HAL
open science

Modélisation de la performance environnementale des procédés de fabrication par ajout de matière Application à la projection de poudres métalliques

Florent Le Bourhis

To cite this version:

Florent Le Bourhis. Modélisation de la performance environnementale des procédés de fabrication par ajout de matière Application à la projection de poudres métalliques. Génie mécanique [physics.class-ph]. Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2014. Français. NNT : . tel-01226389

HAL Id: tel-01226389

https://theses.hal.science/tel-01226389v1

Submitted on 9 Nov 2015

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

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

l'université nantes angers le mans
PÔLE DE RECHERCHE ET D'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR

Centrale Nantes

Thèse de Doctorat

Florent LE BOURHIS

Mémoire présenté en vue de l'obtention du
grade de Docteur de l'Ecole Centrale de Nantes
sous le label de L'Université Nantes Angers Le Mans

École doctorale : Sciences Pour l'Ingénieur, Géosciences, Architecture.

Discipline : Génie Mécanique, Productique, Transport
Unité de recherche : ***Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes***

Soutenue le 04 Juillet 2014

Modélisation de la performance environnementale des procédés de fabrication par ajout de matière

Application à la projection de poudres métalliques

JURY

Président :	**Dominique MILLET**	Professeur des Universités	SupMeca – Seatech, Toulon
Rapporteurs :	**Nicolas PERRY**	Professeur des Universités	Arts et Métiers ParisTech – I2M, Bordeaux
	Philippe BERTRAND	Maître de Conférences - HDR	Ecole Nationale d'Ingénieurs, Saint-Etienne
Examinateurs :	**Olivier KERBRAT**	Maître de Conférences	ENS Rennes – IRCCyN, Rennes
	Lucas DEMBINSKI	Enseignant Chercheur Contractuel	UTBM Site de Sévenans – IRTES – LERMPS, Belfort
	Stéphane LE POCHAT	Docteur	Evea Conseil, Nantes
Directeur de Thèse :	**Pascal MOGNOL**	Professeur des Universités	ENS Rennes – IRCCyN, Rennes
Co-directeur de Thèse :	**Jean-Yves HASCOËT**	Professeur des Universités	Ecole Centrale de Nantes – IRCCyN, Nantes

Remerciements

"En l'honneur de mon amie, Vic, partie bien trop vite et qui aurait été, j'en suis sûr, fier de son p'tit Flo."

Dans un premiers temps je voudrais remercier mes encadrant de thèse Pascal Mognol, Jean-Yves Hascoët et Olivier Kerbrat pour m'avoir permis de réaliser cette thèse dans de très bonnes conditions. Nous avons su trouver l'équilibre parfait liant à la fois l'autonomie dont j'ai pu avoir besoin à des conseils avisés pour pouvoir mener à bien ces travaux de thèse. Malgré la prise en charge de vos nouvelles responsabilités de recherche vous avez su trouver suffisamment de temps à me consacrer et je vous en remercie. Cette collaboration à plusieurs niveaux (de la vision micro proposée, en partie, par Olivier à la vision macro proposée, en partie, par Pascal et Jean-Yves) m'a permise de m'épanouir et de m'enrichir durant ces trois années et je n'ai jamais eu l'impression de perdre mon temps lors de nos échanges. Pour finir, je vous remercie pour le soutien que vous avez pu m'apporter lors des moments clés de la thèse, Merci !.

Je voudrais ensuite remercier l'ensemble des membres de mon jury de m'avoir honoré de leur présence. Je remercie tout particulièrement Nicolas Perry et Philippe Bertrand pour le travail de rapporteurs qu'ils ont fait permettant de lever des points intéressants du manuscrit, et qui plus est dans un temps assez court. Je remercie l'ensemble des membres avec qui nous avons pu avoir des échanges très intéressants, soit en amont soit pendant la soutenance, couvrant un large spectre d'expertise. Ces échanges ont permis de soulever des questions très intéressantes.

Je remercie aussi l'ensemble des membres de l'équipe MO2P avec qui nous avons eu des échanges toujours intéressants (malgré leur attachement à faire du copeau ;-), c'est pour toi Benoit) lors des réunions ou aux travers des différents séminaire en France. Je remercie mes collègues - Pierre, Rémi et Benoit - pour les nombreux échanges scientifiques que nous avons pu avoir. Je remercie aussi Gilles et Thierry pour leur accueil toujours agréable lors des différentes expérimentations menées. Pour finir je tiens à remercier "mes stagiaires" - Kevin et David - que j'ai eu le plaisir d'encadrer au cours de ma thèse.

Tout au long de cette thèse j'ai pu être confronté à un grand nombre d'experts à travers le réseau EcoSD, que nous avons intégré en tant qu'expert en procédés de fabrication (ce qui n'était pas évident au départ), qui m'ont permis d'ouvrir mon champ de recherches et de connaissances.

Je remercie donc l'ensemble de ces membres et son président pour nous avoir donné une place dans ce réseau afin de défendre nos idées ce qui fut très constructif et stimulant.

Ces trois années de thèse s'étant déroulées la plupart du temps au sein du bureau R134 de l'ENS Rennes je remercie l'ensemble de mes co-bureau - Rémi, Pierre, Roman et Coko - de m'avoir soutenu. Les échanges que l'on a pu avoir dans ce bureau - point central de regroupement du département - ont toujours été très constructifs et je trouve que ceci est important pour garder la motivation durant ces trois années. J'ai une pensée toute particulière pour mon ami Pierre qui soutient sa thèse d'ici deux semaines. Bon courage à toi aussi Roman pour ces deux dernières années, je suis sûr que l'on ne t'aura pas découragé avec Pierre durant notre rédaction. Je suis désolé je ne serais plus là l'année prochaine pour écouter du classique à fond dans le bureau la nuit venue.

Je remercie aussi l'ensemble des enseignants du département Mécatronique de l'ENS Rennes, département dans lequel je fut d'abord élève avant d'y effectuer l'ensemble de mes enseignements, pour la qualité des enseignements que j'ai pu recevoir dans un premier temps puis leurs apports et remarques durant ces trois dernières années.

Je tiens à remercier l'ensemble du personnel technique et administratif - Christine, Rose Marie, Marielle, Marie Émilie, Sébastien, Christian, Gwenaëlle, Fanny, Jehona, Morgane, Alexia - de l'école avec qui nous avons tissé des liens assez forts durant ces trois ou sept années pour certains et sur qui nous pouvons compter en permanence afin de nous épauler et nous aider ce qui est essentiel pour que notre écosystème universitaire fonctionne correctement.

Bien sûr je n'oublie pas de remercier tout particulièrement l'ensemble des "chasseurs" de notre cabane - Philippe, Philippe, Pascal, Sébastien, Régis, Pierre, Rémi, Coko, Olivier, Patrick, Pierre et Cécile - dont certains auraient pu faire parti des remerciements destinés aux personnels de l'école mais qui en plus de m'aider dans toutes les tâches administratives ou techniques ont aussi été là pour partager de bons moments autour d'un café ou lors de réunions techniques plus "professionnelles", merci à vous tous cette cabane va me manquer !

Je remercie toute ma famille - Mamie, Tonton, Magguy, Arnaud, Jean Luc, Maryannick, Guillaume, Thomas, Brigitte, Christian, Antoine, Étienne, Joël, Dominique, Solène, Axelle, Papa, Maman et Jérémi - pour avoir fait le déplacement si nombreux le jour de la soutenance. Je pense que vous avez découvert pour une grande majorité comment "j'occupais" mon temps ces dernières années le jour de la soutenance car je n'en n'ai pas trop discuté auparavant. Merci Jean Luc et Maryannick ainsi que Brigitte et Christian à la fois pour les moments passés ensemble soit sur Rennes soit autour d'une crêpe et d'un "petit" verre, mais aussi, merci de m'avoir accueilli et hébergé les premières années cela a été fort agréable et utile. Merci à toi papa pour les heures de relecture passées sur le manuscrit !

Le travail de thèse n'étant pas la seule occupation d'un doctorant, je remercie l'ensemble de mes amis pour les moments passés en dehors du laboratoire à parler d'autres choses. Ces trois

années n'auraient pas été les mêmes sans vous. Ces remerciements s'adressent tout particulièrement à Chocho, Armelle, Pepe, Alys, Rémi, Marion, Pierre, Claire et Decu avec qui j'ai passé et passerai encore d'excellents moments je l'espère. Chocho je suis obligé de te mettre une ligne spéciale pour toi pour, d'une te remercier d'être là à chaque moment important et ce depuis plus de quinze ans déjà, mais aussi pour me suivre (quoique parfois c'est un peu l'inverse) dans des projets toujours plus fous les uns que les autres.

Pour finir ces remerciements, je tiens à te remercier ma chérie pour avoir été présente ces trois dernières années (et les autres bien entendues) afin de me réconforter dans les choix que j'ai pu faire mais aussi afin de m'apporter toute l'aide nécessaire au bon déroulement de ma thèse, que ce soit pour les relectures du manuscrit et surtout pour le soutient apporté au quotidien. Sans toi ces trois années auraient été plus difficiles. Les moments passés à tes côtés m'ont permis, en m'apportant ce dont j'avais besoin pour me changer les idées, de m'épanouir d'autant plus dans mon travail. Merci d'être là pour me soutenir, maintenant c'est à toi de te lancer dans le doctorat !

Table des matières

CHAPITRE 1 — Contexte général de l'étude 1

1 Fabrication additive 2
1.1 Principe 2
1.2 Évolution des technologies de fabrication 2
1.3 Description des technologies de fabrication 5
1.3.1 Technologie : dépôt de fils fondus 6
1.3.2 Technologie : lit de poudres 7
1.3.3 Technologie : projection de poudres 8
1.4 Avantages et applications 9
1.4.1 De nouvelles possibilités de conception 10
2 Aspects environnementaux 11
2.1 Contexte 11
2.2 Analyse du cycle de vie 13
2.2.1 Définition des objectifs 14
2.2.2 Inventaire des émissions et extractions 14
2.2.3 Analyse des impacts environnementaux 15
2.2.4 Interprétation des résultats 16
2.3 Synthèse 16
3 Prise en compte des aspects environnementaux en phase de fabrication 17
3.1 Contexte 17
3.2 La performance environnementale des procédés de fabrication 18
3.3 L'avenir de la fabrication additive dans un contexte de performance environnementale 19
4 Synthèse et plan du manuscrit 20

CHAPITRE 2 — État de l'art et problématique scientifique 23

1 Avant-propos 24
2 Procédés par enlèvement de matière 24
2.1 Consommation d'énergie électrique des procédés de fabrication par enlèvement de matières 26

2.1.1 Les méthodes analytiques liées à la théorie de la coupe 26
2.1.2 Les méthodes analytiques orientées process 29
2.1.3 L'optimisation des paramètres de coupe 31
2.1.4 Modélisation empirique de la consommation électrique 33
2.2 Consommation des fluides de coupe 34
2.2.1 Lubrification minimale (MQL) 35
2.2.2 Usinage sous azote (Cryogenic machining) 36
2.2.3 Usinage à sec (Dry machining) 36
2.2.4 Influence des conditions de lubrification sur l'intégrité de la surface 37
2.3 Consommation d'autres consommables 37
2.4 Approche multi-objectifs de la performance d'un procédé de fabrication . 38
2.5 Synthèse 40
3 Procédés par ajout de matière 40
3.1 Consommation d'énergie électrique des procédés de fabrication par ajout de matières 41
3.1.1 L'influence de l'orientation de fabrication sur la consommation énergétique 42
3.1.2 L'influence du remplissage de l'espace machine sur la consommation énergétique 43
3.1.3 Comparaison des procédés additifs avec les procédés traditionnels 44
3.1.4 Prise en compte de la dualité consommation énergétique de la machine et qualité de la pièce 47
3.2 Consommation de matière première 50
3.2.1 Recyclage de poudres plastiques 50
3.3 La prise en compte de l'ensemble des flux ayant un impact sur l'environnement 51
3.4 La fabrication additive, un atout majeur pour la diminution des impacts environnementaux sur cycle de vie 52
3.5 Synthèse 53
4 Intégration dans la chaîne numérique 54
4.1 Consommation d'énergie électrique et chaîne numérique 54
4.2 Synthèse 56
5 Synthèse et positionnement de nos travaux de recherche 56
5.1 Synthèse 56
5.2 Positionnement de nos travaux de recherche 57

CHAPITRE 3 — Méthodologie d'évaluation environnementale 59

1 Approche générale 60
2 Modélisation du procédé de fabrication 62
2.1 Données nécessaires à la modélisation 65
2.2 Ordonnancement de la méthodologie 65

2.2.1 Création du modèle numérique de la pièce 66
2.2.2 Génération du programme à commande numérique 67
2.2.3 Lecture et extraction des données du programme à commande numérique 68
2.2.4 Données procédés 69
2.2.5 Évaluation de l'impact environnemental 71
2.3 Boucle de retour 74
3 Synthèse sur la méthodologie 75

CHAPITRE 4 — Application au procédé par projection de poudres 77

1 Introduction à la fabrication par projection de poudres 78
2 Atomisation de la poudre 80
2.1 Principe de l'atomisation 81
2.2 Atomisation gazeuse réalisée avec le laboratoire IRTES-LERMPS 82
2.3 Consommation électrique 83
2.3.1 Mise sous vide de l'enceinte 83
2.3.2 Préchauffage de la buse d'atomisation 84
2.3.3 Mise en chauffe du bain de fusion 85
2.3.4 Creuset froid 85
2.3.5 Creuset chaud 87
2.4 Consommation de gaz 88
2.5 Consommation d'eau 89
2.6 Synthèse de l'étude sur l'atomisation de poudres 90
3 Fabrication par projection de poudres 91
3.1 Présentation de la machine étudiée 91
3.2 Évaluation de la consommation d'énergie électrique 93
3.2.1 Consommation électrique des axes 94
3.2.2 Consommation électrique du laser 100
3.2.3 Consommation électrique de l'unité de régulation du laser . . . 102
3.2.4 Consommation électrique constante 103
3.2.5 Synthèse 103
3.3 Évaluation de la consommation de matière 104
3.3.1 Consommation de la matière projetée 106
3.3.2 Synthèse 107
3.4 Évaluation de la consommation de fluides 107
3.4.1 Consommation de gaz inerte 108
3.4.2 Consommation de fluides constants 109
3.4.3 Synthèse 109
3.5 Synthèse de l'étude sur la projection de poudres métalliques 109
4 Valorisation de la poudre non fondue 110
4.1 Méthodologie de recyclage de poudres métalliques 110
4.1.1 Description de la méthodologie de recyclage 110
4.1.2 Tamisage et caractérisation géométrique 112

4.1.3 Séchage de la poudre et essai de coulabilité 115
4.2 Caractérisation mécanique d'éprouvettes fabriquées à partir de poudres recyclées 117
4.2.1 Essais de traction 118
4.3 Synthèse de l'étude sur la valorisation de poudres métalliques 120
5 Synthèse 121

CHAPITRE 5 — Démonstrateur et validation du modèle 123

1 Présentation du démonstrateur développé 124
1.1 Présentation 124
1.2 Étape 1 : lecture et extraction des données 124
1.3 Étape 2 : Calcul de l'impact environnemental 126
1.3.1 Fonction définissant la consommation des axes 127
1.3.2 Fonction définissant les autres consommations 130
1.3.3 Fonction traduisant les consommations en impact environnemental 130
1.4 Étape 3 : Affichage de l'impact environnemental associé à la pièce produite 130
2 Validation du modèle par rapport à la fabrication d'une pièce réelle 131
2.1 Présentation de la pièce d'étude 131
2.2 Résultats de consommations issus du modèle numérique 132
2.3 Résultats des consommations dues à la pièce fabriquée 133
2.3.1 Consommation d'énergie électrique 133
2.3.2 Consommation de matière 135
3 Synthèse 135

CHAPITRE 6 — Conclusion et perspectives 139

1 Synthèse sur les travaux menés 140
2 Apports des travaux menés 142
3 Perspectives et voies de recherches 143

CHAPITRE A — Puissance électrique axes 145

CHAPITRE B — Essais de traction 147

Bibliographie 153

Liste des figures

1.1 Les prémices de la fabrication additive par Blanther 2
1.2 L'invention du photocopieur tridimensionnel par le professeur Tournesol 3
1.3 Évolution des ventes de machines de fabrication additive dans le monde depuis 1988 [Wohlers2013] 4
1.4 Évolution des ventes d'imprimantes 3D personnelles depuis 2007 [Wohlers2013] 4
1.5 Technologie de dépôt de fils fondus ou impression 3D 6
1.6 Technologie de fusion sélective par laser 7
1.7 Technologie de projection de poudres 8
1.8 Part relative d'utilisation de la fabrication additive par domaine [Wohlers2013] . 9
1.9 Projet d'architecture sur la réhabilitation d'une ZAC en région parisienne réalisé en partie par fabrication additive (Imprimante 3D Mojo de chez Stratasys et machine de fusion sélective laser ZPrinter® 650 de chez 3DSystems) [Chauvidon2013] 10
1.10 Exemples d'optimisations de conceptions orientées fabrication additive 10
1.11 Assemblage virtuel montrant l'intégration de la rotule artificielle réalisée en fabrication rapide dans le modèle 3D de l'os pelvien [Popov2009] 12
1.12 Concept du développement durable 12
1.13 Développement de l'outil d'Analyse de Cycle de Vie 14
1.14 Nombre de publications utilisant des méthodes de quantifications environnementales depuis 1997 [Carvalho2014] 15
1.15 Nombre de publications par méthodes [Carvalho2014] 16
1.16 Étapes de l'Analyse de Cycle de Vie d'un produit 17
1.17 Méthodologie UPLCI associée à l'initiative CO2PE ! [Kellens2011a] 19

2.1 Schématisation du modèle d'usinage [Munoz1995] 25
2.2 Rendement énergétique d'une machine de fraisage FV-32 exprimé sous forme de surface de réponse [Draganescu2003] 27
2.3 Modèle d'estimation de la consommation d'énergie électrique d'une machine outil [Balogun2013] 29
2.4 Profile d'utilisation d'une machine d'usinage pour une opération d'ébauche [Dietmair2009] 30
2.5 Illustration de la modélisation par état [Dietmair2009] 30

2.6 Pièce test normalisée (machine d'usinage de petite taille) [Behrendt2012] 31
2.7 Exemple d'un block d'aluminium usiné lors des expérimentations [Newman2012] 33
2.8 Schéma de comparaison des technologies de machines, utilisant le concept d'ACV [Pusavec2010a] 34
2.9 Schématisation d'outils coupants utilisant la lubrification minimale (MQL) [Lawal2013] 35
2.10 Flux de matières et d'énergie associés aux procédés de fabrication et les différents types de consommations d'eau [Zhao2012] 38
2.11 Les différentes orientations de fabrication de la pièce étudiée [Mognol2006] . . . 42
2.12 Génération de solutions de candidats et application de l'opérateur de variation sur un échantillon de pièce 3D [Verma2013] 43
2.13 La géométrie normalisée de contrôle de puissance [Baumers2010] 44
2.14 Configuration de remplissage maximal de l'espace de travail dans le cas de la fusion sélective laser (à gauche) et de la fusion par faisceau d'électrons (à droite) [Baumers2011] 44
2.15 Pièce reconçue [Atzeni2012] 45
2.16 Analyse du point de rupture économique comparant le procédé conventionnel d'injection haute pression (HPDC) avec la technique de fusion sélective laser (SLS) [Atzeni2012] 45
2.17 Levier, l'objet de l'étude [Ruffo2006a] 46
2.18 Comparaison des modèles de coûts économique entre l'injection plastique et la fusion sélective [Ruffo2006a] 46
2.19 Comparaison environnementale des procédés d'usinage et de fabrication additive [Serres2011] 47
2.20 Objet d'étude à fabriquer et front de Pareto correspondant [Strano2010] 48
2.21 Structure de l'optimisation développée pour un tranchage adaptatif [Verma2013] 52
2.22 Représentation schématique de la méthodologie permettant d'estimer la puissance électrique nécessaire [Avram2011] 55
2.23 Architecture du logiciel de simulation [Kong2011] 55
2.24 Méthodologie d'évaluation de la performance environnementale des procédés de fabrication [Le Bourhis2013] 58

