM1 consomme légèrement moins de matière par rapport à FDM2. Dans ce cas, il est difficile de faire un choix de machine d'un point de vue environnemental. En revanche, la FDM1 proposera un état de surface de meilleure qualité par rapport à la FDM2. Par conséquent, il sera plus intéressant de réaliser le prototype de femtocell sur la FDM1

si nous choisissons une machine moyenne gamme. Le tableau 5.13 récapitule les meilleurs choix de machine en fonction des différents critères pour les deux machines d'extrusion de matière moyenne gamme.

Critère de choix	Meilleure machine
Purement environnemental	FDM2
Purement économique	FDM2
Purement technique	FDM1
Compromis technique, économique et environnemental	FDM1

Tableau 5.13 - Meilleur choix de machine en fonction des différents critères pour les machines moyennes gammes

Pour les machines de typologie industrielle, l'écart de consommation d'énergie électrique est plus prononcé. D'un point de vue environnemental, il sera plus judicieux de réaliser la pièce du cas d'étude sur la FDM3 étant donnée la plus faible consommation d'énergie et de matière support. Si au contraire nous souhaitons privilégier le coût de revient du produit, la réalisation de la pièce sur la FDM4 semble plus appropriée. D'un point de vue technique, la FDM3 propose une rugosité arithmétique inférieur par rapport aux deux autres machine grâce à la possibilité de réaliser des pièces avec une épaisseur de couche de 0.178 millimètre contre 0.25 millimètre pour la FDM4 et FDM5. Par conséquent, la machine FDM3 semble être un bon compromis pour réaliser le prototype de femtocell. Le tableau 5.14 récapitule les meilleurs choix de machine en fonction des différents critères pour les trois machines d'extrusion de matière de type industriel.

Critère de choix	Meilleur machine
Purement environnemental	FDM3
Purement économique	FDM4
Purement technique	FDM3
Compromis technique, économique et environnemental	FDM3

Tableau 5.14 - Meilleur choix de machine en fonction des différents critères pour les machines de type industriel

En présentant tous ces résultats sur un même graphique, on remarque qu'il y a un réel intérêt à faire de l'évaluation multicritère car le choix de la meilleure machine varie en fonction du critère que l'on souhaite privilégier. En effet il est difficile de faire un choix de machine basé sur seulement un critère, mais à l'aide de cette vision globale des consommations, il est possible de trouver un compromis et par conséquent de faire un choix de machine.

Dans la suite de ce chapitre, nous nous intéresserons au procédé de projection de matière

5. Fabrication par projection de matière

5.1. Application sur l'Objet 30 pro

Cette section a pour objectif de présenter les résultats de l'application de la méthodologie sur le prototype de femtocell (figure 5.4) proposé par la société Orange. Pour la fabrication de cette pièce, le logiciel de préparation du fichier numérique a estimé un temps de fabrication de 12h46 min et un volume de matière nécessaire à la fabrication de la pièce 189,8 cm^3. La consommation de matière support estimé par le logiciel est de 78,7 grammes. Pour cette machine, le logiciel estime directement

la masse de la pièce ou du support plutôt que de donner un volume comme certaines machines. Les durées nécessaires à la préparation du fichier et à la finition de la pièce sont également connues. Le tableau 5.15 récapitule les données d'entrée nécessaire à l'évaluation multicritère du produit.

$T_{Mise\ en\ forme}$	12h46
$V_{Pièce}$	189,9 cm^3
$M_{Support}$	78,7 gramme
$T_{préparation\ fichier}$	5 minutes
$T_{Finition}$	3 minutes

Tableau 5.15 - Données d'entrées nécessaire à l'évaluation du procédé

A l'aide de ces données d'entrées obtenues grâce aux information du modèle numérique de la pièce, nous sommes capables de prédire les données d'inventaire, le coût de fabrication et la rugosité du couple pièce-procédé. Les tableau 5.16 à 5.20 représente respectivement les données estimées et réelles pour la consommation d'énergie électrique (tableau 5.16), la consommation de matière et de support (tableau 5.17), la consommation de fluide (tableau 5.18), une représentation du coût (tableau 5.19) et enfin les rugosités pour les deux zones A et B de notre cas d'étude (tableau 5.20) qui ont été mesurées ici à l'aide d'un rugosimètre (Surftest SJ-210).

	Estimée (Wh)							Réelle (Wh)	Ecart
	$T_{Fabrication}$	$E_{Préparation\ fichier}$	E_{Veille}	$E_{Chauffe\ têtes}$	$E_{Construction}$	$E_{Finition}$	**E_{Totale}**	**E_{Totale}**	**%**
JET 1	12h46	2.63	1092	47.3	4478	18.5	**5638**	**5711**	**1.31**

Tableau 5.16 - Energie électrique (JET1)

	Estimée	Réelle	Ecart	Estimée	Réelle	Ecart
	Masse pièce (g)		%	Masse Support (g)		%
JET 1	224	210	**6.25**	78.7	72.9	**7.37**

Tableau 5.17 - Masse de la pièce et du support (JET1)

	V_Procédé	V_Auto	V_Manuel	V_total (l)
JET 1	0	0	10.9	**10.9**

Tableau 5.18 - Volume d'eau consommé (JET1)

	Estimée				Réelle	Ecart
	$Coût_{Equipement}$	$Coût_{Matière}$	$Coût_{Personnel}$	**$Coût_{Total}$ (€)**	**$Coût_{Total}$ (€)**	%
JET 1	51.1	106	5.86	**163.1**	**164.4**	**0.76**

Tableau 5.19 - Coût de fabrication (JET1)

	Ra zone A (µm)		Ecart	Ra zone B (µm)		Ecart
	Estimée	Réelle	%	Estimée	Réelle	%
JET 1	-	3.5	-	-	4.7	-

Tableau 5.20 - Rugosité de la zone A et B (JET1)

On remarque globalement que les écarts pour les données d'inventaires entre les valeurs estimées et réelles sont relativement faibles. Comme pour le procédé d'extrusion de matière, l'écart entre la durée réelle de fabrication ($T_{Mise\ en\ forme}$) et la durée estimée n'est que de 1.3%. Ce qui amène à des écarts relativement faibles entre les valeurs réelles et estimées.

Pour ce procédé de fabrication, nous n'avons pas utilisé la formule empirique afin d'estimer la consommation de support. Néanmoins, les résultats obtenus sont corrects car l'écart entre la masse réelle et estimée est inférieur à 10%.

La figure 5.16 illustre ces résultats obtenues sous forme de graphe radar.

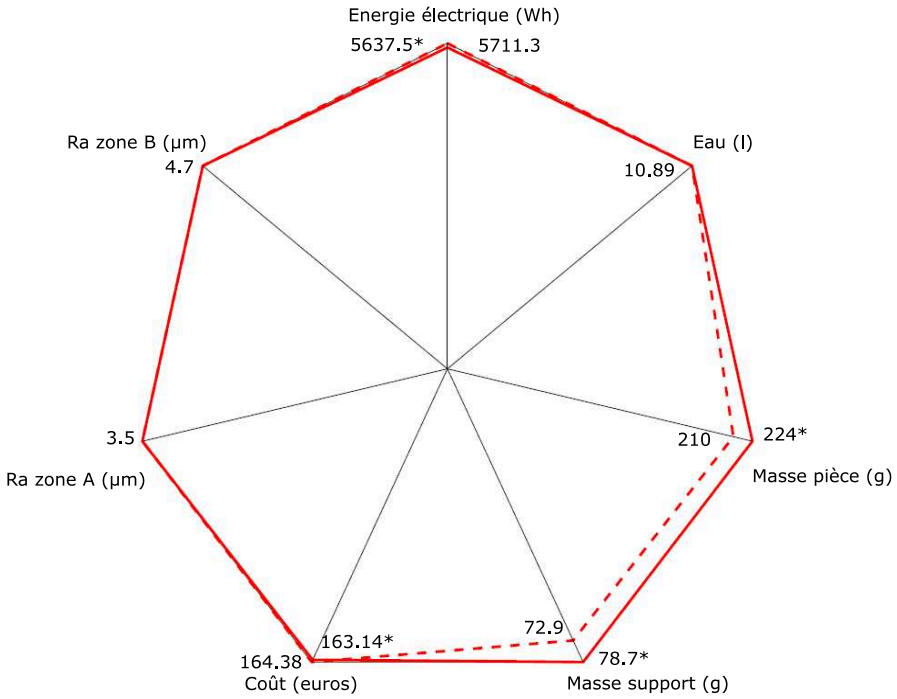


Figure 5.16 - Représentation graphique des données estimées (ligne) et réelles (pointillés)

5.2. Evaluation multicritère du prototype de femtocell pour d'autres machines de projection de matière.

Cette section a pour objectif de présenter les résultats obtenus pour notre cas d'étude sur deux autres machines de projection de matière. La figure 5.17 illustre ces différentes machines. Les détails de l'ensemble des résultats des différentes machines sont donnés en annexe B. Ces deux machines fonctionnent sur le même principe que la machine présentée dans les sections précédentes (JET1). Ainsi, nous retrouvons exactement les mêmes phases de fabrication dans le même ordre chronologique que la machine précédente. Les seuls paramètres qui varient sont les puissances moyennes des différentes phases ainsi que les durées fixes de certaines phases.

(JET2) Objet260 connex (JET3) Objet350 connex

Figure 5.17 - Machines de projection de matière étudiées

La figure 5.18 et 5.19 illustrent respectivement la représentation graphique des résultats pour les machines JET2 et JET3. Sur ces graphes, les valeurs accompagnées d'un astérisque ainsi que la courbe rouge représentent les résultats estimés. Tandis que les autres valeurs et la courbe bleue représentent les résultats réels.