3.1 Focus sur l'étape de fabrication lors d'une analyse de cycle de vie d'un produit . 61
3.2 Modélisation des flux de matières, d'énergies et d'informations dans la méthodologie développée 63
3.3 Limite CLAD 64
3.4 Méthodologie d'évaluation de la performance environnementale du couple Pièce-Procédé [Le Bourhis2014] 66
3.5 Exemple de modèle numérique de pièce 67
3.6 Exemple de fichier en code G utilisé en usinage 67
3.7 Exemple de protocole d'acquisition de données pour une fraiseuse 3 axes, Vernier CV600 70

4.1 Évolution du nombre de publications de brevets et d'articles traitant de la projection de poudres de 1984 à 2013 . . . 78
4.2 Exemple de pièce obtenue par projection de poudres . . . 79
4.3 Focus sur l'étape de fabrication lors d'une analyse de cycle de vie d'un produit "CLADé" . . . 80
4.4 Comparatif de production de matières premières en plaques ou en poudres [Morrow2007] . . . 81
4.5 Obtention de poudres métalliques par atomisation gazeuse (IRTES-LERMPS) . . . 82
4.6 Tour d'atomisation gazeuse d'IRTES-LERMPS . . . 83
4.7 Résistance d'atomisation en graphite . . . 84
4.8 Puissance absorbée par l'inducteur, cas du creuset froid . . . 86
4.9 Puissance absorbée par l'inducteur en fonction de la consigne, cas du creuset froid 86
4.10 Puissance absorbée de l'inducteur, cas du creuset chaud . . . 87
4.11 Puissance absorbée de l'inducteur en fonction de la consigne, cas du creuset chaud 88
4.12 Puissance absorbée de l'inducteur en fonction de la consigne, cas des deux creusets 88
4.13 Consommation d'Argon lors de l'atomisation, cas du creuset chaud . . . 89
4.14 Illustration de l'ensemble des éléments nécessaires à la fabrication par projection de poudres . . . 92
4.15 Méthodologie d'évaluation de la performance environnementale du couple Pièce-Procédé pour le procédé CLAD . . . 93
4.16 Évaluation de la consommation électrique du procédé CLAD . . . 95
4.17 Méthodologie de calcul de la puissance électrique absorbée par les axes X, Y et Z 96
4.18 Consommation électrique de l'axe X . . . 99
4.19 Rendement de l'axe X . . . 100
4.20 Consommation de l'unité laser . . . 101
4.21 Consommation électrique de l'unité de refroidissement laser . . . 102
4.22 Synthèse de la consommation électrique du procédé CLAD en fonction de la puissance laser commandée . . . 104
4.23 Exemple de pièce fabriquée par impression 3D avec l'utilisation de support [Ponche2013] . . . 105
4.24 Tête de projection de poudres . . . 105
4.25 Évaluation de la consommation de matière du procédé CLAD . . . 106
4.26 Évaluation de la consommation de fluides du procédé CLAD . . . 108
4.27 Méthodologie de recyclage de la poudre non fusionnée . . . 111
4.28 Étude géométrique sur Alicona InfiniteFocus . . . 113
4.29 Étude géométrique des particules de poudres recyclées en fonction du mode de tamisage . . . 113
4.30 Étude de la sphéricité des particules de poudres recyclées en fonction du mode de tamisage . . . 114
4.31 Entonnoir de Hall . . . 115
4.32 Coulabilité en fonction du taux de poudres recyclées . . . 116
4.33 Géométrie de éprouvettes de traction réalisée par projection de poudres puis usinage . . . 118

4.34 Résultats des essais de traction de l'ensemble des échantillons 120
4.35 Illustration du décollement de couche sur une éprouvette soumise à de la traction 120
4.36 Focus sur l'étape de fabrication lors d'une analyse de cycle de vie 122

5.1 Interface utilisateur du démonstrateur informatique, lecture et extraction des données 125
5.2 Zoom sur la pièce 125
5.3 Organisation du programme informatique 126
5.4 Exemple de fonctions définissant la consommation de chaque source d'impact . . 127
5.5 Trajectoire modélisée 128
5.6 Variation de la vitesse pour la trajectoire proposée 128
5.7 Variations de la vitesse avec les valeurs de jerk et d'accélération maximale quasi-infinies pour la trajectoire proposée 129
5.8 Présentation de la pièce d'étude 131
5.9 Résultat de l'évaluation de la consommation en phase de fabrication de la pièce étudiée 132
5.10 Consommation d'énergie électrique de la fabrication de l'Airduck 133
5.11 Pièce finale réalisée en fabrication additive par projection de poudres métallique . 135

A.1 Consommation électrique de l'axe y 145
A.2 Consommation électrique de l'axe z 145
A.3 Consommation électrique de l'axe A 146
A.4 Consommation électrique de l'axe C 146

B.1 Résultats d'essais de traction simple sur l'échantillon A 147
B.2 Résultats d'essais de traction simple sur l'échantillon B 148
B.3 Résultats d'essais de traction simple sur l'échantillon C 149
B.4 Résultats d'essais de traction simple sur l'échantillon D 150
B.5 Résultats d'essais de traction simple sur l'échantillon E 151

Liste des tableaux

1.1 Technologie de fabrication par ajout de matière [ISO2011] 5

2.1 Analyse énergétique de quatre machines de fraisage [Dahmus2004] 28
2.2 Tableau comparatif, d'un point de vue environnemental, des machines de fabrication additive [Le Bourhis2012] 49

3.1 Facteurs de caractérisation issus de la méthode Eco-Indicateur 99 74

4.1 Valeurs de consommations pour l'obtention d'un kilogramme de verre métallique 90
4.2 Définition du taux de poudres recyclées et du taux de poudres neuves par échantillon 111
4.3 Paramètres de tamisage 112
4.4 Analyse géométrique des poudres en fonction du mode de tamisage 115
4.5 Résultat de coulabilité après séchage à 100°C 116
4.6 Résultat de coulabilité après séchage à 200°C 116
4.7 Données de fabrication pour les éprouvettes de traction 117
4.8 Résultats moyens des essais de traction sur l'ensemble des échantillons 119
4.9 Résultats des essais de traction réalisés sur une éprouvette obtenue par projection de poudres avec la buse MesoCLAD [Muller2013] 120

5.1 Consommation d'énergie électrique par entité 135

Principales notations

ECR	Energy Concumption Rate [kWh/kg]
$I.E.$	Impact Environnemental [mPts]
$I.E.m$	Impact Environnemental massique [mPts/kg]
$mPts$	Millipoints
fc_i	Facteur de caractérisation de la substance i [mPts/unité de i]
$Ee^{procédé\ j}$	Énergie électrique consommée par le procédé j [kWh]
$m_{matière}^{procédé\ j}$	Masse de matière consommée par le procédé j [kg]
$V_{fluide}^{procédé\ j}$	Volume de fluide consommé par le procédé j [l]
X	Position linéaire pilotée suivant X dans le programme à commande numérique [mm]
Y	Position linéaire pilotée suivant Y dans le programme à commande numérique [mm]
Z	Position linéaire pilotée suivant Z dans le programme à commande numérique [mm]
A	Position angulaire pilotée suivant X dans le programme à commande numérique [°]
B	Position angulaire pilotée suivant Y dans le programme à commande numérique [°]
C	Position angulaire pilotée suivant Z dans le programme à commande numérique [°]
F	Vitesse d'avance pilotée dans le programme à commande numérique [mm/min]
S	Vitesse de rotation pilotée de la broche dans le programme à commande numérique [tr/min]
$t_{vide}^{atomisation}$	Durée nécessaire pour faire le vide dans la chambre d'atomisation [secondes]

$t_{fab}^{atomisation}$	Temps de fabrication par atomisation [secondes]
$Pe_{pompe\ à\ vide}^{atomisation}$	Puissance électrique absorbée par la pompe à vide en phase d'atomisation [kW]
$Ee_{pompe\ à\ vide}^{atomisation}$	Énergie électrique consommée par la pompe à vide en phase d'atomisation [kWh]
$t_{préchauffage\ buse}^{atomisation}$	Durée nécessaire pour préchauffer la buse en phase d'atomisation [secondes]
$Ee_{préchauffage\ buse}^{atomisation}$	Énergie électrique consommée pour le préchauffage de la buse en phase d'atomisation [kWh]
$Pe_{creuset\ k}^{atomisation}(U_{max})$	Puissance électrique absorbée par le creuset i en phase d'atomisation [kW]
i	Creuset froid ou creuset chaud
$Ee_{inducteur}^{atomisation}$	Énergie électrique consommée par l'inducteur dû au creuset i en phase d'atomisation [kWh]
ρ_{argon}	Masse volumique de l'argon [kg/l]
$dm_{argon}^{atomisation}$	Débit massique d'argon en phase d'atomisation [kg/secondes]
$V_{argon}^{atomisation}$	Volume d'argon consommée en phase d'atomisation [l]
$V_{eau}^{atomisation}$	Volume d'eau consommée en phase d'atomisation [l]
Ee^{clad}	Énergie électrique consommée par le procédé de projection de poudres [kWh]
$m_{matière\ perdue}^{clad}$	Masse de matière perdue par le procédé de projection de poudres [kg]
$m_{matière\ fusionne}^{clad}$	Masse de matière fusionnée par le procédé de projection de poudres [kg]
$m_{mat.\ proj.}^{clad}$	Masse de matière projetée par la tête de projection de poudres [kg]
$V_{gaz\ c.}^{clad}$	Volume de gaz conformeur consommé par le procédé de projection de poudres [l]
$V_{gaz\ p.}^{clad}$	Volume de gaz porteur consommé par le procédé de projection de poudres [l]
$V_{refroidissement}^{CLAD}$	Volume de fluide de refroidissement consommé [l]
p_i	Point de passage piloté de la tête de projection de poudres [mm]
V_i	Vitesse commandée de la tête de projection de poudres [mm/min]
P_l	Puissance laser commandée lors de la fabrication [Watts]
t_{laser}^{clad}	Temps de lasage [secondes]
d_m^{clad}	Débit massique de poudres [g/min]
d_g^{clad}	Débit volumique de gaz [l/min]

t_{fab}^{clad}	Temps de fabrication de la pièce par le procédé de projection de poudres [secondes]
Ee_{axes}^{clad}	Énergie électrique consommée par les axes machine en phase de fabrication [kWh]
$Pe_{axes_i}^{clad}$	Puissance électrique absorbée par l'axe i [kW]
$Ee_{refroidissement\ axes}^{clad}$	Énergie électrique consommée lors du refroidissement des axes machine en phase de fabrication [kWh]
Ee_{laser}^{clad}	Énergie électrique consommée par le laser en phase de fabrication [kWh]
Pe_{veille}^{clad}	Puissance électrique absorbée lors de la veille du laser [kW]
$g(P_l)$	Fonction mathématique associant à chaque puissance laser commandée la puissance électrique associée (sans la veille)
$Ee_{refroidisseur\ laser}^{clad}$	Énergie électrique consommée lors de la régulation de la température du laser en phase de fabrication [kWh]
$Pe_{marche\ ref.}^{clad}$	Puissance électrique absorbée par le refroidisseur en marche [kW]
$Pe_{veille\ ref.}^{clad}$	Puissance électrique absorbée par le refroidisseur en veille [kW]
$Ee_{projection\ poudre}^{clad}$	Énergie électrique consommée par l'unité de projection de poudres en phase de fabrication [kWh]
$Ee_{extraction\ gaz}^{clad}$	Énergie électrique consommée par l'unité d'extraction des gaz en phase de fabrication [kWh]
$Ee_{hydraulique}^{clad}$	Énergie électrique consommée par les unités hydrauliques en phase de fabrication [kWh]
$Ee_{armoire}^{clad}$	Énergie électrique consommée par l'armoire électrique en phase de fabrication [kWh]
$Ee_{constante}^{clad}$	Énergie électrique constante consommée par la machine en phase de fabrication [kWh]
$Pe_{constante}^{clad}$	Puissance électrique constante absorbée par la machine en phase de fabrication [kW]
d	Longueur mesurée dans le plan d'analyse des grains de poudre, appelée diamètre [μm]
h	Longueur mesurée dans le plan orthogonal d'analyse des grains de poudre, appelée hauteur [μm]
Re	Limite d'élasticité du matériau étudié [MPa]
Rm	Résistance à la traction du matériau étudié [MPa]
A	Allongement à la rupture [%]
E	Module d'Young du matériau considéré [GPa]

1 Contexte général de l'étude

Sommaire

1 **Fabrication additive** 2
2 **Aspects environnementaux** 11
3 **Prise en compte des aspects environnementaux en phase de fabrication** . 17
4 **Synthèse et plan du manuscrit** 20

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

Dans une première partie, nous nous intéresserons **aux procédés de fabrication additive**. Nous verrons notamment quelles peuvent être les possibilités offertes par ces procédés innovants dans un contexte de développement durable.

La seconde partie de ce chapitre sera consacrée à la présentation générale des moyens de **prise en compte des impacts environnementaux**. Nous analyserons les outils qui sont disponibles afin de **quantifier** les impacts environnementaux. Nous verrons aussi dans quelle mesure il est possible d'utiliser ces quantifications d'un point de vue industriel.

Dans une troisième partie, nous nous intéresserons à **l'analyse environnementale des procédés de fabrication** et plus particulièrement des procédés additifs.

Pour finir, la dernière partie de ce premier chapitre permettra de présenter **le plan qui sera suivi dans la suite de ce manuscrit**.

1 Fabrication additive

1.1 Principe

La fabrication additive ou fabrication par ajout de matière regroupe un ensemble de procédés permettant de fabriquer couche par couche, cordon par cordon ou point par point, par ajout de matière un objet physique à partir de son modèle numérique. Ces procédés ont longtemps été restreints à la production de prototypes. Cependant, ces dernières années, l'évolution des technologies utilisées pour la fabrication additive a permis de faire passer les procédés de fabrication par ajout de matière du stade de la fabrication de prototype au stade de la production de pièces industrielles fonctionnelles [Gibson2009a, Gibson2009b]. On retrouve un grand nombre de technologies associées au principe de fabrication additive comme l'impression 3D, la projection de poudres ou le frittage laser. Dans la section suivante nous détaillerons plus précisément ces différentes technologies et leur degré de maturité.

1.2 Évolution des technologies de fabrication

Le concept de fabrication par ajout de matière a vu le jour en 1892 avec le premier brevet déposé par Blanther [Blanther1892]. Blanther proposa une méthode afin d'obtenir l'outillage nécessaire à la fabrication de cartes topographiques en 3D. Il lui suffit alors de réaliser des courbes topographiques sur un ensemble de plaques de cire, chaque plaque représentant une couche d'impression, puis d'assembler les plaques les unes sur les autres pour obtenir l'outillage en trois dimensions. Enfin, une étape visant à lisser les contours était nécessaire afin d'éviter l'effet escalier. La figure 1.1 illustre de façon simplifiée le concept développé par Blanther.

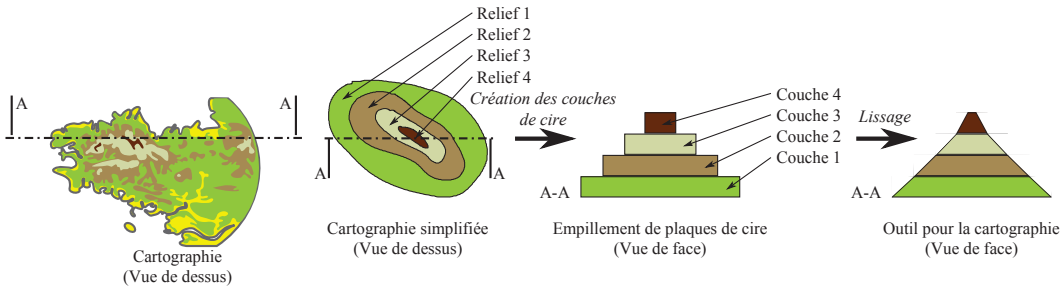


Figure 1.1 – Les prémices de la fabrication additive par Blanther

Il faudra attendre quasiment un siècle avant que les premières machines industrielles voient le jour. En 1986, l'américain Charles Hull [Hull1984] industrialise la première machine de fabrication par ajout de matière basée sur la technologie de polymérisation. Il sera le fondateur de l'entreprise 3D Systems, leader de l'impression 3D dans le monde avec un chiffre d'affaire de 513 millions de dollars pour l'année 2013 [Le Braz2014]. Il est intéressant de noter que le brevet associé à cette technologie fût publié le 8 août 1984 par Chuck Hull. Cependant l'aventure de l'impression 3D aurait pu être française car trois semaines avant Charles Hull, le 16 Juillet 1984, l'équipe française composée de Jean-Claude André, d'Alain Le Méhauté et d'Olivier de Witte déposa le premier brevet sur le concept d'impression 3D en France pour le compte

de la Compagnie industrielle des lasers (Cilas Alcatel) [André1984]. Ce procédé consiste en la photo-polymérisation de couches de résine photo-sensible projetée par une tête d'impression (tout comme l'impression classique) à partir d'un modèle numérique de la pièce à fabriquer. Notons, pour la petite histoire, l'imagination de Hergé qui en 1972 par le biais du professeur Tournesol invente le premier photocopieur tridimensionnel dans la bande dessinée *Tintin et Le lac aux requins* dont une illustration est donnée sur la figure 1.2.

Figure 1.2 – L'invention du photocopieur tridimensionnel par le professeur Tournesol

À partir des années 1990, un grand nombre d'études technologiques ont été menées afin de développer ce concept de fabrication par ajout successif de matière que ce soit pour des matériaux plastiques, métalliques ou céramiques. C'est en 1989 que Deckard développe le premier concept de frittage laser [Deckard1989]. Cependant, la technologie qu'il développe ne permet pas d'obtenir des pièces denses. En effet, il utilise deux poudres dont les propriétés thermiques sont différentes. La poudre dont la température de fusion est plus basse sera fondue par le laser et servira de liant à la seconde poudre, permettant ainsi l'agglomération de ces grains afin de former la pièce souhaitée.

L'évolution des technologies laser a été le tremplin majeur à l'évolution des procédés de fabrication par ajout de matière. En effet, grâce à ces évolutions technologiques il devient possible d'augmenter la densité d'énergie acheminée au point focal du laser permettant ainsi de fusionner directement des poudres métalliques afin de fabriquer des pièces denses sans liant.

L'évolution des ventes de machines professionnelles est représentée sur la figure 1.3. On peut remarquer sur cette figure la corrélation entre le dépôt de brevet d'une technologie (marqué sur la frise bleue) et l'augmentation significative des ventes de machines professionnelles quatre ans plus tard. 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. En 2012, plus de 8000 machines ont été vendues dans le monde.

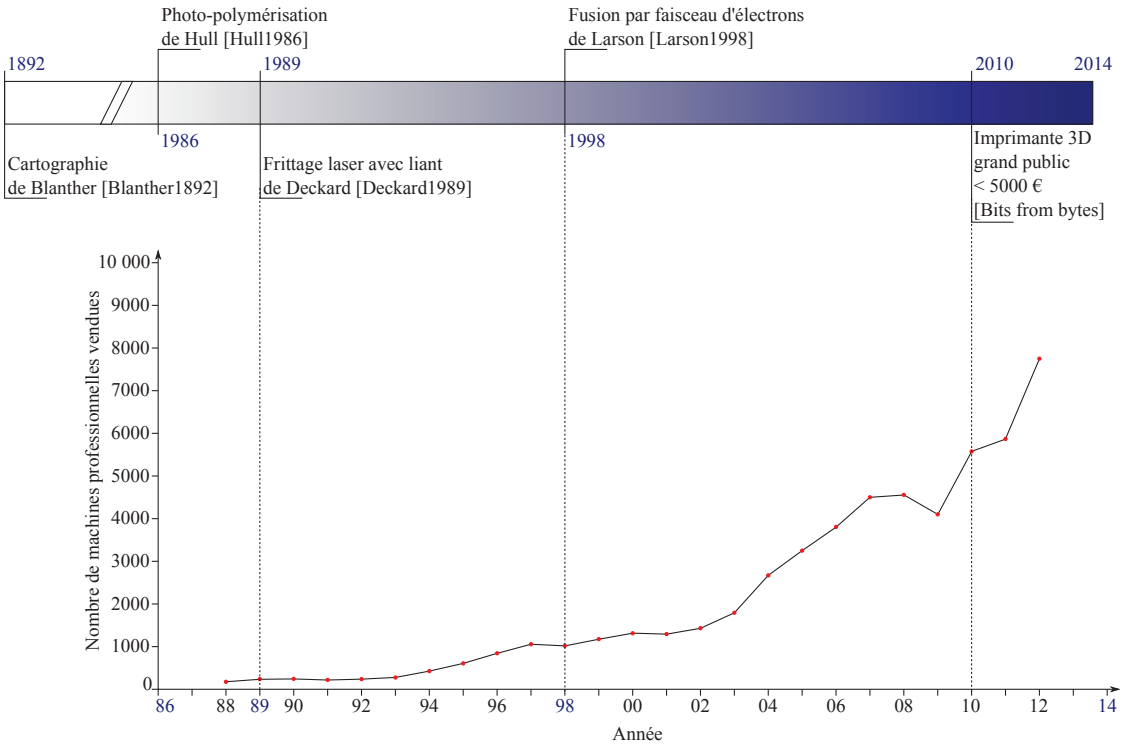


Figure 1.3 – Évolution des ventes de machines de fabrication additive dans le monde depuis 1988 [Wohlers2013]

En 2007, on a vu apparaître les premières machines personnelles bas coûts basées, en grande partie, sur la technologie de dépôt de fils fondus. On peut remarquer sur la figure 1.4 l'explosion des ventes de ces machines depuis les années 2010. Cette courbe tend à montrer la démocratisation de ces technologies vis à vis du grand public.

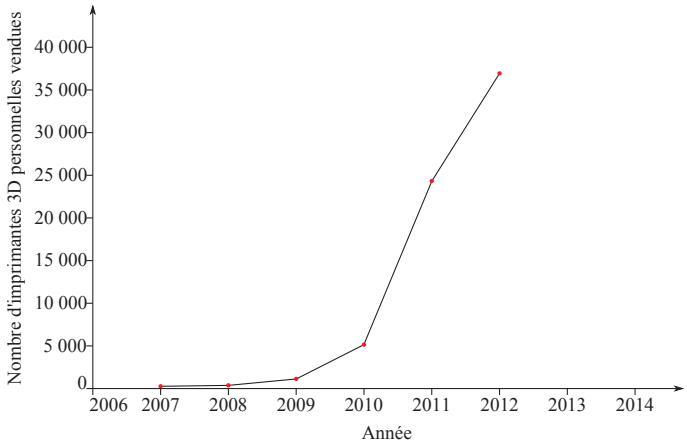


Figure 1.4 – Évolution des ventes d'imprimantes 3D personnelles depuis 2007 [Wohlers2013]

Dans le récent rapport Wohlers Report 2013 [Wohlers2013], Phil Reeves, directeur général de Econolyst Ltd. [Reeves2014], qui s'intéresse plus particulièrement aux aspects économiques et environnementaux de la fabrication additive, s'interroge sur les impacts environnementaux provoqués par les imprimantes 3D dans les prochaines années. En effet, une utilisation non raisonnée de ces machines peut conduire à des problèmes environnementaux importants tel que l'utilisation massive de matière première plastique sans réel objectif. Néanmoins, c'est en sensibilisant le grand public au concept de fabrication par ajout de matière que les procédés plus industriels pourront émerger.

En France, cette sensibilisation des futurs ingénieurs de nos sociétés à ces procédés et à la conception adaptée à la fabrication additive a lieu dès leur baccalauréat. Par exemple, pour le baccalauréat STI2D (Sciences et Technologies Industrielles et du Développement Durable), les connaissances associées à la fabrication additive (Connaissance 3 : Prototypage de pièces) sont abordées au travers diverses compétences de la spécialité ITEC (Innovation Technologique et Eco-Conception). En ce qui concerne le baccalauréat général SSI, ces notions peuvent être abordées lors de la réalisation du prototype du projet de terminale. De ce fait, on voit apparaître de plus en plus de machines d'impression 3D dans les lycées français.

1.3 Description des technologies de fabrication

Comme nous avons pu l'évoquer précédemment, le procédé de fabrication par ajout de matière peut être divisé en différentes technologies. La norme française NF E 67-001 [ISO2011] distingue neuf technologies de fabrication par ajout de matières associées aux matériaux fabricables comme le résume le tableau 1.1.

Procédé	**Matériau**			
	Plastique		Métal	Céramique
	Thermoplastique	Thermodurcissable		
Fabrication par stratification	X		X	
Dépôt de fils fondus	X			
Frittage avec masque	X		X	X
Frittage laser	X		X	X
Fusion laser	X		X	X
Fusion par faisceau d'électrons			X	X
Impression 3D	X		X	X
Fabrication par rechargement laser			X	X
Photo-polymérisation (Stéréolitographie)		X		

Tableau 1.1 – Technologie de fabrication par ajout de matière [ISO2011]

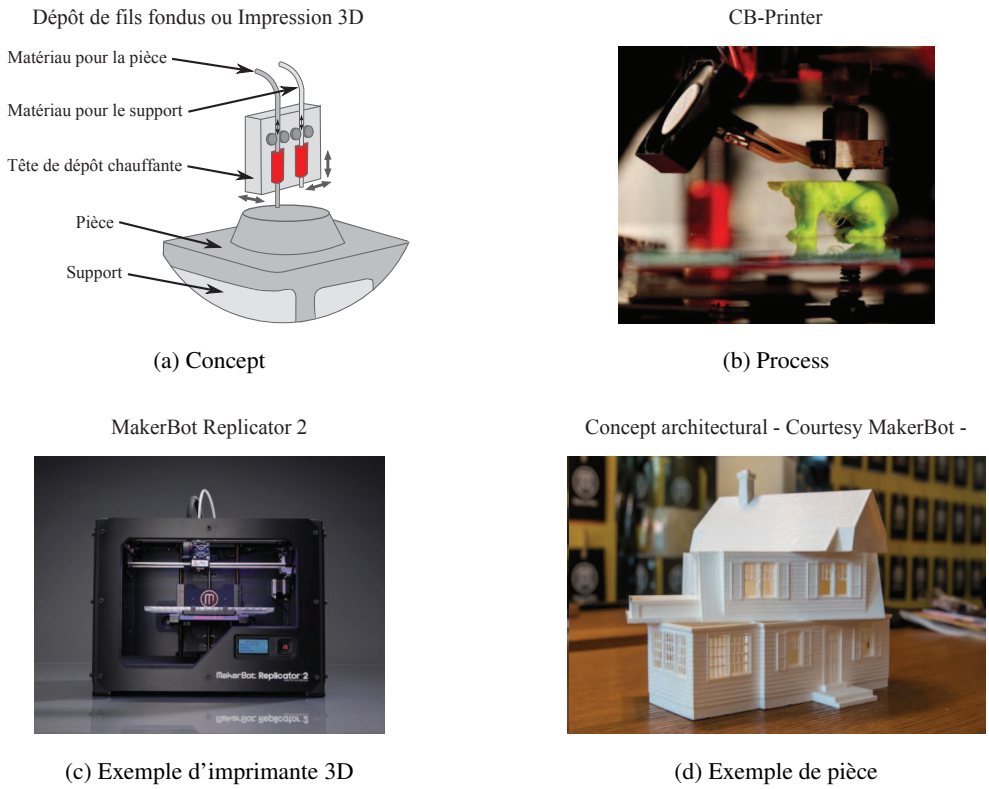
À partir du tableau 1.1, on peut classer les technologies de fabrication par ajout de matière en trois familles distinctes. La connaissance fine de ces technologies est nécessaire afin d'en évaluer

la performance environnementale. Nous allons donc décrire de façon détaillée ces technologies par la suite. Les trois grandes familles associées au procédé de fabrication par ajout de matière sont le **dépôt de fils fondus**, métalliques ou plastiques - dans laquelle on retrouve l'impression 3D) - le **lit de poudres** - regroupant les technologies de fusion sélective par laser ou par faisceau d'électrons - et pour finir la technologie de **projection de poudres**. La distinction de ces familles de procédés se fait selon les différences suivantes :

- **état de la matière première** : en poudre ou en fil,
- **direction de fabrication** : orthogonale au substrat (ou support) ou libre dans l'espace.

1.3.1 Technologie : dépôt de fils fondus

La figure 1.5 permet de comprendre le fonctionnement de cette technologie. Cette dernière consiste à fabriquer une pièce en 3 dimensions en acheminant, au moyen d'un système d'extrusion et de chauffe, un fil de matière qui sera ainsi rendu malléable. Cette matière est ensuite déposée continument fil après fil. Cette technologie nécessite parfois l'utilisation de supports afin de réaliser des formes complexes. Ce support, sorte d'échafaudage de matière, est fabriqué soit à partir de matériaux solubles que l'on pourra enlever par la suite à l'aide de produits de dissolution (exemple de la machine Mojo de chez Stratasys) ou directement à partir du matériau



(a) Concept (b) Process

(c) Exemple d'imprimante 3D (d) Exemple de pièce

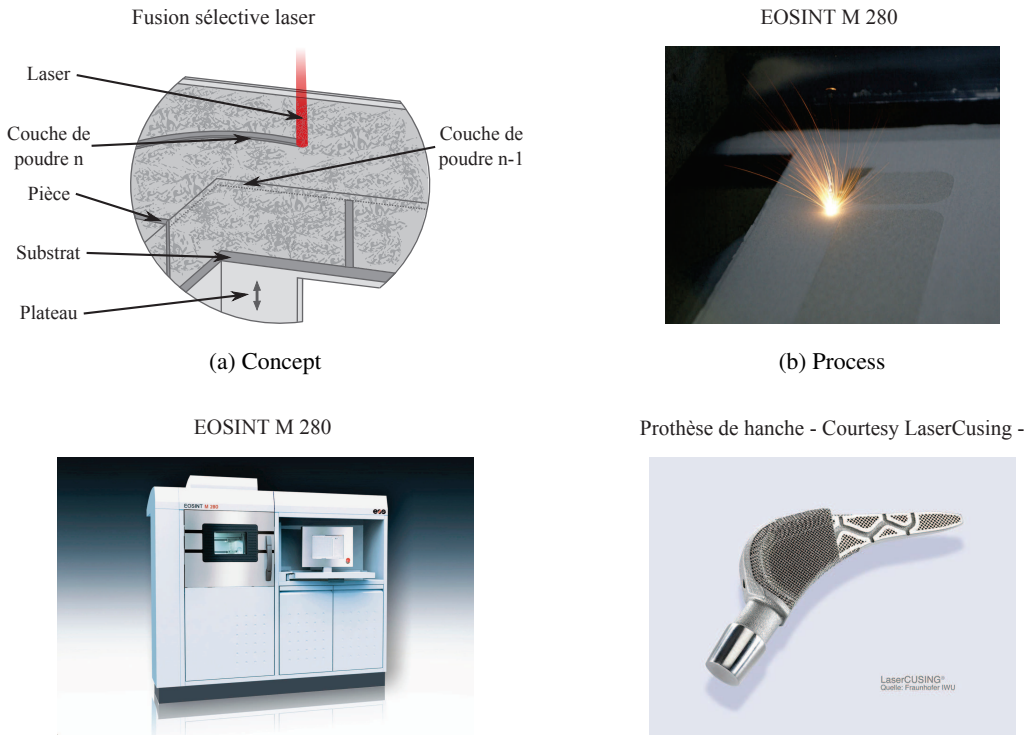
Figure 1.5 – Technologie de dépôt de fils fondus ou impression 3D

de la pièce. Pour ce dernier point, on construit alors un échafaudage de matière autour de la pièce finale dont les résistances mécaniques sont suffisantes pour supporter un fil de matière. Ce support sera retiré manuellement par la suite.

Il est aussi possible de mettre en parallèle, sur la même machine, deux têtes de dépôt de fil et d'associer à chacune de ces têtes un fil de matière différente. Ceci permet d'utiliser soit une tête pour la matière de la pièce et l'autre pour la matière support, soit une tête avec un matériau A et l'autre avec un matériau B afin de réaliser des pièces bi-matériaux. La matière utilisée peut être plastique ou métallique. C'est sur cette base que l'impression 3D s'est développée. Actuellement cette technologie ne permet de fabriquer des pièces que dans une seule direction de fabrication (orthogonale au substrat).

1.3.2 Technologie : lit de poudres

Cette technologie consiste en l'agglomération de poudres par fusion à partir d'une source laser ou d'un faisceau d'électrons. Cette source d'énergie parcourt la surface d'un lit de poudres comme le montre la figure 1.6b. Dans un premier temps, il est donc nécessaire de trancher le modèle numérique de la pièce souhaitée en fines couches comme avait pu le faire Blanther en 1892. La pièce est ensuite construite en faisant successivement translater le plateau vers le bas



(a) Concept

(b) Process

(c) Exemple de machine

(d) Exemple de pièce

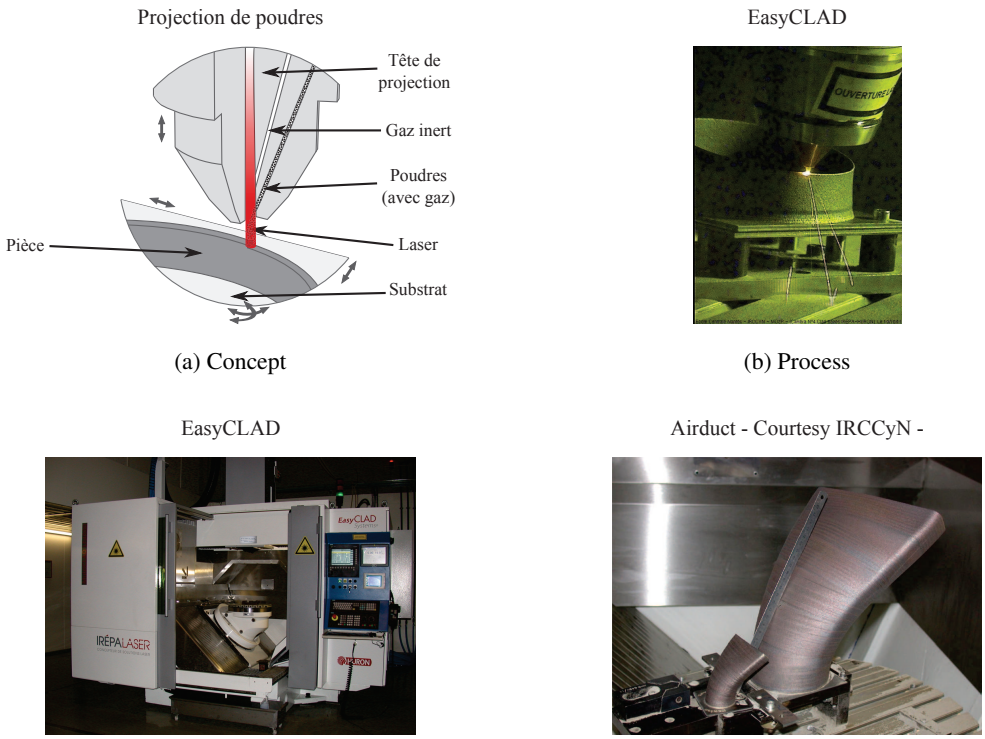
Figure 1.6 – Technologie de fusion sélective par laser

puis fusionner la fine épaisseur de poudres déposées. Cette fine épaisseur de matière est obtenue par un dispositif racleur qui vient déposer chaque nouvelle couche de poudres sur la couche précédemment fusionnée.

Tout comme la technologie précédente, la direction de fabrication est imposée par la structure de la machine, c'est à dire orthogonale au lit de poudres. De plus l'utilisation de différentes poudres permettant de fabriquer des pièces multi-matériaux est impossible avec ce type de technologie. Comme on peut le voir sur la figure 1.6a, la couche de poudre inférieure peut servir de support à la couche supérieure. Il n'est donc pas utile d'utiliser de matière support pour cette technologie.

1.3.3 Technologie : projection de poudres

Cette dernière famille de technologie, basée sur la technologie du rechargement laser, utilise la structure des machines-outils déjà existante. Sur ces machines-outils 3 ou 5 axes, une tête de dépôt de poudres est ajoutée. Cette tête de dépôt permet de projeter de la poudre au point focal d'une source d'énergie. Cette source d'énergie peut être soit une source laser, soit un faisceau d'électrons. La figure 1.7 illustre cette typologie de procédé.



(a) Concept (b) Process

(c) Exemple de machine (d) Exemple de pièce

Figure 1.7 – Technologie de projection de poudres

Cette technologie, récente [Lewis1998], offre de nouvelles possibilités aux concepteurs à la fois en termes de forme mais aussi de matériaux. En effet, la direction de fabrication n'est pas figée orthogonale au support ce qui permet d'obtenir des formes extérieures plus complexes. De plus l'utilisation des cinq axes, en positionnement continu, lors de la projection de poudres permet une meilleure cohésion des couches entres elles. Cette technologie permet aussi de fabriquer des pièces multi-matériaux. En effet, dans le flux de poudres sortant de la tête de projection, il est possible d'injecter différents matériaux comme a pu le montrer Pierre Muller dans ses travaux de thèse [**?**].

1.4 Avantages et applications

L'ensemble des trois technologies (dépôt de fils fondus, lit de poudres et projection de poudres) présentées précédemment permettent de produire trois types de pièces.