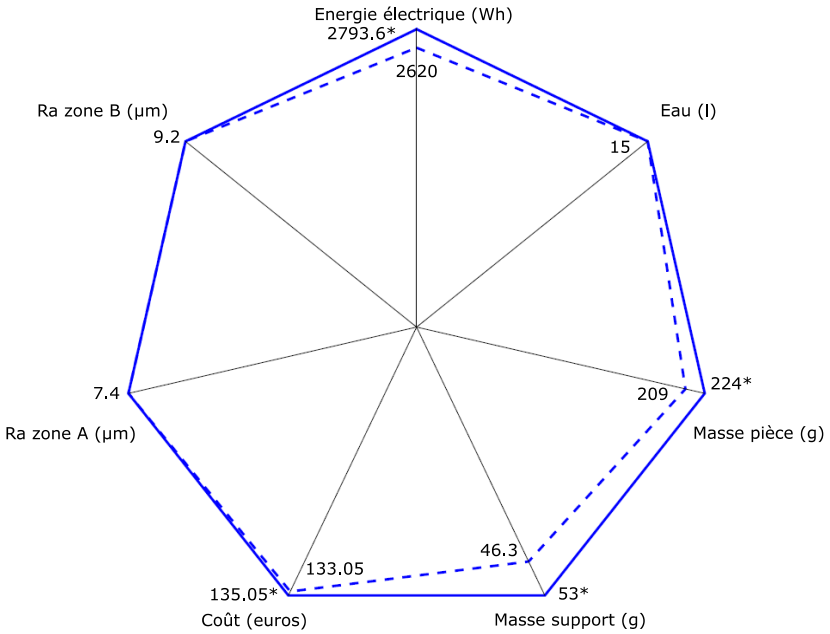


Figure 5.18 - Représentation graphique des données estimées (ligne) et réels (pointillés) pour l'objet260 connex (JET2)

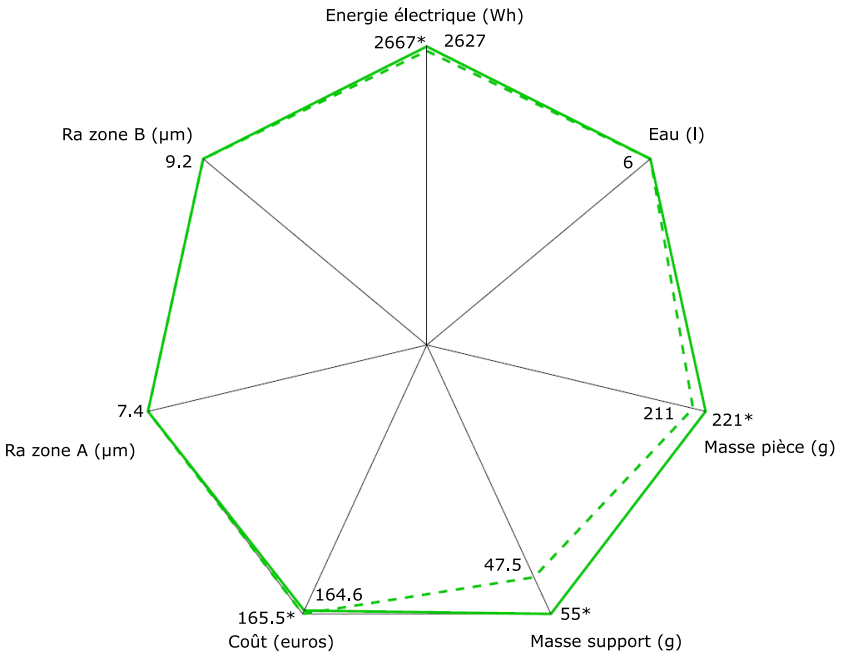


Figure 5.19 - Représentation graphique des données estimées (ligne) et réels (pointillés) pour l'objet350 connex (JET3)

5.3. Synthèse

L'étude menée dans cette section montre que la méthodologie proposée dans ces travaux de thèse permet de prédire, avec précision, les données d'inventaires combinées à des données techniques et économiques d'une large gamme de machines pour plusieurs procédés de fabrication additive. Dans cette section, nous avons appliqué la méthodologie sur trois machines de projection de matière. Les étapes de fabrication prises en compte pour ce procédé de fabrication sont la préparation du fichier, la mise en forme de la pièce et la finition.

Afin d'aller plus loin dans la démarche d'analyse environnementale de ce procédé, il aurait été intéressant d'avoir également des données sur la transformation de la matière première. De plus le manque de modèle dans la littérature ne nous a pas permis d'avoir une équation permettant de prédire la rugosité pour ce procédé de fabrication.

6. Comparaison des machines de projection de matière

Dans cette section, nous avons cherché à comparer les machines entre elles à l'aide de l'outil graphique proposé dans cette méthodologie (figure 5.20).

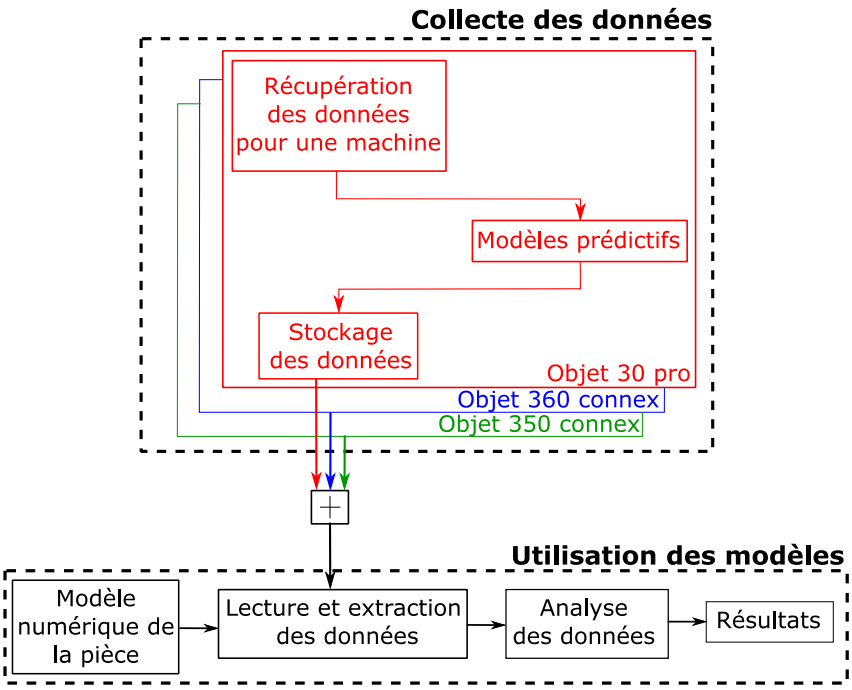


Figure 5.20 - Combinaison des données pour JET 1, JET 2 et JET 3

La figure 5.21 représente l'évaluation multicritère des trois machines de projection de matière.

Sur ce graphe, nous pouvons remarquer un écart de consommation énergétique important entre JET1 et les deux autres machines. Cet écart est dû à la durée de fabrication de la pièce d'étude sur cette machine qui est de 12h51 contre 3h51 pour JET2 et 4h21 pour JET3. En effet, la phase de fabrication la plus consommatrice en énergie pour ce procédé de fabrication est la phase de mise en forme. Par conséquent, plus la durée de mise en forme sera longue, plus la consommation d'énergie sera grande.

Pour la consommation de fluide, nous avons considéré la même durée pour la phase de finition. Ainsi, le seul paramètre qui varie est le débit des pompes à eau qui était différent pour les trois appareils. Dans notre cas, c'est la pompe à eau associé à JET3 qui avait le débit le plus faible par rapport aux autres appareils. Nous pouvons également ajouter que le débit de la pompe ne joue pas sur la diminution du temps de nettoyage.

La consommation de matière nécessaire à la fabrication de la pièce est relativement la même pour les trois machines. L'écart est légèrement plus prononcé pour la consommation de support entre JET1 et les deux autres machines

Pour la fabrication du prototype de femtocell, la machine JET2 est la plus attractive d'un point de vue économique.

Finalement, après avoir mesuré la rugosité dans les deux zones d'intérêts des trois pièces, on remarque que la machine JET1 offre une rugosité plus faible. Cet écart d'état de surface est dû à la hauteur de la couche de cette machine qui est de 8 micromètres contre 16 micromètres pour les machines JET2 et JET3.

Si nous nous positionnons dans une optique de favoriser l'impact environnemental, alors il sera plus judicieux de réaliser cette pièce sur la machine JET3. Si en revanche nous souhaitons favoriser l'état de surface de la pièce, alors il sera plus intéressant de fabriquer la pièce sur la machine JET1.

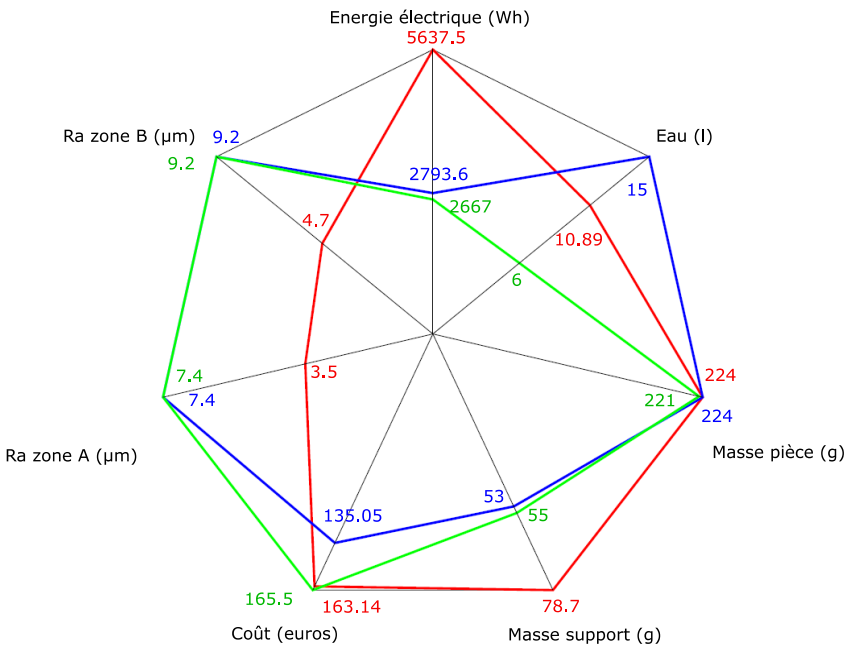


Figure 5.21 - Evaluation multicritère des trois machines de projection de matière. JET1 (rouge), JET2 (bleu) et JET3 (vert)

Le tableau 5.21 récapitule les meilleurs choix de machine en fonction des différents critères pour les trois machines de projection de matière.