- Les pièces prototypes qui permettent de valider des concepts ou des conceptions, fabriquées en majorité à partir des technologies par dépôt de fils fondus ou stéréolitographie (qui s'apparente à la technologie lit de poudres.
- Les pièces mécaniques fonctionnelles produites à partir des technologies par projection de poudres ou lit de poudres. La fabrication de pièces mécaniques fonctionnelles demeure récente comparée à la production de prototype [Wohlers2013].
- Les pièces modèles pour la fonderie ou les pièces d'outillages pour l'injection. En ce qui concerne cette dernière catégorie de pièces, la fabrication additive permet d'améliorer les performances (environnementales ou techniques) des outils en permettant la fabrication de canaux conformes dans les moules d'injection [Morrow2007] ou en augmentant la complexité des modèles, et de ce fait des pièces, produites par fonderie.

La figure 1.8 illustre l'ensemble des domaines d'applications utilisant la fabrication additive.

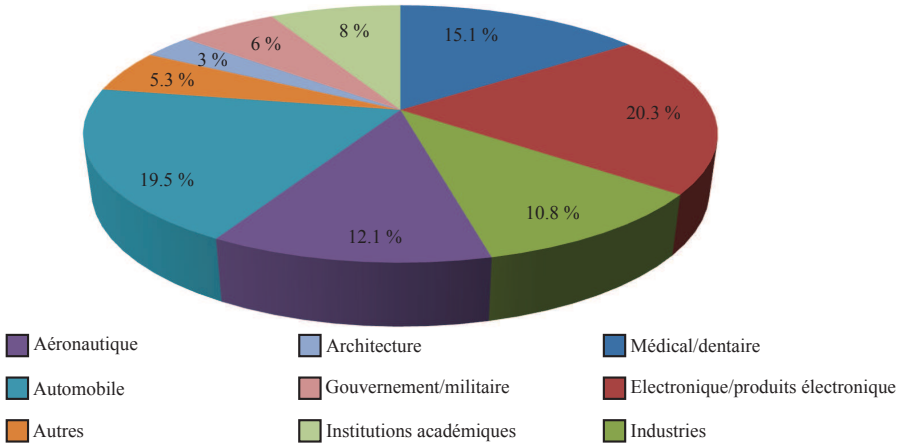
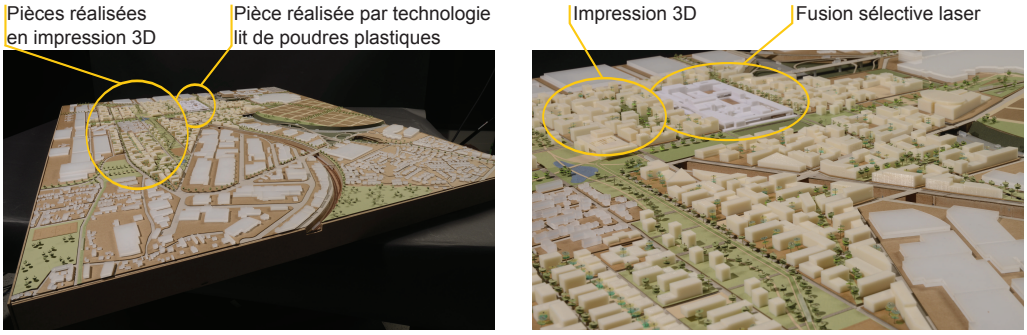


Figure 1.8 – Part relative d'utilisation de la fabrication additive par domaine [Wohlers2013]

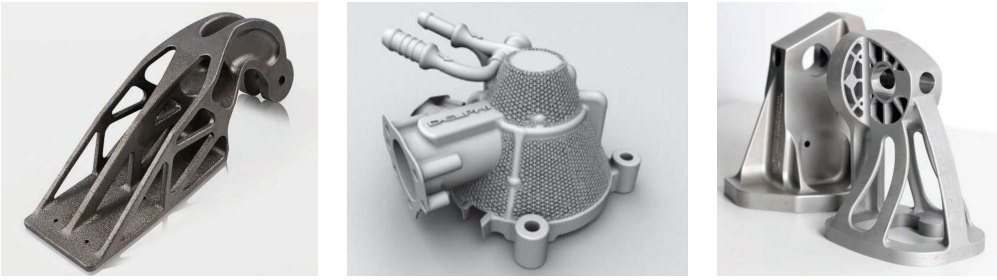
Ces technologies permettent de couvrir un large spectre de domaines d'applications allant de l'architecture (Figure 1.9) - où il est possible de valider des concepts architecturaux en fabricant des prototypes - aux domaines aéronautique (Figure 1.10) et médical, où ici on parle de pièces mécaniques fonctionnelles.



(a) Vue d'ensemble du projet d'architecture

(b) Zoom sur le projet d'architecture

Figure 1.9 – Projet d'architecture sur la réhabilitation d'une ZAC en région parisienne réalisé en partie par fabrication additive (Imprimante 3D Mojo de chez Stratasys et machine de fusion sélective laser ZPrinter® 650 de chez 3DSystems) [Chauvidon2013]



(a) Charnière de frein de l'Airbus A380

(b) Echangeur thermique Delphi

(c) Prototype de pièce aéronautique de l'Airbus A380

Figure 1.10 – Exemples d'optimisations de conceptions orientées fabrication additive

1.4.1 De nouvelles possibilités de conception

La fabrication par ajout de matière fut longtemps utilisée dans le but de copier des pièces, de conceptions figées, initialement réalisées via des procédés plus conventionnels. Or cette utilisation ne permet pas de mettre en avant les possibilités qui lui sont propres. En effet, la fabrication additive permet de concevoir des pièces aux formes complexes permettant d'intégrer un maximum de fonctions au sein de celles-ci [Hopkinson2006]. Les technologies associées à ce procédé de fabrication offrent de certaines possibilités de conception qui ne sont pas envisageables autrement. Un certain nombre de contraintes de fabrication - telles que l'accessibilité des outils

pour l'usinage, les angles de dépouilles pour la fonderie ou l'injection - sont supprimées grâce à ces technologies. Les figures 1.10a et 1.10c permettent de mettre en avant ces remarques. Sur ces figures, la conception des pièces a été optimisée pour y intégrer les possibilités offertes par la fabrication additive. Dans le cas de l'aéronautique, ces avantages permettent à la fois un allègement des pièces fabriquées [Reeves2008a, Reeves2009] mais aussi l'utilisation de matériaux plus légers (tels que le titane ou l'inconel 718) mais qui étaient jusque là très complexes à mettre en oeuvre.

La figure 1.10b représente une autre des possibilités, en terme de conception optimisée, qu'offre la fabrication additive. Sur cette figure l'ensemble de la structure externe est réalisée en nid d'abeille. Cela permet de diminuer la quantité de matière utilisée et ainsi, la masse de l'objet. Cette structure, suffisamment résistante, est souvent utilisée en fabrication additive. Un grand nombre d'études sont menées afin de déterminer la résistance mécanique de ces structures en fonction de la forme du nid d'abeille et des porosités présentent [Sudarmadji2011]. La prise en compte des possibilités de conception qu'offre la fabrication additive, et de ce fait la proposition d'outils adaptés et de méthodologie de conception orientée fabrication additive [**?**], est nécessaire pour que ces procédés s'implantent durablement dans le monde industriel. Il est temps de passer de la simple copie de pièce au concept de conception adaptée à la fabrication additive (DFAM : design for additive manufacturing).

De plus, si l'on effectue une étude d'analyse du cycle de vie d'une pièce produite par fabrication additive, l'ensemble des étapes du cycle de vie seront affectées. Les différences de conception auront forcément des impacts sur les phases de transport et d'utilisation du produit. Une telle pièce pourra, par exemple, être optimisée d'un point de vue masse ce qui aura de forts impacts sur la phase d'usage pour une pièce qui sera utilisée en aéronautique. Ces remarques ont fait l'objet d'un projet financé en partie par le gouvernement anglais appelé projet Atkins [Hague2007]. L'objectif de ce projet était d'investiguer l'ensemble des avantages économiques et environnementaux de la fabrication additive.

Pour finir, en terme de santé publique, la fabrication additive pourrait contribuer à une avancée majeure. En effet, les possibilités de conception n'étant pas figées, il est envisageable que la fabrication de pièces médicales unitaires, telles que des prothèses (Figure 1.11) ou des implants, pourrait alors être adaptée à la morphologie de chaque patient qui bénéficierait alors d'une prothèse unique [Singare2004, He2005, He2006, Huang2012, Popov2009].

2 Aspects environnementaux

2.1 Contexte

Avant de parler d'impact environnemental, il est important de re-contextualiser les enjeux qui y sont associés. En effet, la quantification des impacts environnementaux répond à une problématique plus générale de développement durable. Ce terme, a été défini pour la première fois en 1987 dans le rapport "Notre futur à tous" de Gro Harlem Brundtland [Brundtland1987]

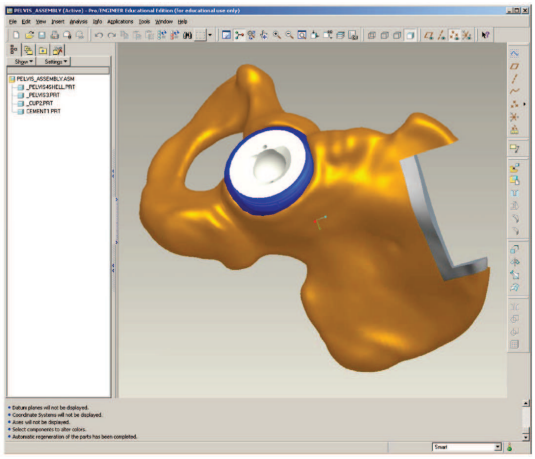


Figure 1.11 – Assemblage virtuel montrant l'intégration de la rotule artificielle réalisée en fabrication rapide dans le modèle 3D de l'os pelvien [Popov2009]

pour la commission mondiale sur l'environnement et le développement. Une des définitions que l'on peut retenir du rapport de Brundtland pour le développement durable est la suivante : le développement durable est un développement qui doit "répondre aux besoins du présent sans compromettre la possibilité, pour les générations à venir, de pouvoir répondre à leur propres besoins". À la suite de ce rapport, c'est en 1992 lors du Sommet de la Terre à Rio de Janeiro qu'un certain nombre d'actions ont été proposées (signature de plusieurs textes par 178 états, signature de la convention sur la biodiversité ou sur le climat par exemple). Lors de ce Sommet, un programme d'actions, signé par 173 chefs d'État, a aussi été proposé, l'Agenda 21, définissant un certain nombre d'actions à mener pour le XXIe siècle. L'objectif de cet agenda est de mener des actions globales suivants les trois piliers définissant le développement durable : piliers social, économique et environnemental (Figure 1.12).

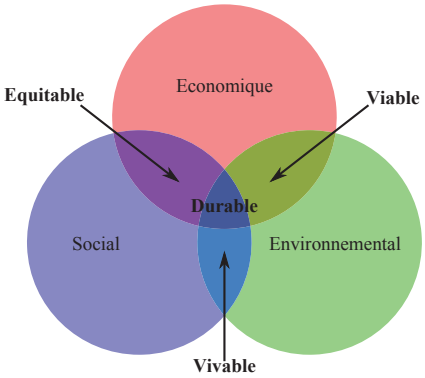


Figure 1.12 – Concept du développement durable

La figure 1.12 représente les trois piliers définissant ce qu'est un développement durable. Des études sont menées afin de définir ce qu'est un développement socialement durable [Ballet2004, Dubois2002]. De même, l'aspect économique fait l'objet d'études afin de déterminer des indicateurs financiers d'un développement durable [De Backer2005]. Associés à ces études, des outils permettant de quantifier l'impact social, l'impact économique et l'impact environnemental d'un produit, d'un process ou même d'une société sont développés. L'**Analyse Sociale du Cycle de Vie** (ASCV) est un outil qui permet d'étudier l'impact social d'un processus sur les sept catégories suivantes : le droit des personnes, les conditions de travail, la santé et la sécurité, l'héritage culturel, la gouvernance, les répercussions socio-économiques, la valeur et les impacts du produit. De même, l'analyse du **Coût** (économique) **du Cycle de Vie** (CCV) est un outil qui permet d'étudier l'impact économique d'un processus sur son coût de fonctionnement et son coût d'investissement.

En ce qui concerne les aspects environnementaux, il est aussi nécessaire de proposer des outils permettant d'analyser les impacts environnementaux d'un processus. Il en existe de différentes natures, soit quantitatifs, soit qualitatifs. On peut citer les outils suivants :

- le bilan carbone, outil développé par Jancovici Jean-Marc pour le compte de l'ADEME [Jancovici2009],
- l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) [ISO2006],
- le design for environment (DFE) [Hopkinson2006].

Les deux premiers exemples cités sont des outils permettant de quantifier les impacts environnementaux, tandis que le troisième exemple est une méthodologie non-quantitative permettant de prendre en compte l'environnement dans la phase de conception. Dans le cadre de nos travaux il nous a semblé essentiel d'utiliser un outil normalisé permettant la quantification des impacts environnementaux, d'où une approche de type **Analyse du Cycle de Vie**.

2.2 Analyse du cycle de vie

Lorsque l'on s'intéresse aux impacts environnementaux, l'une des façon les plus courantes d'évaluer ces impacts est l'Analyse du Cycle de Vie (Life Cycle Assessment). En effet, cet outil a été normalisé suivant la norme ISO 14040 [ISO1997] mise à jour en 2006 [ISO2006] ce qui en fait, de nos jours, l'outil le plus utilisé dans le monde. La méthodologie associée à cet outil couple une approche multi-critères et multi-étapes (depuis l'extraction des matières premières à la fin de vie des produits). De plus, une des forces de cet outil est qu'il s'intéresse à la fonction du produit et non pas uniquement au produit ce qui permet de comparer des produits de même fonction entre eux. La normalisation de cet outil a été réalisée par deux organismes mondiaux, le SETAC - Society of Environmental Toxicology and Chemistry - et le PNUE - Programme des Nations Unies pour l'Environnement - qui proposent une décomposition en quatre étapes de l'analyse du cycle de vie :

- la définition des objectifs et des limites de l'étude,

- l'inventaire des émissions et extractions du produit considéré,
- l'analyse de l'impact environnemental,
- et l'interprétation des résultats.

L'ensemble de ces quatre étapes seront présentées dans la suite de ce manuscrit.

La figure 1.13 retrace l'évolution des travaux (utilisations, publications, normalisations) menés sur l'ACV. Le concept d'analyse sur cycle de vie fut employé pour la première fois par l'entreprise Coca-Cola en 1969. Cette étude avait pour objectif de faire un choix de contenant (bouteille en verre ou bouteille en plastique) pour leur boissons. En 1990, l'entreprise PRé Consultants a développé le premier logiciel permettant de réaliser des ACV. Le projet NOH a permis de réunir en 1991 un certain nombre d'acteurs autour d'un projet commun autour de l'ACV. En 1996, le premier journal international scientifique publiant des études autour de l'ACV fût édité. Ce journal est toujours publié. Par la suite, la méthode d'ACV fût normalisée.

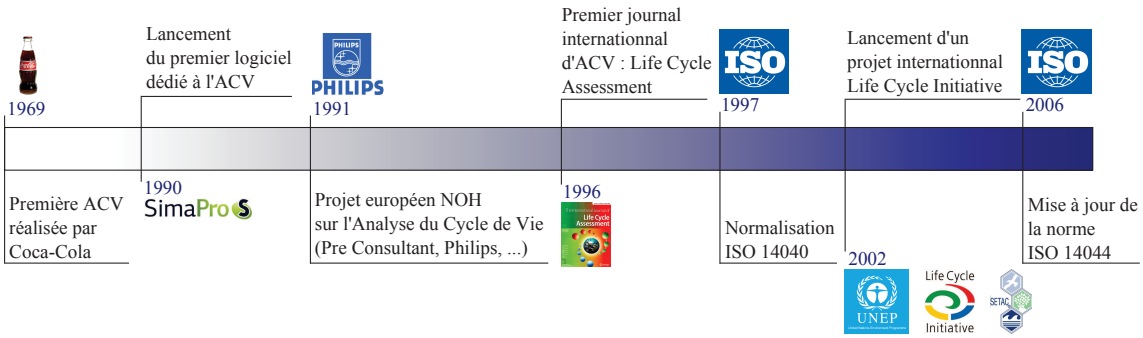


Figure 1.13 – Développement de l'outil d'Analyse de Cycle de Vie

2.2.1 Définition des objectifs

Cette première étape dans une ACV permet de poser le problème, de définir les limites de l'étude et les objectifs de l'étude. Les scénarios de la vie du produit y sont aussi définis. Cette étape est cruciale pour la suite. Beaucoup d'études, dans lesquelles cette étape ne fut pas clairement établie, ont conduit à des conclusions faussées. 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".

2.2.2 Inventaire des émissions et extractions

Cette étape permet de comptabiliser les émissions polluantes dans l'air, l'eau et le sol ainsi que les extractions de matières premières renouvelables et non renouvelables ainsi que l'utilisation des sols. Par exemple, pour un système de production il faudra comptabiliser l'énergie, la matière

première 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.

2.2.3 Analyse 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. Cette méthode de quantification appuyée par des bases de données de facteurs de caractérisation permet de traduire les émissions en substance de base de chaque catégorie d'impact. Il existe un grand nombre de méthodes de quantification.

L'étude menée par Carvalho et al. [Carvalho2014] a dénombré vingt-cinq méthodes de quantifications des impacts environnementaux. La distinction entre ces méthodes se fait à la fois sur le nombre de catégories d'impacts pris en compte (eutrophisation, acidification, émission de gaz à effet de serres, etc.) mais aussi sur l'orientation de celles-ci qui peuvent être orientées problèmes ou dommages.

Dans les méthodes orientées problèmes, on va catégoriser les impacts de premiers ordres par exemple on parle d'émission des CFC, de substances cancérigènes, d'eutrophisation ou de consommation d'énergie non renouvelable. Les méthodes orientées dommages vont quant à elles plus loin dans la chaîne de cause à effet qui lie les émissions aux impacts environnementaux par rapport aux méthodes orientées problèmes. On va s'attacher dans les méthodes orientées dommages à regrouper les impacts environnementaux précédemment cités selon leurs effets sur la santé humaine, sur le changement climatique ou sur l'écosystème par exemple. La finalité de ces méthodes est souvent un indice unique permettant d'afficher un impact environnemental contenant l'ensemble des impacts environnementaux occasionnés.

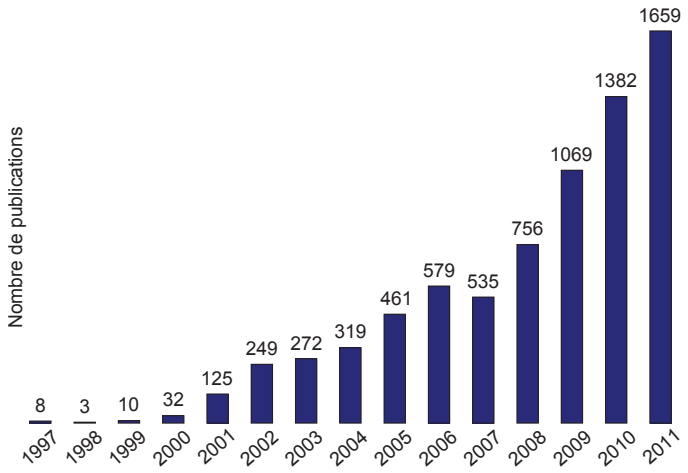


Figure 1.14 – Nombre de publications utilisant des méthodes de quantifications environnementales depuis 1997 [Carvalho2014]

La figure 1.14 issue de l'étude de Carvalho permet de montrer l'augmentation du nombre de publications (articles scientifiques) utilisant une méthode de quantification environnementale (quelle qu'elle soit). Cela permet de montrer l'intérêt que porte la communauté internationale aux enjeux environnementaux.