Critère de choix	Meilleur machine
Purement environnemental	JET3
Purement économique	JET2
Purement technique	JET1
Compromis technique, économique et environnemental	JET2

Tableau 5.21 - Meilleur choix de machine en fonction des différents critères pour les machines de type industriel

Ainsi, nous pouvons constater que faire un choix de machine purement d'un point de vue environnemental n'est pas toujours le choix le plus raisonnable. En effet, il faut savoir trouver des compromis afin de réaliser des choix cohérent de machine ou de procédé de fabrication.

7. Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons utilisé les modèles obtenus à l'aide de la méthodologie d'acquisition et de caractérisation des données présentée dans le chapitre 3 de ce manuscrit pour faire l'évaluation d'une pièce industrielle qui représente un prototype de femtocell. Nous avons tout d'abord présenté les résultats sur le procédé d'extrusion de matière puis sur le procédé de projection de matière.

Ainsi, nous avons montré au cours de ce chapitre les possibilités offertes par l'affichage des résultats sous un diagramme radar permet de comparer les procédés entre eux. Dans notre cas, nous avons à chaque fois décidé de faire un choix de machine sur un seul critère, environnemental, technique ou économique. Mais il est également possible de faire un choix afin de minimiser non pas un, mais plusieurs critères. En effet, cet outil de modélisation permet d'évaluer d'un point de vue technico économico environnemental le couple pièce procédé dès la conception d'un produit. Ainsi l'utilisateur peut faire un choix d'orientation de pièce et de paramètres de fabrication qui minimisera les critères qu'il souhaite mettre en avant. Il y a donc un réel intérêt à faire de l'évaluation multicritère.

Chapitre 6 : Conclusion et perspectives

Sommaire

1	Synthèse et apports des travaux menés	156
2	Perspectives et voies de recherches	159

Ce sixième et dernier chapitre a pour objectif de présenter une synthèse des travaux que nous avons pu mener au cours de cette thèse et d'en dégager les perspectives.

Les chapitres précédents ont permis de positionner nos travaux dans un cadre général et d'en dégager des problématiques scientifiques à partir d'un état de l'art. Ainsi, ces travaux ont été consacrés au développement d'une méthodologie permettant d'évaluer la performance environnementale d'un procédé de fabrication additive couplée à des aspects technico économiques. La **première partie de ce chapitre** sera consacrée à une **synthèse du travail effectué**. De plus, les apports des travaux seront dégagés.

Les **perspectives** de ces travaux seront énoncées dans la **seconde partie** de ce chapitre afin de mettre en avant les voies de recherche qui nous semblent pertinentes à étudier.

1. Synthèse et apports des travaux menés

Comme nous avons pu le constater au cours du premier chapitre, les procédés de fabrication additive ont atteint un degré de maturité technique qui est très raisonnable. En effet ces procédés permettent aujourd'hui de produire des pièces fonctionnelles. Cette évolution technique tend à démocratiser l'utilisation de ces procédés aussi bien dans le milieu industriel que pour le grand public. Nous avons pu observer cette tendance à travers différents rapports annuels qui montrent l'évolution, de façon exponentielle, du nombre de ventes de machines de fabrication additive. Cette évolution va forcément faire augmenter les consommations de matières et d'énergies liés à ces procédés. Un des moyens de contrôler cette consommation est de sensibiliser les utilisateurs aux phénomènes environnementaux intervenant pendant la fabrication d'un produit. Pour cela, il faut améliorer les connaissances autour de ces procédés d'un point de vue environnemental.

De plus, avec les objectifs de développement durable de l'ONU et leur ambition de réduire les émissions de CO_2, les utilisateurs de ces procédés seront amené à faire un choix de machine ou de procédé de fabrication qui minimise les impacts environnementaux. Cependant, la comparaison des procédés de fabrication en fonction seulement des performances environnementales n'est pas suffisante car d'autres composantes telles que les propriétés techniques et de coût sont également liées au couple pièce-procédé.

De ce fait, nous nous sommes intéressés aux moyens et méthodes disponibles dans la littérature afin d'évaluer l'impact environnemental des procédés de fabrication additive dans le chapitre 2. Nous avons constaté que les outils et les méthodes permettant d'évaluer l'impact environnemental ne s'intéressent généralement qu'à la consommation d'énergie électrique pendant la phase de mise en forme d'un produit. Or, les paramètres de fabrications associées au moyen de production, ainsi que la géométrie de la pièce à fabriquer ont une influence sur les impacts environnementaux totaux. Par la suite les recherches bibliographiques se sont élargies aux méthodes permettant d'évaluer le coût et les propriétés mécaniques des pièces réalisées par fabrication additive.

La méthodologie développée dans le troisième chapitre permet de répondre à un certain nombre de verrous scientifiques identifiés lors de l'analyse de l'état de l'art. Cette méthodologie peut être déclinée en trois points majeurs :

Dans un premier temps, il est important d'avoir une vision multi étape lors de l'évaluation d'un procédé. Ainsi, la méthodologie développée considère l'ensemble des étapes nécessaires à la production d'une pièce.

La deuxième partie de la méthodologie s'appuie sur l'expertise acquise sur les procédés de fabrication afin d'évaluer l'ensemble des données d'inventaires pendant toutes les étapes de fabrication de la pièce. La connaissance fine du comportement du procédé de fabrication est nécessaire afin de réaliser le deuxième point de cette méthodologie.

Finalement, ces données environnementales sont couplées avec des modèles technico économique afin d'avoir une évaluation multicritère du couple pièce procédé. Ainsi, il est possible d'estimer, à partir du fichier numérique de la pièce, les données d'inventaires, le coût et les propriétés mécaniques d'une pièce dès l'étape de conception du produit. Il est ainsi possible de définir la géométrie et/ou la stratégie de fabrication permettant de minimiser le critère que l'utilisateur souhaite privilégier.

La méthodologie développée a été appliquée sur le procédé d'extrusion de matière et de projection de matière. Ces applications ont été présentées dans le chapitre 4 où des expérimentations ont été réalisées afin de caractériser chaque étape de mise en forme d'une pièce.

Pour cela, dans un premier temps, les consommations d'électricité de matière et d'eau d'une ligne d'extrusion ont été analysées afin de définir un modèle mathématique permettant de prédire ces consommations.

Dans un deuxième temps, un ensemble d'expérimentations ont été réalisées afin de caractériser le comportement de neuf machines de fabrication additive. Ces modèles décrivent le comportement électrique des différentes phases des machines et permettant également d'estimer la consommation de matière et de fluide. Ces modèles environnementaux ont été ensuite combinés avec des modèles techniques et économiques, ce qui nous a permis d'évaluer les neuf machines étudiées en fonction de ces trois critères. Lors de ce chapitre, les résultats ont été détaillés pour deux machines de fabrication additive afin de démontrer la généricité de la méthodologie. Bien que nous ayant légèrement changé le protocole expérimental pour le procédé de projection de matière, nous avons montré que la méthodologie est fiable et applicable pour ces deux procédés de fabrication additive.

Finalement, dans le chapitre 5 de ce manuscrit nous avons été en mesure de comparer les cinq machines d'extrusion de matière et les trois machines de projection de matière pour une pièce (prototype de femtocell) sur les mêmes critères de comparaison. Ce qui nous a permis de faire un choix de machine permettant un bon compris entre la minimisation des données d'inventaires, du coût de revient de la pièce et de la qualité de l'état de surface.

Après avoir fait la synthèse des travaux effectués, nous pouvons mettre en avant les apports de ces travaux suivant ces six points :

- **Méthodologie d'évaluation multi étape :** Les analyses des procédés de fabrication additive d'un point de vue environnemental disponibles dans la littérature sont principalement centrées sur la mise en forme d'un produit. Or, la fabrication de la pièce n'est pas la seule étape à réaliser afin d'obtenir cette pièce. En effet, d'autres étapes telles que la préparation du fichier, la finition ou encore la transformation de la matière première sont nécessaire afin d'obtenir la pièce finale. Par conséquent, la méthodologie développée prend en compte l'ensemble des étapes de production de la pièce.

- **Prise en compte de l'ensemble des données d'inventaires :** L'analyse environnementale d'un procédé de fabrication ne peut pas se faire uniquement sur des considérations de consommation d'énergie électrique. Il est nécessaire de prendre en compte l'ensemble des flux de matière et d'énergie intervenant dans l'impact environnemental global. Nous avons montré l'importance de prendre en compte l'ensemble de ces flux d'énergie et de matières lors de l'application de la méthodologie sur les deux procédés de fabrication additive. En effet les quantités de matière et de fluide ne sont pas négligeable.

- **Méthodologie d'évaluation multicritère :** Les différents modèles environnementaux permettant de prédire les données d'inventaires d'un procédé de fabrication additive dès la phase de conception d'un produit ont été couplés à des modèles technico économique, permettant ainsi l'évaluation du couple procédé suivant ces trois critères. Dans le cadre de cette thèse, nous avons développé un outil graphique permettant de comparer plusieurs machines ou procédés de fabrication en fonction des trois critères cités précédemment sur un même graphique.

- **Méthodologie d'évaluation du couple pièce-procédé :** Au cours de l'analyse de l'état de l'art, nous avons montré que l'évaluation environnementale d'un procédé de fabrication ne peut se faire sans tenir compte de la pièce à produire. Ainsi, la méthodologie développée est focalisée sur l'évaluation du couple pièce-procédé. La pièce est définie par son modèle numérique et le procédé par ses paramètres de fabrication.

- **Caractérisation locale du procédé de fabrication :** La décomposition du procédé de fabrication en phase de fabrication (veille, chauffe tête, construction…) plutôt qu'en entités mécaniques (axes, moteurs…) dans la généricité de la méthode. En effet, les phases de fabrication présentées dans le chapitre trois de ce manuscrit sont les mêmes peu importe le procédé de fabrication ou la machine étudiée. En effet, seul l'ordre chronologique et la durée de ces phases varient. Ainsi cette décomposition du procédé offre une vision fine de ce qu'il se passe pendant la fabrication d'un produit.

- **Application sur des machines non étudiées :** Dans le cadre de cette thèse, la méthodologie a été appliquée sur des machines non étudiées dans la littérature. Ainsi, les modèles environnementaux développés pour l'ensemble des machines étudiées peuvent être intégré dans des bases de données afin d'améliorer la connaissance des procédés de fabrication additive d'un point de vue environnemental.

L'ensemble des verrous scientifiques évoqués dans les premiers chapitres n'ayant pas été complètement levés cela nous a conduit à proposer diverses perspectives de recherches intéressantes.

2. Perspectives et voies de recherches

Les premières perspectives concernent les modèles techniques des procédés de fabrication additive étudiés. Dans le cadre de cette thèse nous n'avons utilisé qu'un seul modèle technique qui permet de prédire la rugosité arithmétique des produits réalisé par extrusion de matière. Dans un premier temps il sera intéressant d'intégrer d'autres modèles d'évaluation technique pour ce procédé. La prédiction de la résistance à la traction/compression ou encore des spécifications géométriques seraient un atout majeur pour l'évaluation technique exploitée dans la méthodologie. Le modèle prédictif utilisé pour déterminer la rugosité d'une pièce n'étant valable que pour le procédé d'extrusion de matière, il faudrait également avoir un modèle prédictif pour le procédé de projection de matière étant donné que nous appliquons la méthodologie sur ce procédé.

Ces remarques sur l'extension ou la mise en place de modèles techniques pour les deux procédés de fabrication étudiés dans cette thèse s'applique également aux autres procédés de fabrication additive comme la fusion sur lit de poudre ou la photopolymérisation en cuve. La méthodologie étant générique, il sera intéressant d'appliquer la méthodologie sur ces procédés et donc d'avoir également des modèles techniques associés à ces procédés permettant de prédire certaines propriétés mécaniques des produits.

L'application de la méthodologie sur toutes ces machines nous amènent vers la possibilité de comparer toutes ces machines ou ces procédés sur les mêmes critères de comparaisons. Cette comparaison mènera forcément à faire un choix de procédé mais selon quel critère ? Etant donné que nous proposons une évaluation sur les critères technico économico environnementaux, il faut faire le choix du ou des critères qu'on souhaite privilégier. Cet outil peut être utilisé par un large public, parmi lesquels, on peut aussi bien retrouver des concepteurs, des fabricants ou des experts en analyse de

cycle de vie. La sensibilité de ces personnes peut ne pas être la même. En effet, si un choix de machine doit être réalisé par l'expert en analyse de cycle de vie, alors il choisira sans doute la machine avec les consommations et rejets les plus faibles. Dans cette optique de laisser à l'utilisateur le choix des critères qu'il souhaite mettre en avant, il faudrait développer au sein de cette outil une méthode où l'utilisateur pourrait attribuer des poids à chaque critère avant de lancer la simulation pour qu'à la fin, le choix du procédé se fasse automatiquement. L'implémentation d'une telle méthode faciliterait et automatiserait l'utilisation de l'outil.

L'optimisation des procédés de fabrication additive d'un point de vu environnementale est une voie de recherche qui est très peu étudié. La principale raison est que ce type d'optimisation a une influence directe sur les propriétés de la pièce. En effet, nous avons pu constater au cours du chapitre quatre que l'optimisation d'un point de vue environnemental peut se faire de deux manière. La première est la diminution des puissances en jeux en changement des composants énergivores du procédé de fabrication et la seconde est la modification de la géométrie ou des paramètres de fabrication afin de réduire la durée de mise en forme. Etant donné que la première solution n'est envisageable que par les fabricants de machine, seule la deuxième solution offre un levier d'action sur la diminution des impacts environnementaux. Or la modification de la géométrie de la pièce et/ou des paramètres de fabrication aura une influence directe sur les propriétés mécaniques du produit. A l'aide de cette méthodologie et de la visualisation des trois critères sur un même graphique, on peut modifier la conception du produit et ainsi voire en temps réel l'écart que cette modification produira sur chaque critère. Par conséquent, l'utilisateur pourra faire un choix de géométrie et de paramètres de fabrication en fonction des trois critères. La figure 6.1 illustre la méthodologie d'évaluation multicritère avec l'intégration d'une boucle de retour pour l'optimisation.

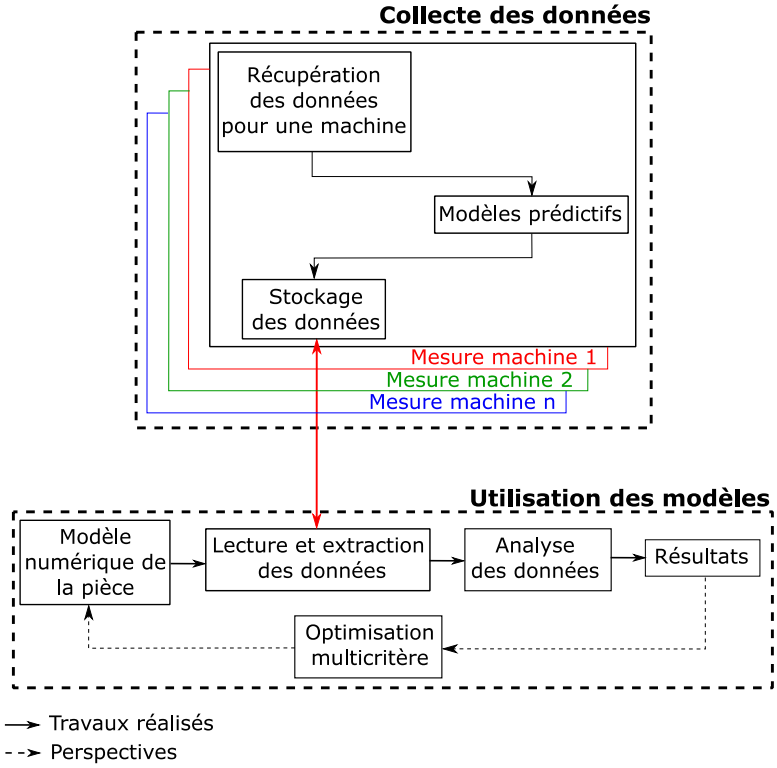


Figure 6.19 - Evaluation multicritère des trois machines de projection de matière. JET1 (rouge), JET2 (bleu) et JET3 (vert)

Finalement, concernant les données obtenues, il serait intéressant de proposer à l'utilisateur non pas une valeur de consommation d'énergie électrique par exemple, mais une plage de donnée dans laquelle se trouve potentiellement notre valeur estimée. Pour cela, il faudrait réaliser une analyse de sensibilité en prenant en compte l'incertitude lié aux appareil de mesures, la durée de fabrication estimé par le logiciel et la précision des appareils de mesures.

Annexe A : Informations complémentaires pour les machines d'extrusion de matière

Makerbot replicator 2X (FDM1):

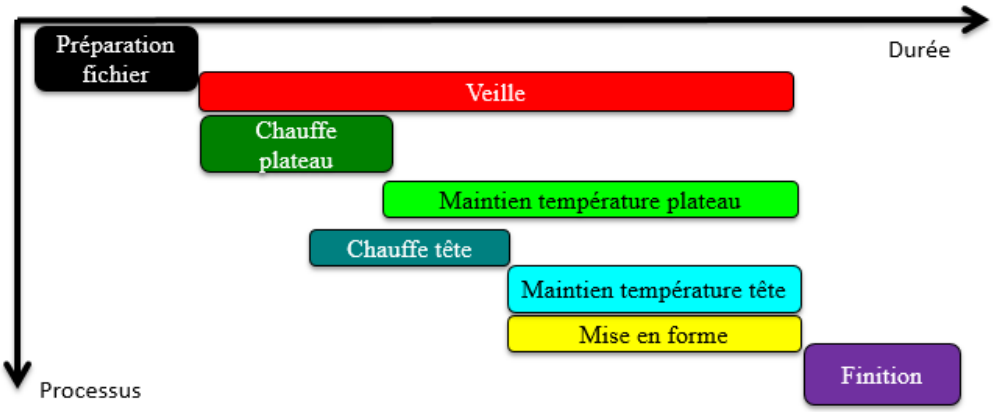


Figure A.20 - Agencement des différentes phases de fabrication pour la Makerbot replicator 2X

Phase	Puissance moyenne
P_{moy} Préparation fichier (W)	31.6
P_{moy} Veille (W)	4.4
P_{moy} Chauffe plateau (W)	137.89
P_{moy} maintien température plateau(W)	74.15
P_{moy} Chauffe têtes (W)	39.57
P_{moy} maintien température tête(W)	25.14
P_{moy} Construction (W)	21.28

Tableau A.1 - Puissance moyenne des phases de fabrication pour FDM1

Phase	Durée moyenne
Durée chauffe plateau (s)	525
Durée chauffe têtes (s)	150

Tableau A.2 - Durée moyenne des phases fixes pour FDM1

$Coût_{Machine}$	4000 Euros

Nombres d'heures d'utilisation de la machine/an	600 heures
$Coût_{Matière\ pièce}$	50 euros /kg
$Coût_{Matière\ support}$	50 euros /kg
Coût opérateur	53.25 euros/heure

Tableau A.3 - Paramètres de coûts fixes pour FDM1

$T_{Farication}$	4h31
$V_{Pièce}$	77.6 cm^3
$V_{Support}$	10.8 cm^3
$T_{préparation\ fichier}$	5 min
$T_{Finition}$	0
Hauteur de couche (L)	0.2 millimètre
Angle de dépôt	Zone A : 74.6°
	Zone B : 55.3°

Tableau A.4 - Donnée nécessaire à l'évaluation multicritère du prototype de femtocell pour FDM1

Rapman 3.2 (FDM2):