La figure 1.15 illustre le nombre de publications par méthodes depuis 1997. Sur cette figure on peut s'apercevoir que la méthode orientée dommage, Eco-Indicator est la seconde méthode la plus utilisée après la méthode (IPCC 2007) développée par l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) qui n'est pas représentée. Cette dernière méthode comptabilise plus de 2922 publications depuis 2007 pour l'IPCC 2007 et 5533 publications depuis 1997 pour l'ensemble des méthodes IPCC. Cette méthode de quantification, développée par le GIEC, ne s'intéresse qu'au réchauffement climatique.

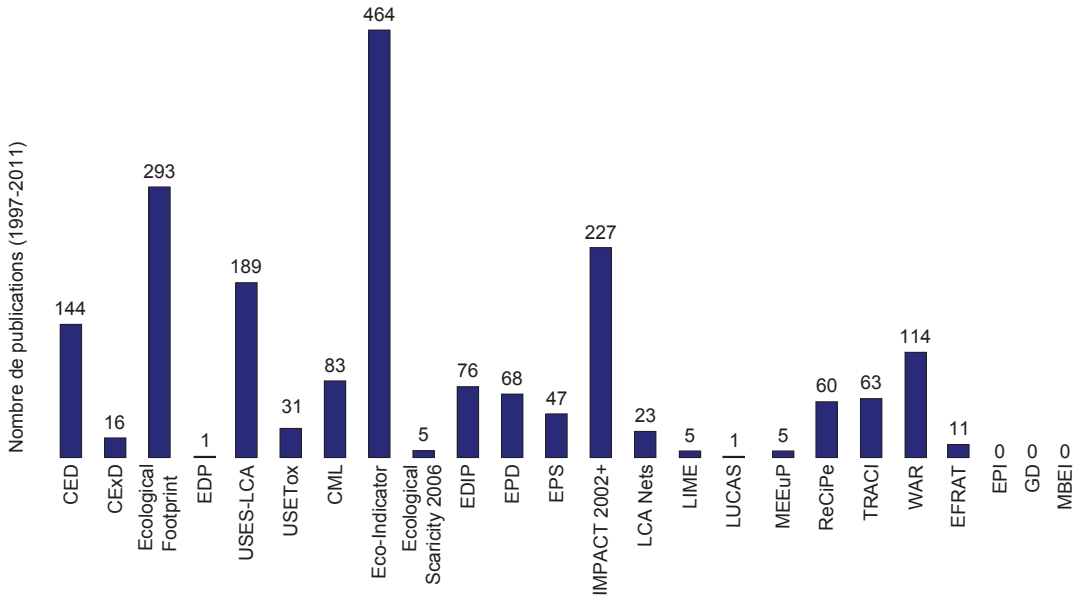


Figure 1.15 – Nombre de publications par méthodes [Carvalho2014]

2.2.4 Interprétation des résultats

Cette dernière étape de l'ACV consiste à interpréter les résultats obtenus. Cette étape est souvent confiée à des experts extérieurs 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 de l'étude) ne sont pas trop restreintes ce qui peut dans certains cas avantager l'auteur de l'ACV.

2.3 Synthèse

La figure 1.16 résume le concept d'analyse sur cycle de vie. Cette figure montre l'importance de s'intéresser à l'ensemble des étapes du cycle de vie d'un produit afin d'en évaluer l'impact

environnemental. L'expertise - et la connaissance fine - associée à chacune des étapes permet de réaliser l'inventaire des flux les traversant. Cet inventaire est ensuite traduit en impact environnemental en utilisant des méthodes de quantification environnemental (Eco-Indicator 99 par exemple).

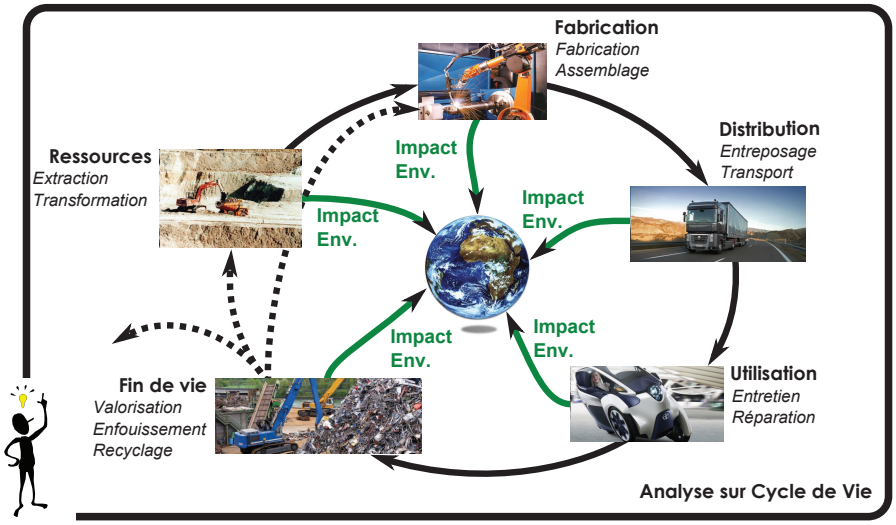


Figure 1.16 – Étapes de l'Analyse de Cycle de Vie d'un produit

Dans la suite de ce manuscrit, notre expertise nous permettra de nous concentrer sur la phase de fabrication. Ces travaux permettront d'alimenter les bases de données associées à l'étape de fabrication qui sont encore assez pauvres à ce jour. Pourtant, la part relative des impacts environnementaux associés à cette phase de vie du produit peut être importante dans le cas de produits dit "passifs" (stylos, prothèses par exemple) dont les impacts en phase d'utilisation sont faibles. Néanmoins, il est important de souligner que les impacts environnementaux dus à la phase de production sont très faibles dans le cas de produits dit "actifs" pour lesquels la phase d'utilisation est très impactante (voitures, ordinateurs, pièces aéronautiques par exemple).

3 Prise en compte des aspects environnementaux en phase de fabrication

3.1 Contexte

De nos jours, les entreprises manufacturières sont de plus en plus nombreuses à considérer le développement durable comme un enjeu stratégique [FM22012]. Dans ce sens, le magazine "Le Journal de la Production" a consacré un dossier spécial sur les pratiques des entreprises qui minimisent leur impacts environnementaux [LJP2012]. La connaissance du niveau de performance environnementale et la démarche d'amélioration continue de cette performance sont les deux piliers de la récente norme de management environnemental (ISO 14 044). De plus, il est

nécessaire de souligner que l'amélioration continue dans le cadre de la minimisation des impacts environnementaux n'est pas incompatible avec une augmentation des gains économiques [Deviese2012]. Si des démarches d'éco-conception de produits et d'analyse de cycle de vie sont en plein développement à l'heure actuelle, il n'en est pas de même pour ce qui concerne les procédés de fabrication. Pourtant, la mise en forme de produits est une activité consommatrice d'énergie, de matières et de consommables, et une évaluation quantitative de l'impact sur l'environnement de la fabrication de pièces est nécessaire pour améliorer la connaissance de la performance environnementale d'une entreprise.

3.2 La performance environnementale des procédés de fabrication

La performance des procédés de fabrication est souvent orientée uniquement sur des aspects énergétiques. Dans le magazine "Fonderie magazine", la fonderie de Sept Fons a d'ailleurs publié une étude sur l'optimisation de la consommation d'énergie de leur installation [Mandet2013]. On retrouve un grand nombre d'études qui s'attachent à définir des paramètres de fabrication optimum afin de minimiser la consommation énergétique d'un procédé [Newman2012, Hanafi2012, Camposeco-Negrete2013]. 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. En usinage, la consommation de fluides de coupe ou la production de copeaux sont des sources d'impacts non-négligeables. Le magazine "Machines production" publie régulièrement des numéros s'intéressant à la diminution des impacts environnementaux associés aux fluides de coupe contenant en particulier de l'acide borique [MP2013, Quaker2012]. La consommation d'eau dans ces procédés de fabrication doit aussi être prise en compte car elle contribue aussi à l'impact environnemental global [Zhao2012]. Pour finir, la connaissance des déchets rejetés lors de la production est une donnée importante. Dans le magazine "Fonderie magazine" on retrouve une étude s'intéressant aux émissions de composés organiques volatils (COV) à la coulé, en fonderie [Torralba2013].

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. L'initiative européenne CO2PE ! illustrée par la figure 1.17 développée à l'Université Catholique de Louvain [Kellens2011a] permet de prendre en compte l'ensemble des flux consommés en phase de production. Cette méthodologie sera analysée en détail et discutée dans le chapitre suivant.

Les méthodes employées pour caractériser les procédés de fabrication sont assez pauvres en données. Généralement, on se contente d'une caractérisation, parfois trop générale, s'intéressant uniquement à la consommation d'énergie électrique du process. Ces caractérisations se retrouvent alors dans les bases de données utilisées en ACV. En effet, lorsque l'on définit un procédé de fabrication dans un logiciel d'ACV ce dernier ne propose qu'une caractérisation générale du procédé (sans forcément se soucier du type de machine), ce qui peut conduire à des erreurs de l'ordre de 100 % entre la consommation estimée par le logiciel et la consommation réelle [Avram2010]. De plus, généralement, aucune donnée n'est fournie quant à la consommation de fluides ou autres.

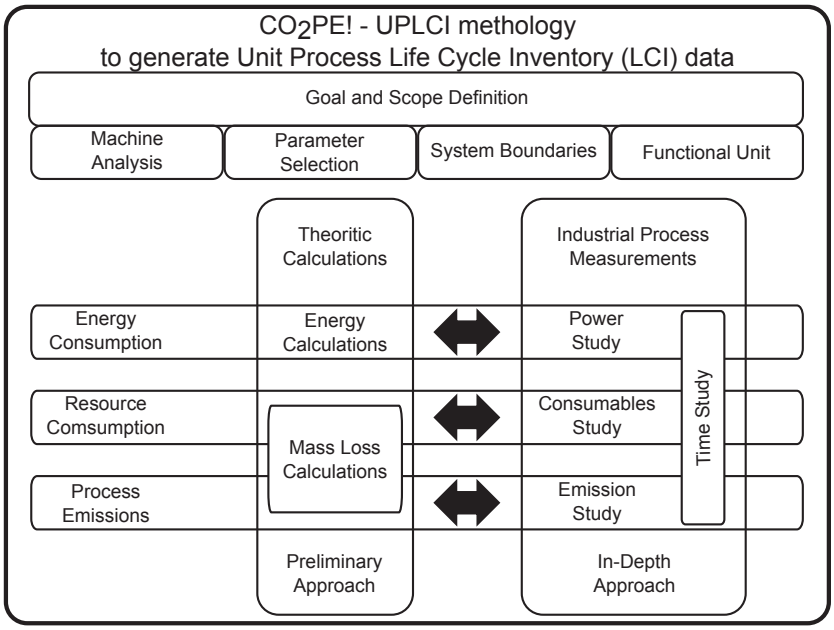


Figure 1.17 – Méthodologie UPLCI associée à l'initiative CO2PE ! [Kellens2011a]

3.3 L'avenir de la fabrication additive dans un contexte de performance environnementale

Les procédés de fabrication par ajout de matière (projection de poudres, lit de poudres, dépôt de fils fondus) sont actuellement considérés comme des technologies matures promises à un grand avenir. De nombreux travaux ont été menés sur ces procédés ces dernières années afin d'en montrer les possibilités et les limites.

L'acceptation technique de ces procédés est maintenant acquise même si des méthodes de conception adaptées à ces procédés doivent encore être développées afin de bénéficier de l'ensemble des avantages qu'ils offrent. Rémi Ponche a développé dans ses travaux de thèse une méthodologie permettant de prendre en compte les possibilités de ces procédés afin de proposer des conceptions adaptées à la fabrication additive [Ponche2013]. Cependant, l'acceptation sociale ne pourra se faire que si ces technologies peuvent être considérées comme "propres". Il devient alors nécessaire de connaître l'impact environnemental de ces procédés.

Ces dernières années, quelques d'études ont été menées afin de déterminer la consommation électrique des procédés de fabrication additive pour les comparer aux procédés traditionnels. Nous avons synthétisé [Le Bourhis2013] ces études dans un tableau que nous présenterons dans le chapitre 3.

Les études menées sur la consommation énergétique des procédés de fabrication par ajout de matière sont intéressantes car elle permettent de lever certains verrous tel que l'influence de l'orientation de fabrication sur la consommation énergétique de la machine. En effet, le temps

de fabrication, donc l'énergie consommée, dépend fortement du nombre de couches à fabriquer. Plus la dimension qui se trouve dans l'axe de fabrication est importante plus la machine consommera d'énergie [Mognol2006]. De plus, on peut remarquer qu'il n'y a pas de relation linéaire entre le nombre de pièces à fabriquer dans l'espace machine et la consommation énergétique [Baumers2011].

Néanmoins, les possibilités de conception adaptées à la fabrication additive minimisant par exemple la quantité de matériau utilisée ne sont pas prises en compte dans ces études. De plus, dans le cadre général de l'analyse du cycle de vie, la minimisation de masse (qui est une des possibilités de la fabrication additive) peut avoir un impact environnemental global moins important sur le cycle de vie total. En effet, on peut imaginer qu'une pièce fabriquée par ajout de matière impacte moins en phase d'utilisation ce qui diminue globalement l'impact environnemental de la pièce.

4 Synthèse et plan du manuscrit

L'acceptation de la fabrication additive dans le monde industriel passe nécessairement par une acceptation environnementale de ces procédés. Il est donc nécessaire de proposer des outils et des méthodologies permettant cette évaluation. De plus, les possibilités offertes par ces procédés doivent être prises en compte afin d'évaluer le plus précisément possible l'impact environnemental d'une pièce produite par ajout de matière sur l'ensemble de son cycle de vie.

Ces travaux de thèse ont pour objectif de proposer une méthodologie globale permettant d'évaluer les impacts environnementaux occasionnés par une pièce produite par fabrication additive. La méthodologie prendra en compte l'ensemble des flux consommés lors de la phase de fabrication ainsi que les différentes étapes nécessaires à la fabrication d'une pièce par ajout de matière. Ces prises en compte permettent de suivre la méthode associée à la norme d'ACV. De plus, l'étude du couple pièce-procédé permettra de prendre en compte les possibilités offertes par la fabrication additive.

Le deuxième chapitre sera consacré à la présentation de l'**état de l'art** des différentes méthodes permettant d'évaluer la performance environnementale d'un procédé de fabrication. Dans ce chapitre nous présenterons l'ensemble des méthodes mise en place permettant de minimiser l'impact environnemental des procédés de fabrication soit en minimisant l'énergie électrique consommée, soit en minimisant l'utilisation de consommables.

Dans le troisième chapitre nous présenterons la **méthodologie permettant d'évaluer la performance environnementale des procédés de fabrication par ajout de matière**. Cette méthodologie a été développée en accord avec les verrous scientifiques soulevés dans le chapitre précédent. Elle permet d'évaluer l'impact environnemental du couple pièce-procédé et non pas seulement celui de la machine.

Dans le quatrième chapitre, nous **appliquerons** notre méthodologie d'évaluation **au procédé de fabrication par projection de poudres métalliques**. Afin d'appliquer cette méthodologie nous proposerons une modélisation complète de ce procédé de fabrication. Cette modélisation a été réalisée à partir d'expérimentations et d'équations du comportement de la machine. De plus, l'ensemble des étapes nécessaires à la fabrication de pièces par projection de poudres seront prises en compte.

Le cinquième chapitre de ce manuscrit présentera un **exemple industriel** sur lequel la méthodologie d'évaluation environnementale a été appliquée. Cette exemple permettra de présenter la maquette informatique développée pour évaluer les impacts environnementaux en phase de fabrication.

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

2

État de l'art et problématique scientifique

Sommaire

1	**Avant-propos**	24
2	**Procédés par enlèvement de matière**	24
3	**Procédés par ajout de matière**	40
4	**Intégration dans la chaîne numérique**	54
5	**Synthèse et positionnement de nos travaux de recherche**	56

Le deuxième chapitre de ce manuscrit est consacré à l'analyse de l'**état de l'art** proposé afin de caractériser les procédés de fabrication, en particulier l'usinage et la fabrication additive, d'un point de vue environnemental. Cette première analyse des travaux déjà proposés par la communauté est une étape cruciale pour positionner correctement nos travaux de recherche.

Afin d'analyser les travaux menés sur la performance environnementale des procédés de fabrication, nous nous focaliserons dans une **première partie** sur les **procédés d'usinage** de pièces mécaniques. En effet, le comportement de ces procédés étant bien connu des fabricants, il semble donc intéressant d'analyser les travaux qui ont été menés afin de caractériser ses performances environnementales.

Dans une **deuxième partie** nous nous intéresserons plus **particulièrement aux procédés de fabrication par ajout de matière**. Nous analyserons ainsi l'ensemble des méthodes permettant leurs évaluation environnementale.

La **troisième partie** sera consacrée à l'analyse des études mises en place afin d'intégrer dans la **chaîne numérique**, d'un point de vue informatique, l'analyse environnementale d'un procédé. Cette intégration dans la chaîne numérique est essentielle afin de considérer le couple pièce-procédé.

À la suite de cet état de l'art, nous serons en mesure, dans la quatrième partie, de pointer les verrous scientifiques qui restent à lever. La mise en évidence de ces verrous scientifiques nous permettra ainsi de 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 un procédé qui reste encore "jeune" comparé par exemple au procédé par enlèvement de matière dont les premières machines-outil à vapeur furent développées en 1775. Malgré un développement technologique bien plus avancé, les études s'intéressant aux aspects environnementaux pour les procédés de fabrication sont encore relativement récentes.

Avant d'exposer l'état de l'art des études traitant des aspects environnementaux en phase de fabrication, il est intéressant de mentionner que récemment (2012) un groupe de membres du CIRP (Duflou, Sutherland, Dornfeld, Herrmann, Jeswiet, Kara, Hauschild et Kellens) a proposé une première revue des travaux menés sur la prise en compte de la consommation de ressources énergétiques et matérielles [Duflou2012]. Cette revue intéressante permet d'exposer les méthodes développées afin de minimiser la consommation de ressources mais nous allons détailler plus précisément dans ce chapitre les études se focalisant sur le couple fabrication-environnement.

2 La performance environnementale des procédés de fabrication par enlèvement de matière

Cette première partie permet d'analyser l'ensemble des méthodologies et des outils développés dans le but d'évaluer la performance environnementale d'un procédé de fabrication. Nous allons nous intéresser plus précisément aux procédés de fabrication par enlèvement de matière pour lesquels nous avons plus de recul scientifique et qui est le procédé le plus classiquement utilisé afin de comparer les procédés additifs aux autres procédés de fabrication.

Nous verrons dans un premier temps qu'un grand nombre d'études ont été menées selon une approche mono-critère consistant à évaluer la performance environnementale de ces procédés uniquement d'un point de vue consommation énergétique.

Or, l'étude environnementale d'un procédé de fabrication nécessite une approche multi-critères qui s'intéresse à l'ensemble des flux d'énergies et de matières nécessaires à la mise en forme d'un produit. Dans le cas particulier de l'usinage, l'utilisation de fluide de coupe à un impact non-négligeable sur l'environnement comme a pu le mentionner récemment Jihong Yan [Yan2014]. Nous verrons donc dans un second temps quelles méthodes peuvent être mises en place afin de minimiser l'utilisation de tels fluides.