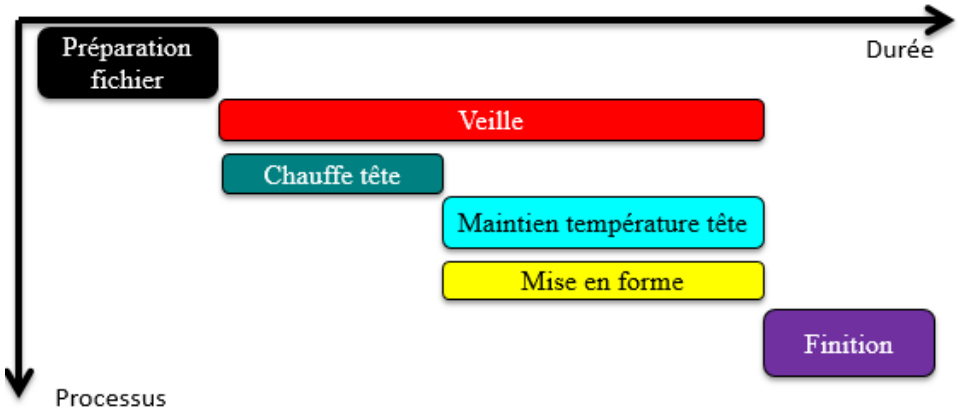


Figure A.2 - Agencement des différentes phases de fabrication pour la Rapman 3.2

Phase	Puissance moyenne
P_{moy} Préparation fichier (W)	31.6
P_{moy} Veille (W)	3.27
P_{moy} Chauffe têtes (W)	33.3
P_{moy} maintien température tête(W)	20.8
P_{moy} mise en forme (W)	31

Tableau A.5 - Puissance moyenne des phases de fabrication pour FDM2

Phase	Durée moyenne
Durée chauffe têtes (s)	340.7

Tableau A.6 - Durée moyenne des phases fixes pour FDM2

$Coût_{Machine}$	1610 Euros
Nombres d'heures d'utilisation de la machine/an	600 heures
$Coût_{Matière\ pièce}$	50 euros /kg
$Coût_{Matière\ support}$	50 euros /kg
Coût opérateur	53.25 euros/heure

Tableau A.6 - Paramètres de coûts fixes pour FDM2

$T_{Farication}$	10h11
$V_{Pièce}$	87.9 cm^3
$V_{Support}$	12.3 cm^3
$T_{préparation\ fichier}$	5 min
$T_{Finition}$	0
Hauteur de couche (L)	0.24 millimètre
Angle de dépôt	Zone A : 74.6°
	Zone B : 55.3°

Tableau A.7 - Donnée nécessaire à l'évaluation multicritère du prototype de femtocell pour FDM2

Stratasys Mojo (FDM3):

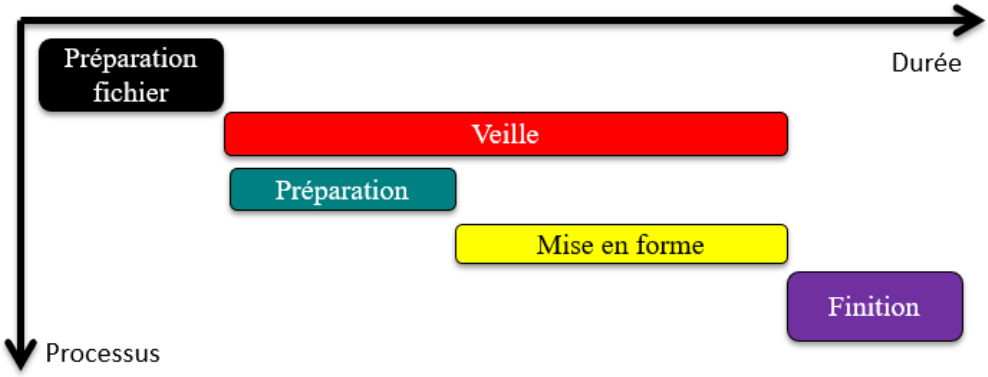


Figure A.3 - Agencement des différentes phases de fabrication pour la Stratasys Mojo FDM3

Phase	Puissance moyenne
P_{moy} Préparation fichier (W)	31.6
P_{moy} Veille (W)	18.11
P_{moy} Préparation (W)	301
P_{moy} mise en forme (W)	154.7
P_{moy} finition (W)	172.2

Tableau A.8 - Puissance moyenne des phases de fabrication pour FDM3

Phase	Durée moyenne
Durée préparation (s)	865.7

Tableau A.9 - Durée moyenne des phases fixes pour FDM3

$Coût_{Machine}$	10000 Euros
Nombres d'heures d'utilisation de la machine/an	600 heures
$Coût_{Matière\ pièce}$	0.37 euros /cm^3
$Coût_{Matière\ support}$	0.37 euros /cm^3
Prix plateau	3.95 euros
Coût opérateur	53.25 euros/heure

Tableau A.104 - Paramètres de coûts fixes pour FDM3

$T_{Farication}$	5h20
$V_{Pièce}$	62.1 cm^3
$V_{Support}$	11.8 cm^3
$T_{préparation\ fichier}$	5 min
$T_{Finition}$	6h
Hauteur de couche (L)	0.24 millimètre
Angle de dépôt	Zone A : 74.6°
	Zone B : 55.3°

Tableau A.11 - Donnée nécessaire à l'évaluation multicritère du prototype de femtocell pour FDM3

Stratasys Dimension elite (FDM5):

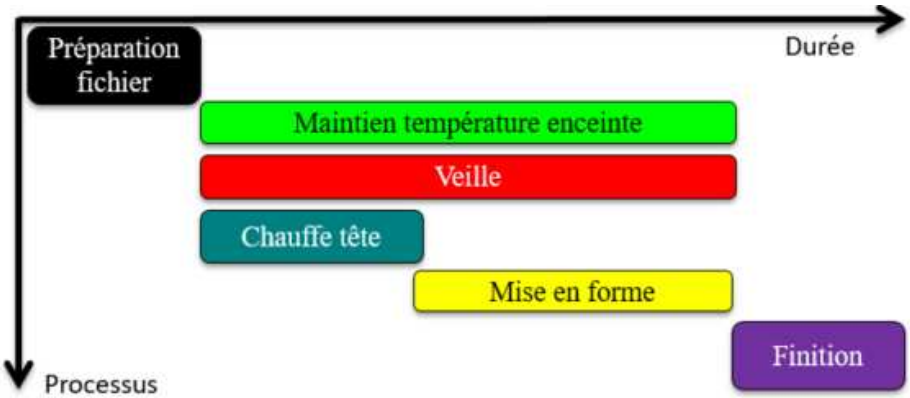


Figure A.4 - Agencement des différentes phases de fabrication pour la Stratasys Dimension elite FDM5

Phase	Puissance moyenne
P_{moy} Préparation fichier (W)	31.6
P_{moy} Veille (W)	186
P_{moy} Maintien température enceinte (W)	167.5

P_{moy} Chauffe têtes (W)	422.9
P_{moy} Construction (W)	113
P_{moy} Finition (W)	986

Tableau A.12 - Puissance moyenne des phases de fabrication pour FDM5

Phase	Durée moyenne
Durée Chauffes têtes (s)	33

Tableau A.13 - Durée moyenne des phases fixes pour FDM5

$Coût_{Machine}$	31234 Euros
Nombres d'heures d'utilisation de la machine/an	300 heures
$Coût_{Matière\ pièce}$	0.29 euros /cm^3
$Coût_{Matière\ support}$	0.29 euros /cm^3
Prix plateau	7.3 euros
Coût opérateur	53.25 euros/heure

Tableau A.14 - Paramètres de coûts fixes pour FDM5

$T_{Farication}$	4h22
$V_{Pièce}$	50.3 cm^3
$V_{Support}$	11.3 cm^3
$T_{préparation\ fichier}$	5 min
$T_{Finition}$	6h
Hauteur de couche (L)	0.24 millimètre
Angle de dépôt	Zone A : 74.6°
	Zone B : 55.3°

Tableau A.15 - Donnée nécessaire à l'évaluation multicritère du prototype de femtocell pour FDM5

Annexe B : Informations complémentaires pour les machines de projection de matière

Objet260 connex (JET2):

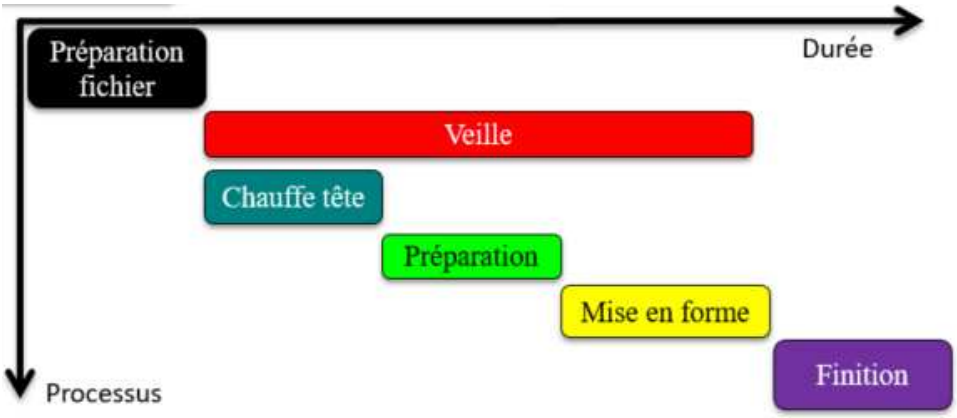


Figure B.21 - Agencement des différentes phases de fabrication pour l'objet260 connex

Phase	Puissance moyenne
P_{moy} Préparation fichier (W)	31.6
P_{moy} Veille (W)	147
P_{moy} Chauffe têtes (W)	169
P_{moy} Préparation (W)	620
P_{moy} Construction (W)	529
P_{moy} Finition (W)	1952

Tableau B.1 - Puissance moyenne des phases de fabrication pour JET2

Phase	Durée moyenne
Durée chauffe têtes (s)	604.8
Durée préparation (s)	120

Tableau B.25 - Durée moyenne des phases fixes pour JET2

$Coût_{Machine}$	60 000 Euros

Nombres d'heures d'utilisation de la machine/an	600 heures
$Coût_{Matière\ pièce}$	215 euros /kg
$Coût_{Matière\ support}$	112 euros /kg
Coût opérateur	53.25 euros/heure

Tableau B.3 - Paramètres de coûts fixes pour JET2

$T_{Farication}$	3h51
$V_{Pièce}$	77.6 cm^3
$M_{Support}$	53 gramme
$T_{préparation\ fichier}$	5 min
$T_{Finition}$	3 min

Tableau B.4 - Donnée nécessaire à l'évaluation multicritère du prototype de femtocell pour JET2

Objet350 connex (JET3):

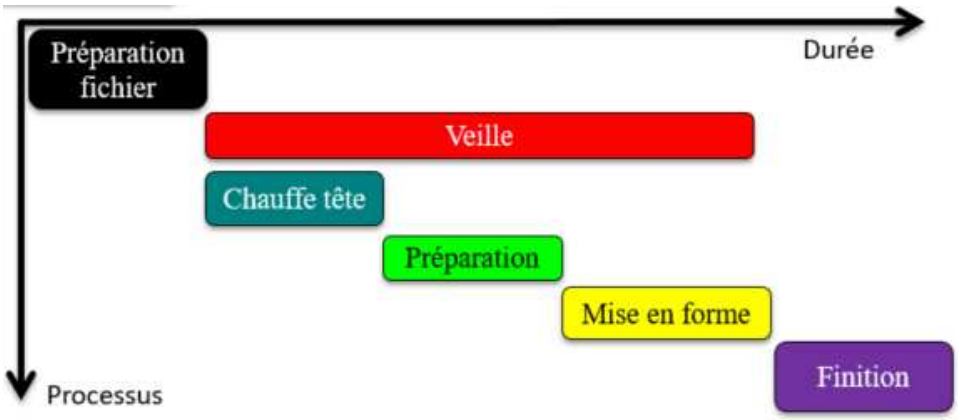


Figure B.2 - Agencement des différentes phases de fabrication pour l'objet260 connex

Phase	Puissance moyenne
P_{moy} Préparation fichier (W)	31.6
P_{moy} Veille (W)	180
P_{moy} Chauffe têtes (W)	145
P_{moy} Préparation (W)	252
P_{moy} Construction (W)	423
P_{moy} Finition (W)	1700

Tableau B.5 - Puissance moyenne des phases de fabrication pour JET2

Phase	Durée moyenne
Durée chauffe têtes (s)	480

Durée préparation (s)	120

Tableau B.6 - Durée moyenne des phases fixes pour JET3

$Coût_{Machine}$	193 720 Euros
Nombres d'heures d'utilisation de la machine/an	3000 heures
$Coût_{Matière\ pièce}$	375 euros /kg
$Coût_{Matière\ support}$	375 euros /kg
Coût opérateur	53.25 euros/heure

Tableau B.7 - Paramètres de coûts fixes pour JET3

$T_{Farication}$	4h21
$V_{Pièce}$	189.5 cm^3
$M_{Support}$	55 gramme
$T_{préparation\ fichier}$	5 min
$T_{Finition}$	3 min

Tableau B.8 - Donnée nécessaire à l'évaluation multicritère du prototype de femtocell pour JET3

Bibliographie

Ahn, D., Kim, H. and Lee, S. (2009) 'Surface roughness prediction using measured data and interpolation in layered manufacturing', *Journal of Materials Processing Technology*, 209(2), pp. 664–671.

Alexander, P., Allen, S. and Dutta, D. (1998) 'Part orientation and build cost determination in layered manufacturing', *CAD Computer Aided Design*, 30(5), pp. 343–356.

ASTM (2015) 'ASTM F2792-12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies'.

Balla, V. K., Bose, S. and Bandyopadhyay, A. (2008) 'Processing of bulk alumina ceramics using laser engineered net shaping', *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 5(3), pp. 234–242.

Balogun, V. A., Kirkwood, N. D. and Mativenga, P. T. (2014) 'Direct Electrical Energy Demand in Fused Deposition Modelling', *Procedia CIRP*, 15, pp. 38–43.

Balogun, V. A., Kirkwood, N. and Mativenga, P. T. (2015) 'Energy consumption and carbon footprint analysis of Fused Deposition Modelling: A case study of RP Stratasys Dimension SST FDM', *International journal of scientific and engineerin research*, 6(8), pp. 38-43

Barlier, C., Gasser, D. and Maucourt, J. M. (1993) 'La Stratoconception un procédé nouveau', in *Actes du Congrès Français de Mécanique*.

Bártolo, P. J. and Gibson, I. (2011) *History of stereolithographic processes. In Stereolithography : Materials, Processes and Applications*, pp. 37-56

Baumers, M., Tuck, C., Hague, R., Ashcroft, I. and Wildman, R. (2010) 'A comparative study of metallic additive manufacturing power consumption', *Solid Freeform Fabrication Symposium*, (2009), pp. 278–288.

Baumers, M., Tuck, C., Wildman, R., Ashcroft, I. and Hague, R. (2011) 'Energy inputs to additive manufacturing: Does capacity utilization matter?', *Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 30–40.

Baumers, M., Tuck, C., Wildman, R., Ashcroft, I. and Hague, R. (2017) 'Shape Complexity and Process Energy Consumption in Electron Beam Melting: A Case of Something for Nothing in Additive Manufacturing?', *Journal of Industrial Ecology*, 21, pp. S157–S167.

Baumers, M., Tuck, C., Wildman, R., Ashcroft, I., Rosamond, E. and Hague, R. (2013) 'Transparency Built-in: Energy Consumption and Cost Estimation for Additive Manufacturing Baumers et al. Energy and Cost Estimation for Additive Manufacturing', *Journal of Industrial Ecology*, 17(3), pp. 418–431.

Bikas, H., Stavropoulos, P. and Chryssolouris, G. (2016) 'Additive manufacturing methods and modelling approaches : a critical review', pp. 389–405.

Boschetto, A., Giordano, V. and Veniali, F. (2011) 'Modelling micro geometrical profiles in fused deposition process', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 61(9–12), pp. 945–956.

Boschetto, A., Giordano, V. and Veniali, F. (2013) '3D roughness profile model in fused deposition modelling', *Rapid Prototyping Journal*, 19(4), pp. 240–252.

Bourell, D. L., Beaman, J. J., Leu, M. C. and Rosen, D. W. (2009) 'A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead', (2).

Le Bourhis, F. (2014) *Modélisation de la performance environnementale des procédés de fabrication par ajout de matière - Application à la projection de poudres métalliques*, *Thèse de Doctorat*. Ecole Centrale de Nantes.

Bourhis, F. Le, Kerbrat, O., Hascoet, J.-Y. and Mognol, P. (2013) 'Sustainable manufacturing: evaluation and modeling of environmental impacts in additive manufacturing', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(9–12), pp. 1927–1939.

Campbell, R. I., Martorelli, M. and Lee, H. S. (2002) 'Surface roughness visualisation for rapid prototyping models', *Computer-Aided Design*, 34, pp. 717–725.

Chen, D., Heyer, S., Ibbotson, S., Salonitis, K., Steingrímsson, J. G. and Thiede, S. (2015) 'Direct digital manufacturing: definition, evolution, and sustainability implications', *Journal of Cleaner Production*, 107, pp 615-625.

Choi, D.-S., Lee, S. ., Shin, B. ., Whang, K. ., Song, Y. ., Park, S. . and Jee, H. . (2001) 'Development of a direct metal freeform fabrication technique using CO2 laser welding and milling technology', *Journal of Materials Processing Technology*, 113(1–3), pp. 273–279.

Chua, C. K., Chou, S. M. and Wong, T. S. (1998) 'A study of the state-of-the-art rapid prototyping technologies', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 14(2), pp. 146–152.

Costabile, G., Fera, M., Fruggiero, F., Lambiase, A. and Pham, D. (2017) 'Cost models of additive manufacturing: A literature review', *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 8(2), pp. 263–282.

Dawes, J., Bowerman, R. and Trepleton, R. (2015) 'Introduction to the Additive Manufacturing Powder Metallurgy Supply Chain', *Johnson Matthey Technology Review*, 59(3), pp. 243–256.

Deckard C.R (1989) 'Method and apparatus for producing parts by selective sintering. U.S. Patent 4863538'.

Deng, Y., Cao, S. J., Chen, A. and Guo, Y. (2016) 'The impact of manufacturing parameters on submicron particle emissions from a desktop 3D printer in the perspective of emission reduction', *Building and Environment*. Elsevier Ltd, 104, pp. 311–319.

Dimitrov, D., Schreve, K. and de Beer, N. (2006) 'Advances in three dimensional printing – state of the art and future perspectives', *Rapid Prototyping Journal*, 12(3), pp. 136–147.

Dong, L., Makradi, A., Ahzi, S. and Remond, Y. (2008) 'Three-dimensional transient finite element analysis of the selective laser sintering process', 9, pp. 700–706.

Duflou, J. R., Kellens, K. and Dewulf, W. (2011) 'Unit process impact assessment for discrete part manufacturing: A state of the art', *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. CIRP, 4(2), pp. 129–135.

Faludi, J., Baumers, M., Maskery, I. and Hague, R. (2017) 'Environmental Impacts of Selective Laser Melting: Do Printer, Powder, Or Power Dominate?', *Journal of Industrial Ecology*, 21, pp. S144–S156.

Faludi, J., Bayley, C., Bhogal, S. and Iribarne, M. (2014) 'Comparing Environmental Impacts of Additive Manufacturing vs . Traditional Machining via Life- Cycle Assessment', 21(1), pp 14-33.

Feygin, M. (1988) 'Apparatus and method for forming an integral object from laminations. U.S. Patent 4752352'.

Gibson, I., Rosen, D. W. and Stucker, B. (2009a) 'Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing, chapitre 2', *Additive Manufacturing Technologies: Rapid*

Prototyping to Direct Digital Manufacturing, pp. 17–38. doi: 10.1007/978-1-4419-1120-9.