De même, nous analyserons l'impact dû à l'utilisation de consommables tel que l'eau ou l'air comprimé dans les procédés de fabrication traditionnels.

Pour finir, nous analyserons les méthodologies développées récemment permettant de résoudre le problème environnemental non pas uniquement suivant une approche mono-critère,

visant à minimiser l'énergie électrique consommée ou la consommation de fluide de coupe ou l'utilisation de consommables, mais au contraire utilisant une approche d'optimisation multi-critères visant à réduire globalement l'impact environnemental voire l'impact global dans un contexte de développement durable.

Avant de discuter des études menées sur la détermination de la performance environnementale des procédés de fabrication par enlèvement de matière, il est intéressant de citer l'une des premières étude menée sur l'impact environnemental de ces procédés. En effet, au milieu des années 1990 Munoz et al., de l'Université de Californie (Berkeley), ont proposé une approche analytique et multi-objectifs afin de déterminer l'impact environnemental des procédés d'usinage [Munoz1995]. Dans cette étude, les auteurs ont mis en place une méthodologie prenant en compte à la fois la consommation énergétique du process mais également la consommation de fluide de coupe et la production de déchets (Figure 2.1). L'ensemble de ces consommations est modélisée par des équations mathématiques décrivant par exemple le comportement thermique ou mécanique du procédé. À cette époque, l'utilisation de méthodes de quantification des impacts environnementaux telle que l'Eco-Indicator 95 n'était pas démocratisée. En effet, l'outil d'ACV n'a été normalisé qu'en 1997 (voir Section 2 du Chapitre 1).

Afin de comparer les sources d'impacts entre elles, Munoz a donc utilisé la méthode AHP (Analytical Hierarchy Process [Saaty1988]) permettant d'attribuer une certaine pondération entre chaque source d'impact afin de les comparer.

Cette première étude a été très importante pour la communauté car elle permet d'évaluer de façon globale l'impact environnemental des procédés d'usinage en prenant en compte l'ensemble des flux nécessaires à la fabrication. Par la suite, les études se sont focalisées plus précisément sur des points particuliers tels que la consommation énergétique ou la consommation de fluides laissant de côté l'approche globale.

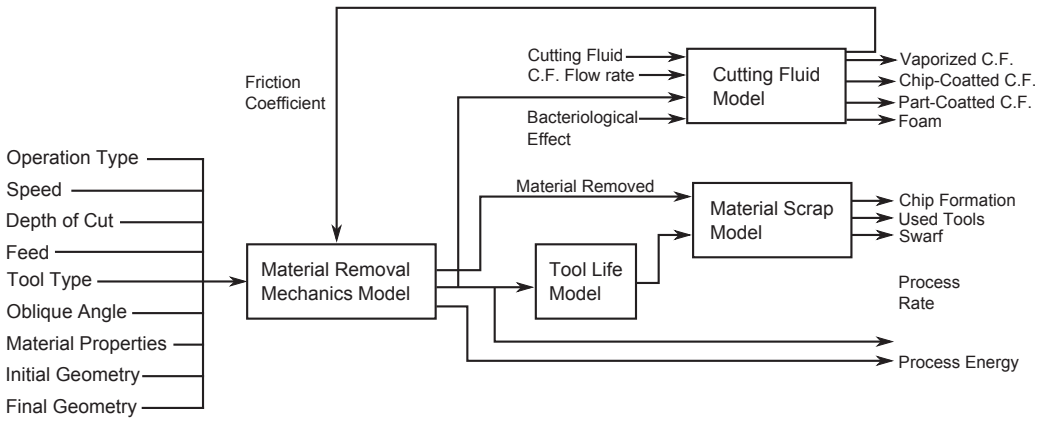


Figure 2.1 – Schématisation du modèle d'usinage [Munoz1995]

2.1 Consommation d'énergie électrique des procédés de fabrication par enlèvement de matières

La consommation d'énergie électrique des procédés de fabrication a été l'objet d'un grand nombre d'études. En effet, cette approche permet de comparer, relativement rapidement, les procédés de fabrication entre eux. Les études prenant en compte la consommation énergétique des procédés de fabrication par enlèvement de matières sont de différents types. On retrouve des études s'intéressant spécifiquement à l'optimisation des paramètres de coupe afin de minimiser la consommation énergétique des machines, approche généralement expérimentale. D'autres études s'intéressent plus particulièrement à la modélisation mathématique, basée sur la théorie de la coupe, du procédé afin d'obtenir des modèles d'évaluation quantitatifs de la consommation des machines. Enfin certaines études proposent une approche de plus haut niveau en s'intéressant à l'état de la machine lors de la fabrication.

Yingjie Zhang a proposé récemment une revue des différentes méthodes utilisées afin de minimiser l'énergie consommée en phase de fabrication [Zhang2013] que nous allons présenter et commenter par la suite.

2.1.1 Les méthodes analytiques liées à la théorie de la coupe

Dans cette première section, nous allons analyser les premières études faites autour de la consommation énergétique des procédés de fabrication. Ces études ont été construites sur le principe de la théorie de la coupe. C'est à dire que ces travaux ont essayé de lier l'énergie mécanique nécessaire à l'arrachement de la matière à l'énergie électrique consommée.

La première étude s'intéressant à la consommation énergétique des machines d'usinage date de 1981 [De Filippi1981]. Dans cette étude De Filippi analyse la consommation énergétique de dix machines-outil à commande numérique (MOCN). Les premières MOCN étant apparues en 1942, on peut considérer que 40 ans plus tard leur fonctionnement était bien contrôlé. Il met alors en avant le fait que la consommation énergétique de la machine est très supérieure à l'énergie nécessaire à la formation du copeau. Cette première étude montre qu'une grande partie de l'énergie consommée par la machine n'est pas dues à la phase d'enlèvement de matière. Il est donc complexe de relier mathématiquement la consommation électrique de la machine à la phase d'enlèvement de matière.

En 2003, Draganescu et al. ont proposé une modélisation par surface de réponses des procédés d'usinage [Draganescu2003]. Dans cette étude, les auteurs modélisent l'énergie consommée en fonction de la puissance de coupe, le débit de copeaux et l'efficacité de la machine (Figure 2.2). Cette méthode d'évaluation est intéressante car elle est indépendante de la mécanique du copeau et considère l'ensemble des paramètres influant la consommation de la machine. Néanmoins, cette méthode nécessite une caractérisation de chaque machine. De plus, elle utilise une modélisation statistique du procédé dont le degré d'incertitude peut être important.

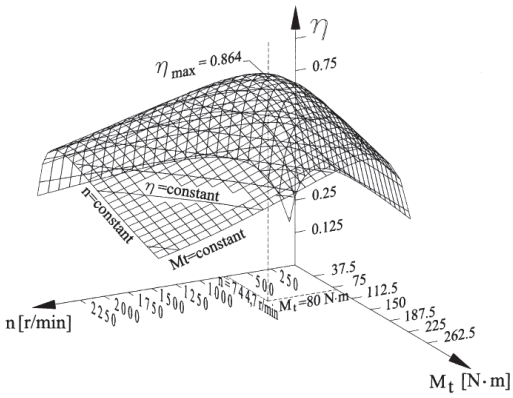


Figure 2.2 – Rendement énergétique d'une machine de fraisage FV-32 exprimé sous forme de surface de réponse [Draganescu2003]

Les travaux cités précédemment mettent en évidence l'importance de prendre en compte différents états de la machine d'usinage à commandes numériques. Gutowski et Dahmus proposent alors une modélisation mathématique de la machine prenant en compte les remarques faites précédemment. Ils distinguent alors trois états de la machine lors de la phase de fabrication - l'état de consommation constante, l'état de consommation hors usinage et l'état de consommation en phase d'usinage - [Dahmus2004, Gutowski2006]. À partir de cet ordonnancement des machines d'usinage il est possible de construire des modèles de consommation énergétique. Le modèle proposé par l'équipe de Dahmus prend en compte deux états de la machine comme le montre l'équation 2.1 : l'état de consommation constante et en phase de fabrication où la consommation est fonction du débit de copeaux enlevés. Ce modèle sera reprit et affiné par Kara et al. [Kara2011] puis par Diaz et al. [Diaz2011, Diaz2012].

$$P = P_0 + k.\nu \tag{2.1}$$

D'où l'équation énergétique suivante :

$$E = (P_0 + k.\nu) * \Delta t \tag{2.2}$$

P, puissance électrique absorbée par la machine lors de la coupe $[W]$,
ν, débit de copeaux $[mm^3.s^{-1}]$,
k, énergie consommée par volume de copeaux enlevés $[J.mm^{-3}]$,
P_0, puissance électrique absorbée constante $[W]$,
E, énergie électrique consommée par la machine durant une période Δt $[J]$,
Δt, période de temps durant laquelle la puissance est absorbée $[s]$.

Suite aux études menées par Gutowski et Dahmus, on peut remarquer que l'énergie nécessaire pour la mise en forme d'une pièce ne représente que 15 à 20 % de l'énergie totale consommée pour les machines à commande numérique actuelles. En effet, une partie de l'énergie est utilisée pour la préparation de l'usinage (positionnement, changement d'outil, mise en rotation de la broche, etc.) ainsi que pour l'état de veille. Le tableau 2.1 issu de l'étude Dahmus et al. montre

l'évolution du profil de consommation énergétique des machines d'usinage. Plus la complexité de la machine augmente plus celle-ci consomme d'énergie lorsqu'elle ne produit pas. Au final, les machines actuelles ont tendance à augmenter considérablement leur consommation énergétique pour un même volume de matière enlevé.

	Production Machining Center (2000)	**Automated Milling Machine (1998)**	**Automated Milling Machine (1998)**	**Manual Milling Machine (1985)**
Energy Breakdown				
Constant start-up operations (idle)	85.2 %	13.2 %	27.0 %	31.6 %
Run-time operations (positioning, loading, etc)	3.5 %	20.2 %	29.4 %	0 % (manual)
Material removal operations (in cut)	11.3 %	65.8 %	48.1 %	69.4 %
Power Requirements				
Constant start-up operations (idle)	166 kW	1.2 kW	3.4 kW	0.7 kW
Run-time operations (positioning, loading, etc)	6.8 kW	1.8 kW	3.1 kW	0 kW
Material removal operations (in cut)	22 kW	5.8 kW	6.0 kW	2.1 kW
Machine Use Scenario				
Arbitrary Number of work hours	1000 hours	1000 hours	1000 hours	1000 hours
Machine uptime	90 %	90 %	90 %	90 %
Machine hours (idle, positioning or in cut)	900 hours	900 hours	900 hours	900 hours
Percentage of machine hours spent idle	10 %	35 %	35 %	65 %
Machine hours spent idle	90 hours	115 hours	115 hours	585 hours
Active machine hours per 1000 work hours	810 hours	585 hours	585 hours	315 hours
Machining Scenario				
Percentage of machine hours spent positioning	30 %	60 %	60 %	70 %
Machine hours spent positioning	243 hours	351 hours	351 hours	221 hours
Percentage of machine hours spent in cut	70 %	40 %	40 %	30 %
Machine hours spent in cut	567 hours	234 hours	234 hours	94.5 hours
Energy Use per 1000 work hours				
Constant start-up operations (idle)	149288 kWh	1038 kWh	3033 kWh	600 kWh
Run-time operations (positioning, loading, etc.)	5471 kWh	1033 kWh	1818 kWh	0 kWh
Total energy use per 1000 work hours	6237 kWh	673 kWh	702 kWh	100 kWh
Material removal operations (in cut)	160996 kWh	2744 kWh	5553 kWh	700 kWh
Energy Used par Material Removed				
Material Machined	Aluminium	Aluminium	Aluminium	Aluminium
Material Removal Rate	20.0 cm^3/sec	5 cm^3/sec	5.0 cm^3/sec	1.5 cm^3/sec
Material removed per 1000 work hours	40824000 cm^3	4212000 cm^3	4212000 cm^3	510300 cm^3
Energy used/Material removed	**14.2 kJ/cm^3**	**2.3 kJ/cm^3**	**4.7 kJ/cm^3**	**4.9 kJ/cm^3**
Material Machined	Steel	Steel	Steel	Steel
Material Removal Rate	4.7 cm^3/sec	1.2 cm^3/sec	1.2 cm^3/sec	0.35 cm^3/sec
Material removed per 1000 work hours	9593640 cm^3	1010880 cm^3	1010880 cm^3	119070 cm^3
Energy used/Material removed	**60 kJ/cm^3**	**10 kJ/cm^3**	**20 kJ/cm^3**	**21 kJ/cm^3**

Tableau 2.1 – Analyse énergétique de quatre machines de fraisage [Dahmus2004]

L'étude précédente sera reprise par la suite en 2013 par Balogun et al. qui proposeront une modélisation plus fine de l'état transitoire par rapport aux travaux précédents [Balogun2013]. Cette phase de travail a, en effet, un fort impact sur la consommation énergétique globale. En proposant cette nouvelle modélisation plus fine sur cet état de fonctionnement, les erreurs de prédiction passent de 13% pour Dahmus et Gutowski à 5% pour Balogun. La figure 2.3 décrit la décomposition adoptée par Balogun dans ces travaux. De plus, l'équation 2.3 modélise l'énergie électrique consommée par la machine en fonction de l'ensemble des paramètres de fabrication.

$$E = P_0 * (t_b + t_r + t_c) + P_r * (t_r) + P_{air} * t_{air} + (P_r + P_{cool} + k\nu) * t_c \qquad (2.3)$$

P_0, puissance électrique absorbée constante,
P_r, puissance électrique absorbée dû à la préparation,
P_{cool}, puissance électrique absorbée par la pompe de fluide de refroidissement,
P_{air}, puissance électrique absorbée pour effectuer l'usinage sans coupe,

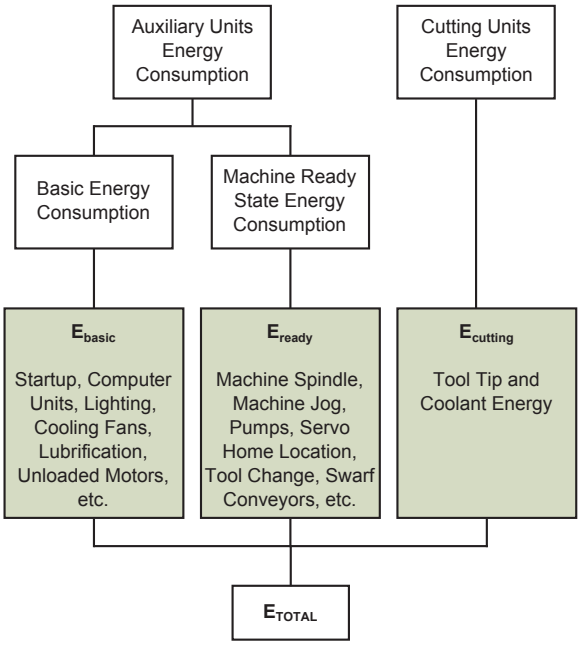


Figure 2.3 – Modèle d'estimation de la consommation d'énergie électrique d'une machine outil [Balogun2013]

t_b, t_r, t_c, t_{air} sont les temps respectifs à la consommation constante, à la consommation dû à la préparation, à la consommation en phase de coupe et à la consommation en non-coupe,
k, énergie spécifique de coupe,
ν, débit de copeaux.

Les études précédemment citées s'appuient essentiellement sur la théorie de la coupe. On remarque que la partie de l'énergie nécessaire à la mise en forme de la pièce est relativement faible comparée à l'énergie électrique totale consommée. Il est donc nécessaire de proposer une modélisation de plus haut niveau modélisant l'état du système de production.

2.1.2 Les méthodes analytiques orientées process

Les constatations faites précédemment ont conduit à la mise en place de modèles de consommation énergétique orientés procédé. En effet, la consommation due à la phase de coupe représentant une part pouvant être faible de la consommation totale de la machine, des auteurs ont proposé des modélisations plus abouties des machines de production [Dietmair2009, Duflou2012, He2012]. Ces modélisations permettent de prendre en compte la consommation totale de la machine. De plus, cette approche de plus haut niveau permet de mettre en place soit une surveillance de l'état de consommation de l'unité de production [Vijayaraghavan2010, Hu2012], soit une optimisation de l'ensemble de l'atelier de fabrication d'un point de vu consommation électrique [Le2012]. Une des études les plus intéressante a été menée par Dietmair et al. qui ont analysé la consommation énergétique des machines d'usinage en fonction de leur état de fonctionnement [Dietmair2009]. La figure 2.4 représente l'ensemble des états pris en compte. À partir de ce

chronogramme et en connaissant la consommation énergétique de chaque état, il est possible de prédire la consommation globale de la machine. Cette approche est plus précise - avec une erreur inférieure à 5 % - que les approches basées sur la théorie de la coupe.

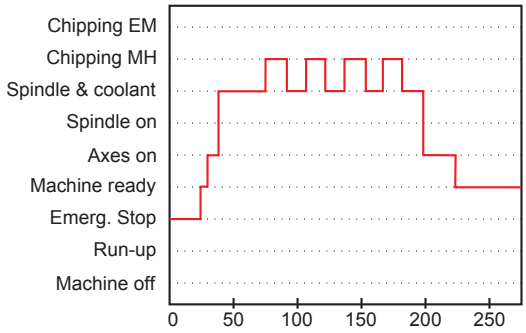
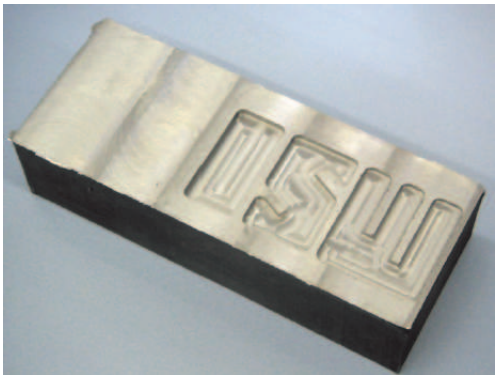
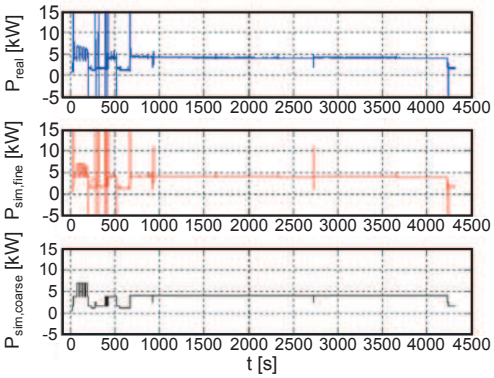


Figure 2.4 – Profile d'utilisation d'une machine d'usinage pour une opération d'ébauche [Dietmair2009]



(a) Pièce d'étude



(b) Résultats de simulation

Figure 2.5 – Illustration de la modélisation par état [Dietmair2009]

La figure 2.5a illustre la pièce test retenue pour valider leur modèle. La figure 2.5b représentent la consommation énergétique de la machine. Le premier relevé est l'acquisition de la consommation énergétique réelle de la machine. Les deux relevés suivants représente l'estimation de la consommation énergétique associée à la pièce à fabriquer suivant le degré de finesse du modèle. On remarque que la consommation énergétique évaluée par le modèle est proche de la valeur réelle.