Gibson, I., Rosen, D. W. and Stucker, B. (2009b) 'Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing,chapitre 1', *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, pp. 1–16.

Gockel, J., Beuth, J. and Taminger, K. (2014) 'ScienceDirect Integrated control of solidification microstructure and melt pool dimensions in electron beam wire feed additive manufacturing of Ti-6Al-4V &', 4, pp. 119–126.

Hopkinson, N. and Dickens, P. . (2003) 'Analysis of rapid manufacturing using layer manufacturing processes for production', *Journal of mechanical engineering science*, 217(C1), pp. 31–39.

Hopkinson, N., Hague, R. and Dickens, P. (2006) *Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age*.

Hull, C. W. (1986) 'Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithogra- phy. U.S. Patent 4575330'.

ISO. 14040 : Management environnementale - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre. (2006).

ISO (1997) 'ISO 14040 : Gestion environnementale - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre'.

ISO (2006) 'ISO 14044 : Gestion environnementale - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices'.

ISO (2011) 'NF E67-001: Fabrication additive - Vocabulaire'.

ISO (2015) 'ISO 17296-2: Fabrication additive -- Principes généraux -- Partie 2: Vue d'ensemble des catégories de procédés et des matières premières'.

ISO 17296-2. Fabrication additive-principes généraux. Partie 2. Vue d'ensemble des catégories de procédés et des matières premières. (2015).

Jafari, M. A., Han, W., Mohammadi, F., Safari, A., Danforth, S. C. and Langrana, N. (2000) 'A novel system for fused deposition of advanced multiple ceramics', *Rapid Prototyping Journal*, 6(3), pp. 161–175.

Junk, S. and Côté, S. (2012) 'A practical approach to comparing energy effectiveness of rapid prototyping technologies', *Proceedings of AEPR'12*, (June), pp. 12–14.

Junk, S. and Côté, S. (2013) *Influencing variables on sustainability in additive manufacturing*, Green design, Materials and Manufacturing Processes.

Kazmer, D. (2017) *28 – Three-Dimensional Printing of Plastics*. Second Edition, *Applied Plastics Engineering Handbook*, pp. 617-634.

Kellens, K. (2013) *Energy and Resource Efficient Manufacturing - Unit process analysis and optimisation*, *PhD Thesis*. KU Leuven.

Kellens, K., Baumers, M., Gutowski, T. G., Flanagan, W., Lifset, R. and Duflou, J. R. (2017) 'Environmental Dimensions of Additive Manufacturing: Mapping Application Domains and Their Environmental Implications', *Journal of Industrial Ecology*, 21, pp. 49–68.

Kellens, K., Dewulf, W., Overcash, M., Hauschild, M. Z. and Duflou, J. R. (2012) 'Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life cycle inventory (UPLCI) CO2PE! initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 1: Case studies',

International Journal of Life Cycle Assessment, 17(2), pp. 242–251.

Kellens, K., Yasa, E., Dewulf, W. and Duflou, J. R. (2010) 'Environmental assessment of selective laser melting and selective laser sintering', *Going green - CARE Innovations*, (Section 4).

Kellens, K., Yasa, E., Renaldi, Dewulf, W., Kruth, J. and Duflou, J. (2011) 'Energy and resource efficiency of SLS/SLM processes', *Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 1–16.

Kerbrat, O., Mognol, P. and Hascoet, J. (2010) 'Manufacturability analysis to combine additive and subtractive processes', *Rapid Prototyping Journal*, 16(1), pp. 63–72.

Kerbrat, O., Mognol, P. and Hascoet, J. Y. (2010) 'Manufacturing complexity evaluation at the design stage for both machining and layered manufacturing', *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2(3), pp. 208–215.

Khairallah, S. A. and Anderson, A. (2014) 'Mesoscopic simulation model of selective laser melting of stainless steel powder', *Journal of Materials Processing Tech.* Elsevier B.V., 214(11), pp. 2627–2636.

Kochan, D., Kai, C. C. and Zhaohui, D. (1999) 'Rapid prototyping issues in the 21st century', *Computers in Industry*, 39(1), pp. 3–10.

Kok, Y. H., Tan, X. P., Loh, N. H., Tor, S. B. and Chua, C. K. (2016) 'Geometry dependence of microstructure and microhardness for selective electron beam-melted Ti–6Al–4V parts', *Virtual and Physical Prototyping*, 11(3), pp. 183–191.

Kruth, J., Mercelis, P., Van Vaerenbergh, J., Froyen, L. and Rombouts, M. (2005) 'Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting', *Rapid Prototyping Journal*, 11(1), pp. 26–36.

Kruth, J. P., Leu, M. C. and Nakagawa, T. (1998) 'Progress in additive manufacturing and rapid prototyping', *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 47(2), pp. 525–540.

Kruth, J. P., Levy, G., Klocke, F. and Childs, T. H. C. (2007) 'Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing', *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56(2), pp. 730–759.

Lagutkin, S., Achelis, L., Sheikhaliev, S., Uhlenwinkel, V. and Srivastava, V. (2004) 'Atomization process for metal powder', *Materials Science and Engineering A*, 383(1 SPEC. ISS.), pp. 1–6.

Larson, R. (1998) 'Method and device for producing three-dimensional bodies. U.S. Patent 5786562'.

Le, V. T. and Paris, H. (2018) 'Impact of Total Build Height and Batch Size on Environmental Performance of Electron Beam Melting', *Procedia CIRP*. The Author(s), 69(May), pp. 112–117.

Lee, J., An, J. and Chua, C. K. (2017) 'Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials', *Applied Materials Today*. Elsevier Ltd, 7, pp. 120–133.

Levy, G. N., Schindel, R. and Kruth, J. P. (2003) 'Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives', *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 52(2), pp. 589–609.

Lewis, G. ., Milewski, J. O., Cremers, D. A., Nemec, R. B. and Barbe, M. R. (1998) 'Laser production of articles from powders.'

Li, Y., Linke, B. S., Voet, H., Falk, B., Schmitt, R. and Lam, M. (2017) 'Cost, sustainability and surface roughness quality – A comprehensive analysis of products made with personal 3D printers', *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 16, pp. 1–11.

Lindemann, C., Jahnke, U., Moi, M. and Koch, R. (2012) 'Analyzing product lifecycle costs for a better

understanding of cost drivers in additive manufacturing', *International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 23, pp. 177–188.

Liu, F. R., Zhang, Q., Zhou, W. P., Zhao, J. J. and Chen, J. M. (2012) 'Journal of Materials Processing Technology Micro scale 3D FEM simulation on thermal evolution within the porous structure in selective laser sintering', *Journal of Materials Processing Tech.* Elsevier B.V., 212(10), pp. 2058–2065.

Luo, Y. L. Y., Ji, Z. J. Z., Leu, M. C. and Caudill, R. (1999) 'Environmental performance analysis of solid freedom fabricationprocesses', *Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment (Cat. No.99CH36357)*.

Luo, Y., Leu, M. C. and Ji, Z. (1999) 'Assessment of environmental performance of rapid prototyping and rapid tooling processes', *Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 783–792.

Martínez, J., Diéguez, J. L., Ares, E., Pereira, A., Hernández, P. and Pérez, J. A. (2013) 'Comparative between FEM models for FDM parts and their approach to a real mechanical behaviour .', *Procedia Engineering*. Elsevier B.V., 63, pp. 878–884.

Meiners, W., Wissenbach, K. and A., G. (2001) 'Selective laser sintering at melting temperature. U.S. Patent 6215093'.

Meteyer, S., Xu, X., Perry, N. and Zhao, Y. F. (2014) 'Energy and Material Flow Analysis of Binder-jetting Additive Manufacturing Processes', *Procedia CIRP*, 15, pp. 19–25.

Mognol, P., Lepicart, D. and Perry, N. (2006) 'Rapid prototyping: energy and environment in the spotlight', *Rapid Prototyping Journal*, 12(1), pp. 26–34.

Morrow, W. R., Qi, H., Kim, I., Mazumder, J. and Skerlos, S. J. (2007) 'Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing', *Journal of Cleaner Production*, 15(10), pp. 932–943.

Mueller, J., Shea, K. and Daraio, C. (2015) 'Mechanical properties of parts fabricated with inkjet 3D printing through efficient experimental design', *Materials and Design*. Elsevier Ltd, 86, pp. 902–912.

Muller, P., Hascoet, J. Y. and Mognol, P. (2013) 'A Method for the Manufacturing of Functionally Graded Material Parts', *Advanced Materials Research*, 698, pp. 117–126.

Muller, P., Mognol, P. and Hascoet, J. Y. (2013) 'Modeling and control of a direct laser powder deposition process for Functionally Graded Materials (FGM) parts manufacturing', *Journal of Materials Processing Technology*. Elsevier B.V., 213(5), pp. 685–692.

Ning, F., Cong, W., Qiu, J., Wei, J. and Wang, S. (2015) 'Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling', *Composites Part B: Engineering*. Elsevier Ltd, 80, pp. 369–378.

ONU Sustainable development goals (2018) *https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/*.

Paris, H., Mokhtarian, H., Coatanéa, E., Museau, M. and Ituarte, I. F. (2016) 'Comparative environmental impacts of additive and subtractive manufacturing technologies', *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65(1), pp. 29–32.

Paul, R. and Anand, S. (2012) 'Process energy analysis and optimization in selective laser sintering', *Journal of Manufacturing Systems*, 31(4), pp. 429–437.

Peng, S., Li, T., Wang, X., Dong, M., Liu, Z., Shi, J. and Zhang, H. (2017) 'Toward a Sustainable Impeller Production: Environmental Impact Comparison of Different Impeller Manufacturing Methods', *Journal*

of Industrial Ecology, 21, pp. S216–S229.

Petrovic, V., Haro, J. V., Jordá, O., Delgado, J., Blasco, J. R. and Portolés, L. (2009) 'Additive Layer Manufacturing: State of the art in industrial applications trrough case studies', *International Journal of Production Reserach*, p. 25.

Pham, D. T. and Gault, R. . (1998) 'A comparison of rapid prototyping technologies. Interna- tional Journal of Machine Tools & Manufacture.pdf', *Interna- tional Journal of Machine Tools & Manufacture*, 38(10–11), pp. 1257–1287.

Pilipović, A., Raos, P. and Šercer, M. (2009) 'Experimental analysis of properties of materials for rapid prototyping', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40(1–2), pp. 105–115.

Ponche, R., Kerbrat, O., Mognol, P. and Hascoët, J. (2012) 'A new global approach to design for additive manufacturing To cite this version : A new global approach to design for additive manufacturing', *Virtual and Physical Prototyping*, 7(2), pp. 93–105.

Priarone, P. C., Ingarao, G., Lunetto, V., Di Lorenzo, R. and Settineri, L. (2018) 'The Role of re-design for Additive Manufacturing on the Process Environmental Performance', *Procedia CIRP*. The Author(s), 69(May), pp. 124–129.

Reeves, P. E. and Cobb, R. (1997a) 'Alternative Build Stratergy', *Rapid Prototyping Journal*, 3(1), pp. 20–31.

Reeves, P. E. and Cobb, R. (1997b) 'Surface roughness investigation of Stereolithography ACES components', *Proceedings of the Second National Conference on Rapid Prototyping and Tooling Research*, pp. 17–26.

Rickenbacher, L. and Spierings, A. (2013) 'An integrated cost-model for selective laser melting (SLM)', *Rapid Prototyping Journal*, 3(February 2012), pp. 208–214.

S.S, C. (1992) 'Apparatus and method for creating three-dimensional objects. U.S. Patent 5121329'.

Sachs, E., Haggerty, J. S., Cima, M. J. and Williams, P. A. (1993) 'Three-dimensional printing techniques. U.S. Patent 5204055'.

Schröder, M., Falk, B. and Schmitt, R. (2015) 'Evaluation of Cost Structures of Additive Manufacturing Processes Using a New Business Model', *Procedia CIRP*. Elsevier B.V., 30, pp. 311–316.

Sears, J. . (1999) *Direct laser powder deposition - state of the art*.

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*. Elsevier Ltd, 19(9–10), pp. 1117–1124.

Shishkovsky, I., Yadroitsev, I., Bertrand, P. and Smurov, I. (2007) 'Alumina-zirconium ceramics synthesis by selective laser sintering/melting', *Applied Surface Science*, 254(4), pp. 966–970.

Sood, A. K., Ohdar, R. K. and Mahapatra, S. S. (2012) 'Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement', *Journal of Advanced Research*. Cairo University, 3(1), pp. 81–90.

Sreenivasan, R. and Bourell, D. L. (2009) 'Sustainability study in selective laser sintering – An energy perspective', *Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 257–265.

Stephens, B., Azimi, P., El Orch, Z. and Ramos, T. (2013) 'Ultrafine particle emissions from desktop 3D

printers', *Atmospheric Environment*, 79, pp. 334–339.

Strano, G., Hao, L., Evans, K. E. and Everson, R. M. (2010) 'Optimisation of quality and energy consumption for additive layer manufacturing processes', *In 5th International Conference on Responsive Manufacturing - Green Manufacturing 2010*, 44(0), pp. 364–369.

Strano, G., Hao, L., Everson, R. M. and Evans, K. E. (2013) 'Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting', *Journal of Materials Processing Technology*. Elsevier B.V., 213(4), pp. 589–597.

Tan, X., Kok, Y., Toh, W. Q., Tan, Y. J., Descoins, M., Mangelinck, D., Tor, S. B., Leong, K. F. and Chua, C. K. (2016) 'Revealing martensitic transformation and α/β interface evolution in electron beam melting three-dimensional-printed Ti-6Al-4V', *Scientific Reports*. Nature Publishing Group, 6(May), pp. 1–10.

Telenko, C. and Seepersad, C. C. (2012) 'A comparative evaluation of energy consumption of Selective Laser Sintering and Injection Molding of Nylon parts', *Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 41–54.

Velasco, M. A., Lancheros, Y. and Garzón-Alvarado, D. A. (2016) 'Geometric and mechanical properties evaluation of scaffolds for bone tissue applications designing by a reaction-diffusion models and manufactured with a material jetting system', *Journal of Computational Design and Engineering*. Elsevier, 3(4), pp. 385–397.

Verma, A. and Rai, R. (2013) 'Energy Efficient Modeling and Optimization of Additive Manufacturing Processes', *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, (1), pp. 231–241.

White, D. (2003) 'Ultrasonic object consolidation. U.S. Patent 6519500'.

Wilson, J. M., Piya, C., Shin, Y. C., Zhao, F. and Ramani, K. (2014) 'Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis', *Journal of Cleaner Production*, 80, pp. 170–178.

Wohlers, T. (2017) *Wohlers Report 2017 - Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry*.

Yap, C. Y., Chua, C. K. and Dong, Z. L. (2016) 'An effective analytical model of selective laser melting', *Virtual and Physical Prototyping*, 11(1), pp. 21–26.

Yap, C. Y., Chua, C. K., Dong, Z. L., Liu, Z. H., Zhang, D. Q., Loh, L. E. and Sing, S. L. (2015) 'Review of selective laser melting: Materials and applications', *Applied Physics Reviews*, 2(4).

Yap, Y. L., Wang, C., Sing, S. L., Dikshit, V., Yeong, W. Y. and Wei, J. (2017) 'Material jetting additive manufacturing: An experimental study using designed metrological benchmarks', *Precision Engineering*. Elsevier Inc., 50, pp. 275–285.

Yoon, H.-S., Lee, J.-Y., Kim, H.-S., Kim, M.-S., Kim, E.-S., Shin, Y.-J., Chu, W.-S. and Ahn, S.-H. (2014) 'A comparison of energy consumption in bulk forming, subtractive, and additive processes: Review and case study', *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 1(3), pp. 261–279.

Yosofi, M., Kerbrat, O. and Mognol, P. (2018a) 'Energy and material flow modelling of additive manufacturing processes', *Virtual and Physical Prototyping*, 15, pp. 1-14.

Yosofi, M., Kerbrat, O. and Mognol, P. (2018b) 'Framework to Combine Technical, Economic and Environmental Points of View of Additive Manufacturing Processes', *Procedia CIRP*, 69, pp. 118-123.

Yves-Christian, H., Jan, W., Wilhelm, M., Konrad, W. and Reinhart, P. (2010) 'Net shaped high

performance oxide ceramic parts by Selective Laser Melting', *Physics Procedia*, 5(PART 2), pp. 587–594.

Zeoli, N., Tabbara, H. and Gu, S. (2011) 'CFD modeling of primary breakup during metal powder atomization', *Chemical Engineering Science*, 66(24), pp. 6498–6504.

Zhang, R., Lin, F. and Wang, X. (2009) 'Rapid Prototyping and Manufacturing Technology : Principle , Representative Technics , Applications , and Development Trends Rapid Prototyping and Manufacturing Technology : Principle ', *Tsinghua Science & Technology*, 14(June 2016), pp. 1–12.

UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE / SCIENCES POUR L'INGENIEUR

CENTRALE NANTES

Titre : Méthodologie de caractérisation prédictive des procédés de fabrication additive avec une approche technique, économique et environnementale.

Mots clés : Fabrication additive, Données d'inventaires, Propriétés mécaniques, Coût de fabrication

Résumé: L'Organisation des Nations Unies vise à moderniser les industries afin de les rendre durables et plus respectueuse de l'environnement d'ici 2030. Afin de répondre à ces attentes, il faut mettre en place des voies d'améliorations des procédés de fabrication d'un point de vue environnemental. Cette démarche nécessite une connaissance fine des flux entrants et sortants lors de la fabrication d'un produit. Néanmoins, ce n'est pas le cas pour les procédés de fabrication additives où les impacts environnementaux générés lors de la fabrication d'un produit sont encore méconnus. Par conséquent, il est primordial de bien « compter » les différentes sources de consommations et de rejets. Pour cela, une évaluation quantitative des flux intervenants pendant la fabrication de pièces est nécessaire pour améliorer la connaissance de la performance environnementale d'un procédé. Les travaux de cette thèse portent sur la proposition d'une méthodologie d'évaluation multicritère pour les procédés de fabrication additive afin de pouvoir prédire, dès l'étape de conception d'un produit, des informations sur les aspects techniques, économiques et environnementaux du couple pièce/procédé. Afin de proposer aux concepteurs la possibilité d'évaluer un produit dès son étape de conception, des modèles de consommation fins traduisant le comportement du procédé ont été mis en place. La méthodologie développée s'intéresse à l'ensemble des sources de consommations et de rejets ainsi qu'à l'ensemble des étapes nécessaire à la fabrication d'une pièce mécanique

Ce manuscrit est divisé en six chapitres qui permettent de présenter le contexte général de l'étude, l'état de l'art, la méthodologie d'évaluation multicritère, l'application sur les procédés de fabrication additive et l'exploitation sur un cas industriel. Le dernier chapitre se consacre à la conclusion sur les apports de ces travaux et propose des perspectives de recherches.

Title : Methodology of predictive characterization of additive manufacturing processes with a technical, economic and environmental approach

Keywords : Additive manufacturing, Inventory data, Mechanical properties, Production cost

Abstract: The United Nations aims to modernize industries in order to make them sustainable and more environmentally friendly by 2030. In order to meet these expectations, it is necessary to put in place ways of improving production processes from an environmental point of view. This approach requires a detailed knowledge of the incoming and outgoing flows during the manufacturing of a product. However, this is not the case for additive manufacturing processes where the environmental impacts generated during this stage are still unknown. For that, a quantitative evaluation of the flows involved during the manufacturing of parts is necessary in order to improve the knowledge of the environmental performance of a process.The work of this thesis focuses on the development of a methodology for additive manufacturing processes in order to predict information on the technical, economic and environmental aspects of the product during the design stage of a part. The methodology developed is increasingly interested in all the sources of consumption as well as all the stages necessary for the manufacturing of a mechanical part.

This manuscript is divided into six chapters that can present the general context of the study, the state of the art, the methodology developed, an application of the methodology to additive manufacturing processes and the computer tool developed during this thesis. The last chapter is devoted to the conclusion on the contributions of this work and provides research perspectives.