Cette approche basée sur l'état du système et non pas uniquement sur la phase de coupe est très intéressante car elle permet de modéliser plus finement la consommation énergétique des moyens de production. Une telle approche nécessite tout de même une phase de caractérisation pour déterminer l'énergie consommée à chaque état. Pour cela, Behrendt et al. [Behrendt2012]

ont mis en place une procédure permettant de caractériser la consommation énergétique des différents états d'un moyen de production afin d'alimenter les modèles d'évaluation. Cette procédure, appuyée sur une pièce standard de caractérisation illustrée par la figure 2.6, a été appliquée sur dix machines d'usinage de différents types et de différentes tailles. Cette procédure standardisée permet d'alimenter une base de données - associées aux procédés de fabrication - sur laquelle il serait possible de s'appuyer pour développer des outils d'évaluation de la consommation énergétique des procédés en fonction de leur état de fonctionnement.

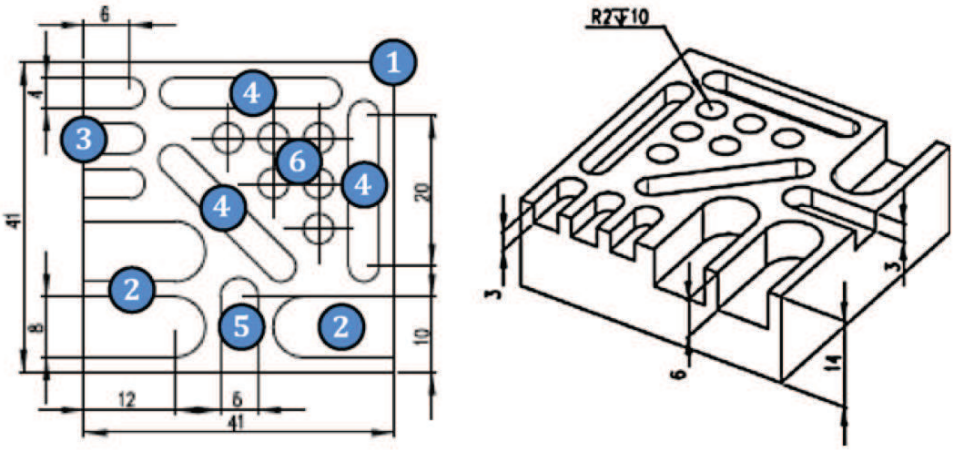


Figure 2.6 – Pièce test normalisée (machine d'usinage de petite taille) [Behrendt2012]

Finalement, en proposant une approche process, on peut s'apercevoir qu'une partie de la consommation d'énergie électrique en phase de fabrication n'est pas due à la phase de coupe. Les efforts d'optimisation peuvent donc être orientés sur les éléments les plus impactant comme ont pu le faire l'équipe de Christian Brecher [Brecher2012]. Dans leur étude les auteurs s'intéressent à l'optimisation de la consommation d'énergie électrique de l'unité de régulation de la température du système de production. Cet élément non présent physiquement sur la machine mais nécessaire au process est souvent une source d'impact non négligeable.

2.1.3 L'optimisation des paramètres de coupe

Les modèles et méthodes développés précédemment permettent d'estimer selon différents points de vues la consommation énergétique des procédés. On remarque que malgré les efforts mis en place, ces modélisations restent complexes et les résultats ne sont pas toujours précis. Il est alors parfois nécessaire de se focaliser uniquement sur le procédé afin d'optimiser les conditions de coupe en phase de fabrication dans le but de minimiser la consommation énergétique du procédé.

Diaz et al. ont proposé une étude sur l'optimisation des conditions de coupe permettant de minimiser l'énergie électrique consommée [Diaz2009]. Cette optimisation vise à obtenir le point

de fonctionnement pour lequel le temps de fabrication et la puissance électrique absorbée sont optimaux. Cette étude permet, entre autre, de faire un choix de machine optimale entre une machine d'usinage conventionnelle ou une machine d'usinage à grande vitesse. Dans cette étude, l'usinage à grande vitesse est plus intéressant car il minimise le temps de fabrication. Or le temps de fabrication est un facteur prépondérant sur la consommation énergétique totale comparé à la puissance électrique absorbée.

De même, Mori et al. ont proposé une étude sur la minimisation de la consommation énergétique lors de différentes opérations d'usinage [Mori2011]. Pour cela, ils proposent trois cas d'études afin de minimiser cette consommation. La première s'intéresse particulièrement aux conditions de coupe en perçage, surfaçage et contournage. Ils analysent l'influence des paramètres de coupe (vitesse de rotation de la broche, avance par tour, prise en passe axiale et radiale) sur la consommation énergétique en utilisant la méthode de Taguchi. La seconde étude s'intéresse à l'usinage de trous profonds (Longueur / Diamètre = 5). Pour cette étude les auteurs proposent deux types d'approches.

La première étude - plus classique - considère un cycle de perçage puis débourrage constant. C'est à dire que l'on perce jusqu'à une certaine profondeur - constante - puis on ressort de la matière pour évacuer le copeau et ce de façon régulière. La seconde méthode, utilise une boucle de contrôle. Dans ce cas, l'auteur contrôle la différence entre le couple au début du perçage et le couple pendant le perçage. Tant que cette différence n'excède pas une certaine valeur, on peut continuer le perçage. Il conclut que le cycle de débourrage permet d'évacuer plus facilement les copeaux. Si le copeau s'évacue correctement ce cycle n'est pas nécessaire. Cette seconde approche permet de diminuer le temps de fabrication de 20 % et la puissance électrique absorbée de 25 % pour la production de trois alésages de diamètre 6 mm et de 30 mm de profondeur. La troisième étude menée par cette équipe s'intéresse plus particulièrement à la commande des axes de la machine. En synchronisant l'accélération et la décélération de la broche avec les déplacements selon les axes de la machine, il est possible de diminuer la puissance électrique absorbée par la machine.

Ces études, très locales, sont intéressantes car elles permettent de mettre en évidence les possibilités de réduction uniquement en opérant sur les paramètres de la machine, tout comme l'étude menée par Oda et al. [Oda2012]. Dans leurs travaux, ils s'intéressent plus particulièrement à la diminution de la consommation énergétique des périphériques de la machine tels que les organes de lubrification.

L'étude menée par Newman et al. s'inscrit aussi dans cette logique de minimisation de la consommation énergétique en fonction des paramètres de coupe [Newman2012]. Ils s'intéressent dans un premier temps à l'influence de la profondeur de passe sur la consommation énergétique lors de l'usinage de rainures (Figure 2.7). Dans un second temps, ils évaluent l'influence de la vitesse d'avance et de la profondeur de passe sur cette consommation. Cette deuxième expérimentation est appliquée lors de la phase de finition d'une pièce en aluminium.

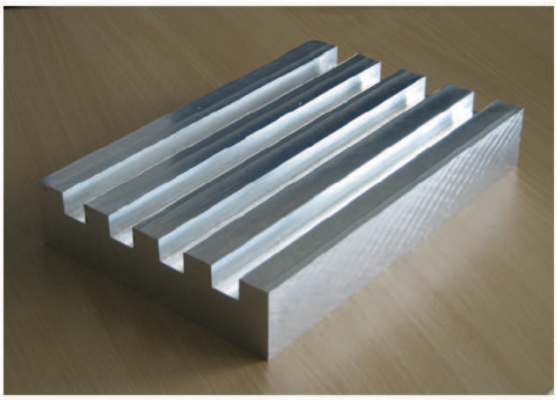


Figure 2.7 – Exemple d'un block d'aluminium usiné lors des expérimentations [Newman2012]

Plus récemment, Camposeco-Negrete s'est intéressé à l'influence des paramètres de coupe sur la consommation électrique lors d'une opération de tournage sur un acier AISI 1018 [Camposeco-Negrete2013]. Dans son étude - réalisée à partir de la méthode de la conception robuste (Robust Design) - il montre que les paramètres principaux ayant une influence sur la consommation énergétique sont la profondeur de passe et l'avance pour un même débit de matière. La méthodologie utilisée permet de définir le couple de paramètres minimisant la consommation énergétique. On peut également citer Rajemi et al. qui se sont aussi intéressés à la détermination des paramètres de coupe optimaux afin de minimiser la consommation énergétique des machines de tournage [Rajemi2010].

2.1.4 Modélisation empirique de la consommation électrique

Pour finir, Yoon et al. ont mis en place une modélisation empirique, permettant de mettre en corrélation l'influence de l'usure de l'outil et la consommation d'énergie électrique de la machine [Yoon2014]. Dans leur étude, la consommation d'électricité en phase d'usinage ne représente que 7.6 % de l'ensemble de la consommation de la machine (Puissance électrique absorbée = [0, 200] Watts). Néanmoins, sur cette faible part, ils remarquent une variation de la puissance absorbée (entre 0 et 35 Watts) en fonction de l'usure d'outil. À partir de cette modélisation empirique du procédé, ils peuvent prédire la consommation d'énergie électrique de la machine en fonction de la profondeur de passe, de la vitesse d'avance et de la vitesse de rotation de la broche. De plus, ils sont ainsi en mesure de mettre en place une surveillance de l'usure de l'outil en fonction de la puissance absorbée.

Les études précédentes permettent de mettre en évidence les possibilités d'amélioration des procédés de fabrication afin de minimiser leur consommation énergétique. Ces études sont intéressantes mais ne peuvent être généralisées. En effet, il faut alors, pour chaque machine d'usinage, réaliser de tels essais. On peut remarquer que l'ensemble des études de cette section ne s'intéressent qu'à la consommation énergétique des procédés de fabrication par enlèvement de matière. Dans le cadre d'analyse environnementale il est également important de s'intéresser à l'impact de l'utilisation des fluides de coupe.

2.2 Consommation des fluides de coupe

La consommation énergétique des procédés de fabrication représente une grande partie des impacts environnementaux qu'ils génèrent. Néanmoins, dans le cadre d'une analyse environnementale il est nécessaire de s'intéresser aussi à l'utilisation de consommables lors de l'usinage. Les fluides de coupe font parties de ces consommables. En effet, ces fluides sont nocifs à la fois pour l'environnement mais aussi pour les opérateurs. On retrouve de nombreuses études dans la littérature qui proposent des techniques de lubrification alternatives à l'utilisation de fluides de coupe. Les techniques que l'on retrouve régulièrement dans la littérature sont l'usinage à sec (dry machining), l'usinage à lubrification minimum (MQL ou MQCL) [Machado1997], l'usinage sous azote (cryogenic machining) [Evans1991], l'usinage sous haute pression (HPJAM) [Mazurkiewicz1989], l'usinage à lubrification solide [Lathkar2000] ou l'utilisation de lubrifiant dit "écologique", à base d'huile végétale.

Dans son étude, l'équipe de Pusavec compare les impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie des lubrifiants utilisés soit en usinage traditionnel, soit en usinage sous haute pression, soit en usinage sous azote [Pusavec2010a, Pusavec2010b]. La figure 2.8 présente l'ensemble des trois technologies étudiées. Pour chacune de ces technologies, Pusavec analyse l'en-

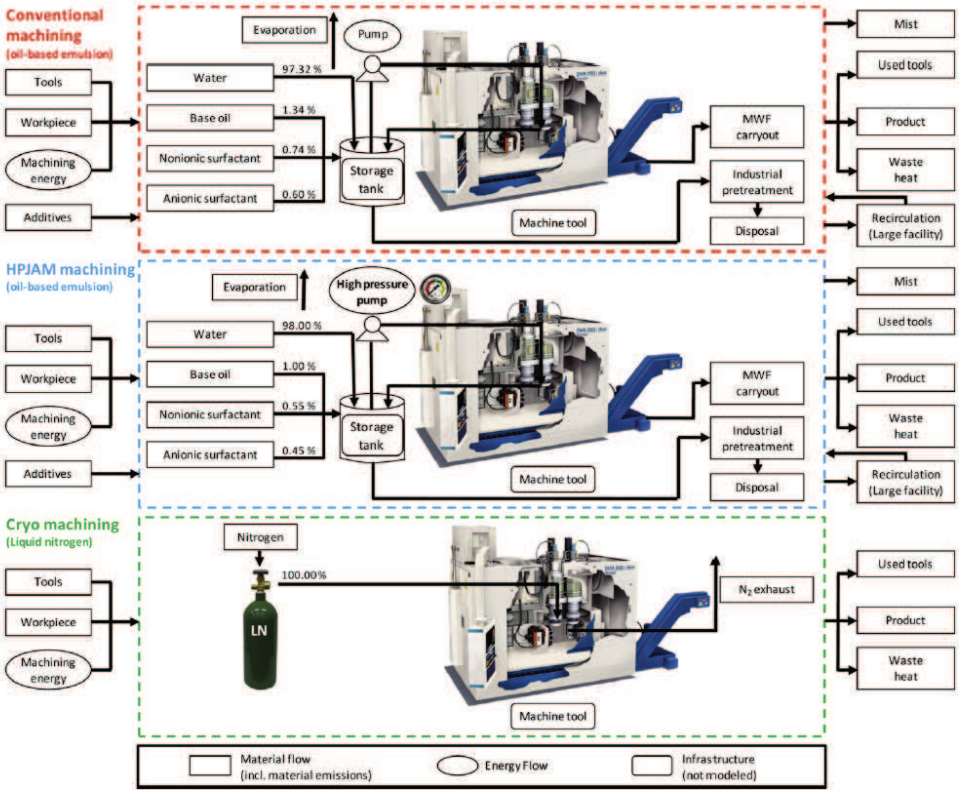


Figure 2.8 – Schéma de comparaison des technologies de machines, utilisant le concept d'ACV [Pusavec2010a]

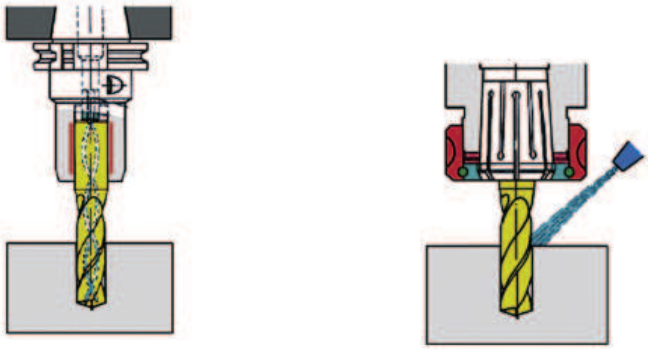
semble des flux entrants et sortants du procédé. Toutes ces flux sont ensuites pris en compte afin d'évaluer l'impact environnemental global du process. Dans son étude, il conclut quant aux possibilités offertes par ces alternatives dans le cadre de la réduction de production de déchets, d'utilisation d'eau, etc.

Néanmoins, l'utilisation de lubrifiant étant bien ancrée il faudrait un certain temps pour passer d'une technologie dont on connaît bien le comportement à des technologies de lubrifications plus propres. De plus, il semble nécessaire d'étudier l'influence de l'utilisation de tels fluides sur les contraintes résiduelles apparaissant lors de l'enlèvement de matière qui sont atténuées par les fluides de coupe.

Les différentes technologies alternatives permettant la minimisation de l'utilisation de lubrifiant de coupe à base d'huile minérale sont présentées par la suite. Les études citées s'intéressent principalement à la réduction de l'utilisation des fluides de coupe dans le but de minimiser l'impact environnemental des procédés de fabrication utilisant de tels fluides.

2.2.1 Lubrification minimale (MQL)

Cette technologie consiste à injecter de façon optimale le lubrifiant au plus près de la zone de coupe. De plus, la quantité de fluide utilisée peut être de l'ordre de dix mille fois moins (100 mL/h) que pour la lubrification standard. On utilise alors soit des outils de coupes adaptés à cette technique de lubrification incluant des canaux de lubrification (Figure 2.9a), soit un système externe de lubrification permettant la formation d'un fin jet de lubrifiant (Figure 2.9b). Weinert et al. ont réalisé une revue complète sur la lubrification de type MQL et l'usinage à sec [Weinert2004]. Cette revue montre les possibilités offertes par cette technologie.



(a) Alimentation interne (b) Alimentation externe

Figure 2.9 – Schématisation d'outils coupants utilisant la lubrification minimale (MQL) [Lawal2013]

Des études s'intéressant plus particulièrement à la qualité des surfaces produites avec une lubrification de type MQL ont été menées par Lawal et al [Lawal2013]. Elles permettent de mettre en évidence qu'il n'y a pas de différence sur l'intégrité de la surface entre un usinage avec une lubrification conventionnelle ou MQL. De plus, l'usure des outils de coupe est moins rapide pour une lubrification MQL par rapport à l'usinage à sec.

Récemment, Sarikaya et al. ont utilisé la méthodologie utilisant les surfaces de réponses pour déterminer les paramètres de coupe optimaux lors du tournage de pièce avec une lubrification de type MQL [Sarikaya2014]. En faisant varier le débit de fluide de lubrification et les paramètres machine, ils observent l'état de surface de la pièce en fonction de la variation de ces paramètres.

2.2.2 Usinage sous azote (Cryogenic machining)

L'usinage sous azote est l'une des technologie permettant de supprimer totalement les fluides de coupe. Le principe est de diminuer la température entre la pointe de l'outil et la pièce en y projetant de l'azote liquide. Cette technique permet d'obtenir une qualité de pièce, en terme d'état de surface, meilleure que tout autre lubrification avec les mêmes conditions de coupe comme ont pu le démontrer Pusavec et al. [Pusavec2011] ou plus récemment Kaynak [Kaynak2014].

Dans ces différentes études, les auteurs concluent que la lubrification sous azote offre de meilleures performances de la pièce finale. Elle permet d'améliorer l'état de surface de la pièce mais aussi d'augmenter sa dureté ainsi que les contraintes résiduelles de compression dû à l'effort de l'outil sur la pièce. De plus, Kaynak montre que les outils de coupe s'usent moins vite avec ce type de lubrification. Les auteurs précédemment cités s'accordent sur le fait que cette technologie de lubrification est très bien adaptée à l'usinage de matériau dur comme l'Inconel 718. L'ensemble des études que l'on retrouve sur cette technologie s'appuient sur ce type de matériau.

Néanmoins, dans le cadre d'une analyse environnementale, il est nécessaire de connaître les impacts environnementaux liés à la production de l'azote liquide avant de conclure sur l'amélioration - d'un point de vue environnemental - de ce type de lubrification. La production d'azote nécessite un certain nombres d'étapes dont une étape de compression de l'air à 7 bars, une étape d'épuration pour supprimer toute trace d'eau, une étape de refroidissement à -173°C et une étape de distillation pour récupérer uniquement l'azote. Cette approche globale est nécessaire afin d'éviter tout transfert d'impact entre phases de production.

2.2.3 Usinage à sec (Dry machining)

L'usinage à sec est une des technologie qui permet de supprimer l'usage de lubrifiant minéraux sans investissement particulier. Un certain nombre d'études ont été menées sur cette technique d'usinage afin de la comparer aux techniques d'usinages traditionnelles [Dudzinski2004, Devillez2011, Ghani2014]. La complexité de cette technologie est qu'aucun élément extérieur ne permet l'évacuation de la chaleur provoquée lors de l'arrachement de la matière. Il est donc

nécessaire d'utiliser des outils de coupe adaptés, comme les outils de coupe à revêtement céramique, et des conditions de coupe optimales. Ces remarques ont été soulevées dans une première étude réalisée par Dudzinski et al. [Dudzinski2004].

Pour ces auteurs, il est nécessaire de développer des outils ayant une faible adhérence et une faible résistance au frottement ainsi qu'une dureté à chaud très importante. Les outils de type Oxyde-PVD peuvent répondre à ces critères. Dans une seconde étude, cette même équipe montre, entre autre, que les forces induites lors de l'usinage d'un Inconel 718 sont moins importantes pour un usinage à sec qu'un usinage à lubrification traditionnelle [Devillez2011].

Ghani et al. concluent que l'usinage à sec pour des faibles vitesses de coupe ne permet pas d'atteindre des durées de vie d'outils intéressantes. Dans ces conditions, la lubrification traditionnelle - avec de l'huile végétale ou minérale - permet d'atteindre des durées de vie trois fois plus importante qu'en usinage à sec. Par contre, pour des vitesses de coupe plus importantes, l'écart diminue et les durées de vie d'outils sont similaires. De même l'état de surface de la pièce n'est pas influencé par le type de lubrification. Les auteurs insistent sur le fait que des outils permettant de réaliser des usinage à sec doivent encore être développés.

2.2.4 Influence des conditions de lubrification sur l'intégrité de la surface

L'équipe de Rotella a mené une étude sur l'influence des techniques de lubrification sur l'intégrité de la surface. Ils montrent que l'ensemble des techniques de lubrification, autre que la lubrification conventionnelle, permettent d'augmenter les caractéristiques de la pièce produite [Rotella2013]. En particulier, la technique de lubrification sous azote permet de diminuer l'état de surface et d'augmenter la dureté comme ont pu le constater Kaynak et Pusavec. En ce qui concerne l'usinage à sec, cette technique augmente le nombre de grains β dans le titane ce qui contribue à l'augmentation de la résistance mécanique pour des températures communes (proche de 25°C). Ces techniques de lubrification devraient être développées dans les entreprises manufacturières mais le peu de connaissances actuelles sur ces technologies freinent leur développement.

2.3 Consommation d'autres consommables

L'approche mono-objectif liée à l'évaluation de l'impact environnemental des procédés de fabrication nécessite de prendre en compte l'ensemble des flux traversant le système. Précédemment, nous avons traité les flux majeurs qui traverse le système. Néanmoins, il est aussi important de prendre en compte la consommation, même faible, des autres consommables et en particulier celle de l'eau.

Zhao et al. montrent dans leur étude que la consommation d'eau peut être un facteur d'impact environnemental non négligeable pour les procédés de fabrication [Zhao2012]. Dans cette étude, les auteurs mettent en place une méthodologie permettant de quantifier la consommation d'eau directe et indirecte lors de la phase de fabrication. Ils appliquent leur méthodologie sur

trois procédés de fabrication (perçage, tournage et fraisage). Cette étude est une première approche intéressante permettant de prendre en compte, en plus de la consommation électrique, la consommation de fluides lors d'une analyse environnementale.

La figure 2.10 résume la méthodologie développée par Zhao et al. Ils identifient trois différents type de consommation d'eau : la consommation directe (Water S1), la consommation indirecte associée à la consommation énergétique (Water S2), la consommation indirecte (Water S3). La méthodologie développée nécessite néanmoins des études plus approfondies pour permettre d'alimenter la base de données sur la consommation d'eau des procédés de fabrication d'un point de vue spatio-temporel.

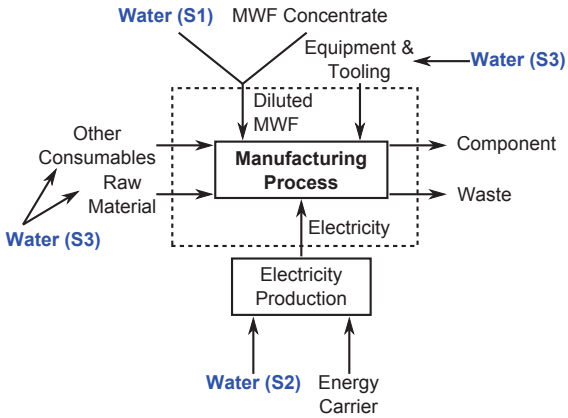


Figure 2.10 – Flux de matières et d'énergie associés aux procédés de fabrication et les différents types de consommations d'eau [Zhao2012]

Ces études sur la consommation d'eau ou sa pollution sont très intéressantes car dans un contexte de développement durable l'eau fait partie de l'un des enjeu majeur dans les impacts environnementaux.

L'air comprimé utilisé dans nos systèmes de production est aussi une source non-négligeable d'impact environnemental. Néanmoins, les impacts environnementaux qui sont engendrés par cette consommation sont dus essentiellement à la consommation électrique des compresseurs. On peut citer les travaux de Jovanovic et al. qui se sont intéressés à l'optimisation de la consommation énergétique du système de distribution d'air comprimé pour une usine de fabrication [Jovanovic2014].

2.4 Approche multi-objectifs de la performance d'un procédé de fabrication

Les études précédemment citées s'intéressent toujours à l'influence des paramètres de fabrication ou du type de lubrification sur un seul objectif, l'environnement. De plus, ces études traitent souvent le problème d'un seul critère, la consommation énergétique, la consommation de lubrifiant ou la consommation d'eau. Or il peut être intéressant de mixer ces études pour développer

des méthodologies multi-critères voire multi-objectifs, étudiant l'influence des paramètres de fabrication sur des objectifs tels que le coût, l'environnement, la santé, etc.

Dans la littérature, on retrouve très peu d'articles traitant de l'évaluation globale des procédés de fabrication d'un point de vue développement durable. En général, les études ne s'intéressent que principalement à un seul volet du développement durable, qu'il soit économique ou environnemental voire social. Peu d'études proposent une approche multi-objectifs traitant de l'ensemble de ces trois volets.

Récemment, Yan et al., une équipe de l'Institut Technologique de Harbin, ont proposé une méthodologie d'évaluation multi-objectifs des procédés de fabrication [Yan2014, Yan2013]. Cette méthodologie - basée sur la théorie de l'extension - permet de résoudre des problèmes contradictoires tout comme la méthode AHP. Mais, contrairement à la méthode AHP, cette théorie utilise des éléments mathématiques ne nécessitant pas d'expertise afin de définir un ordonnancement des critères entre-eux. Cette méthodologie permet d'associer à chaque pilier du développement durable (environnemental, économique et social) des critères d'évaluations. Les auteurs associent les critères de consommation énergétique, de consommation de fluide de coupe et de consommation de lubrifiant au pilier environnemental. Les critères de durée de vie des outils, de temps de fabrication ainsi que d'état de surface sont associés au pilier économique. Pour finir, le critère de nuisance sonore est associé au pilier social. L'ensemble de ces critères permettent de définir des objets mathématiques (appelés "matter-element") qui seront utilisés dans la méthodologie. En réalisant une série d'expérimentation sur une fraiseuse à axe vertical, ils déterminent le quadruplet de paramètres de fabrication (vitesse de rotation de la broche, avance, profondeur de passe et largeur de passe) maximisant l'entropie générale du système. Ce quadruplet de paramètres répond au mieux à l'ensemble des volets du développement durable. Cette étude est très intéressante car c'est l'une des premières études proposant une méthodologie d'évaluation globale de l'ensemble des volets du développement durable.

Wang et al. propose une étude d'optimisation multi-objectifs basée sur une optimisation génétique prenant comme fonctions coûts l'énergie électrique consommée, le coût de production et la qualité de la pièce produite [Wang2013]. Les contraintes associées à cette optimisation sont les paramètres de fabrication (vitesse de rotation de la broche, l'avance et la profondeur de passe) utilisés pour le tournage d'une pièce métallique. Un des point intéressant de cette approche est de prendre en considération la qualité de la pièce produite. En effet, il est intéressant de minimiser l'impact environnemental mais il est nécessaire de garder à l'esprit que la pièce produite doit répondre aux exigences géométriques imposées par le cahier des charges. L'approche proposée permettant de prendre en compte le triptyque coût-qualité-environnement est intéressante. Néanmoins, la consommation énergétique de la machine étant la seule variable définissant l'aspect environnemental il est nécessaire de considérer l'ensemble des flux consommés (fluide de coupe, huile, déchets produits) en phase de production pour définir un coût environnemental.

2.5 Synthèse

Les procédés de fabrication par enlèvement de matière ont fait l'objet d'un grand nombre d'études. On retrouve à la fois des études dont l'approche est soit locale, lors de l'optimisation de trajectoires afin de minimiser la consommation énergétique par exemple, soit globale en proposant une optimisation de la consommation énergétique d'un parc machines. Une étude liant à la fois les deux approches est nécessaire afin d'appréhender les problèmes d'optimisation de la consommation de l'ensemble des flux d'énergie et de matière.

On remarque, de plus, dans les études s'intéressant aux aspects environnementaux liés aux procédés d'usinage que des efforts sont fait pour minimiser la consommation des fluides de coupe en proposant des méthodes de lubrification innovantes.

Dans la section suivante nous allons nous intéresser à l'approche environnementale développée pour les procédés de fabrication par ajout de matière.

3 La performance environnementale des procédés de fabrication par ajout de matière

Les premières études environnementales sur les procédés de fabrication par ajout de matière [Kruth1998], dont le développement est encore récent comparé aux procédés plus traditionnels tel que l'usinage, ont mis en avant, assez rapidement, les possibilités de gain en terme d'impact environnemental de l'utilisation de tel procédé. En effet, dix ans après le développement des premières machines industrielles de fabrication additive, des études sur l'impact environnemental de ces procédés ont été menées. Ceci s'explique par la nécessité de prendre en compte ces aspects, dans le but de favoriser le développement à grande échelle de ces procédés de fabrication. Le développement industriel de ces procédés offrant déjà une nouvelle liberté de conception, que n'offrent pas les procédés traditionnels, sera d'autant plus important si ces procédés ont un moindre coût sur l'environnement [Bourell2009].

Récemment Hao et al. de l'Université de Exeter ont proposé une étude permettant de mettre en avant les possibilités offertes par la fabrication additive afin de minimiser la consommation d'énergie électrique de ces procédés. Ils ont énoncé cinq verrous importants pour le développement de ces procédés de fabrication d'un point de vue développement durable [Hao2010]. Ces verrous sont :

- la minimisation des déchets de matière première car seule la matière nécessaire à la pièce est fusionnée ;
- l'optimisation de la conception de la pièce minimisant la masse et améliorant les performances de la pièce finale ;
- la minimisation de la consommation énergétique pour les procédés nécessitant un changement de phase de la matière (fonderie ou injection) ;

- la minimisation des étapes de transports en rapprochant les centres de production du consommateur ;
- la possibilité de réparer ou d'améliorer les fonctionnalités d'un produit durant sa phase d'usage.

Dans cette section, nous allons nous intéresser à l'ensemble des études menées afin de caractériser l'impact environnemental des procédés de fabrication par ajout de matière. Drizo et Pegna ont proposé en 2006 une revue, que nous allons compléter, de l'ensemble des sujets et projets de recherche autour de la prise en compte de l'impact environnemental en fabrication additive [Drizo2006]. Nous utiliserons la même structure que dans la section précédente exposant les travaux liant les aspects environnementaux et l'usinage. Dans une première partie, nous nous focaliserons sur les aspects des consommation d'énergie électrique de ces procédés. Dans une seconde partie, nous nous intéresserons aux travaux menés spécifiquement sur la consommation de matière première, atout majeur de ces procédés, et sur la valorisation qui peut être faite de la matière première non utilisée lors du process. Nous étudierons dans une troisième partie les travaux prenant en compte l'ensemble des flux de consommations afin de déterminer l'impact environnemental associé. Pour finir, nous verrons les possibilités offertes par les procédés additifs sur l'ensemble du cycle de vie d'un produit.

3.1 Consommation d'énergie électrique des procédés de fabrication par ajout de matières

Dans une première approche, afin d'évaluer la performance environnementale des procédés de fabrication par ajout de matière, un certain nombre d'études se sont intéressées à leur consommation d'énergie électrique. Cette première approche permet de comparer, sur un critère simple, les procédés de fabrication additive entre eux voire de les comparer avec les procédés de fabrication plus traditionnels.

Les premiers travaux menés sur les aspects énergétiques ont été menés par l'équipe de Yanchun Luo en 1999 à l'Institut technologique du New Jersey [Luo1999a, Luo1999b]. Dans leurs études, les auteurs comparent trois procédés de photo-polymérisation, deux procédés de frittage laser sélectif et quatre procédés de dépôt de fil fondu selon leur consommation d'énergie électrique par kilogramme de matière produite. Ils utilisent ensuite l'éco-indicateur 95 afin de déduire de cette consommation énergétique un indice environnemental exprimé en milli-points (mPts). L'utilisation de cette méthode d'analyse environnementale permet d'introduire la possibilité de recyclabilité et la prise en compte de la toxicité du matériau fabriqué. Il est donc possible de comparer les matériaux plastiques, type ABS, avec les résines utilisées dans le procédé de photo-polymérisation.

Ces premières études sont intéressantes car elles proposent une première comparaison des procédés de fabrication par ajout de matière entre eux. Ces études ont été reprises afin de comparer des machines différentes par Sreenivasan et Bourell [Sreenivasan2009]. De plus, c'est la

première fois que l'on voit apparaitre dans des études environnementales des procédés de fabrication l'aspect éco-indicateur avec l'utilisation de méthode de quantification environnementale.

Les principales études citées précédemment prennent en compte la consommation énergétique des procédés de fabrication en ne considérant que la machine. Or la consommation d'énergie électrique de ces procédés est sensible à la pièce produite ainsi qu'aux paramètres machines utilisées. Les études présentées ci-dessous se sont focalisées sur le couple pièce/procédé afin d'évaluer l'influence de la pièce (forme, positionnement, etc.) sur la consommation énergétique de la machine.

3.1.1 L'influence de l'orientation de fabrication sur la consommation énergétique

Une majorité des procédés de fabrication par ajout de matière utilise le concept de fabrication couche par couche. Ce concept nécessite la mise en place d'un tranchage de la pièce à produire. Chaque tranche représente alors une épaisseur de pièce fabriquée.

Une des premières études prenant en compte le couple pièce-procédé afin de déterminer la consommation de la machine a été proposée par Mognol et al. de l'Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes. En effet, afin de déterminer l'influence de l'orientation du tranchage de la pièce sur la consommation énergétique de la machine cette équipe a étudié l'influence de l'orientation de fabrication sur la consommation d'énergie électrique de

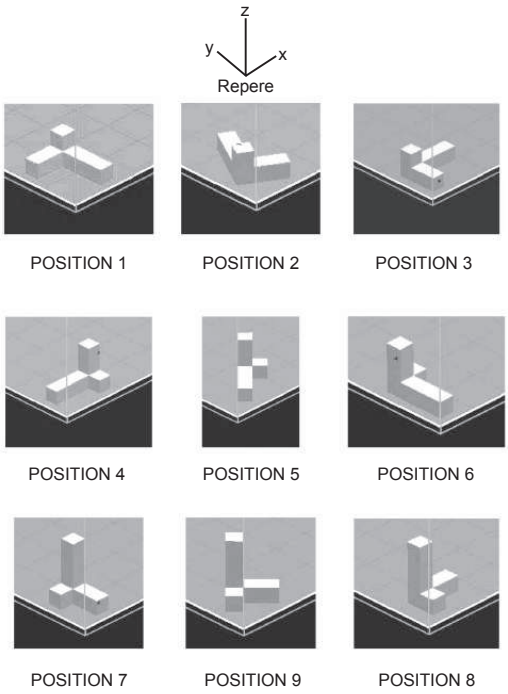


Figure 2.11 – Les différentes orientations de fabrication de la pièce étudiée [Mognol2006]

trois technologies de machine (impression 3D, dépot de fil fondu, frittage laser de poudres métallique) [Mognol2005, Mognol2006].

La figure 2.11 illustre les différentes orientations de pièce prises en compte dans cette étude. Ces travaux permettent de mettre en avant l'influence non-négligeable de l'orientation de fabrication sur la consommation de la machine. Cette influence est en partie due au temps de fabrication qui est fortement dépendant de la hauteur à fabriquer. De ce fait, plus le temps de fabrication est important, plus la consommation énergétique de la machine est importante.

Sur ce même critère d'optimisation de l'orientation de fabrication, Verma et al. ont proposé une étude permettant de minimiser la consommation d'énergie électrique et la consommation de matière en fonction l'orientation. Dans cette étude les auteurs mettent en place une double boucle d'optimisations (Figure 2.12) permettant de proposer des positionnements de pièce dans l'espace machine minimisant la consommation d'énergie électrique et la consommation de matière [Verma2013].

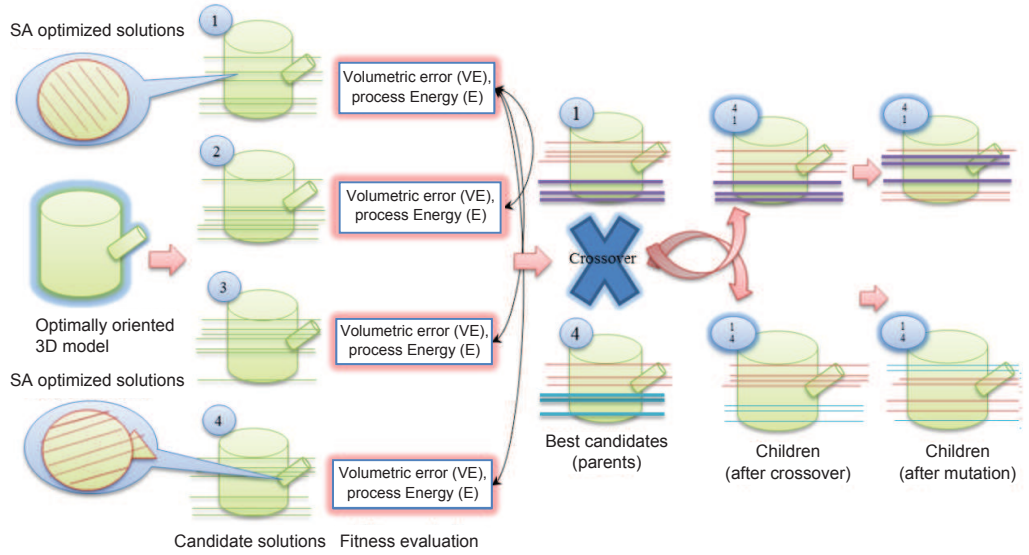


Figure 2.12 – Génération de solutions de candidats et application de l'opérateur de variation sur un échantillon de pièce 3D [Verma2013]

3.1.2 L'influence du remplissage de l'espace machine sur la consommation énergétique

Par la suite, l'équipe de Baumers de l'Université de Loughborough a étudié l'influence de la géométrie de la pièce et du remplissage de l'espace machine sur la consommation d'énergie électrique de la machine [Baumers2010, Baumers2011]. Dans leur travaux ils analysent la consommation énergétique de deux machines dont une est basée sur la technologie de frittage sélectif laser et l'autre est basée sur la technologie de fusion par faisceau d'électrons.

La pièce utilisée pour cette étude est présentée sur la figure 2.13. 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, en analysant l'influence du remplissage de l'espace machine (Figure 2.14) sur la consommation énergétique, ils montrent que cette consommation n'est pas proportionnelle aux nombres de pièces à produire. Cette analyse rejoint celle faite par Pascal Mognol car la consommation énergétique est fortement dépendante de la hauteur à fabriquer.

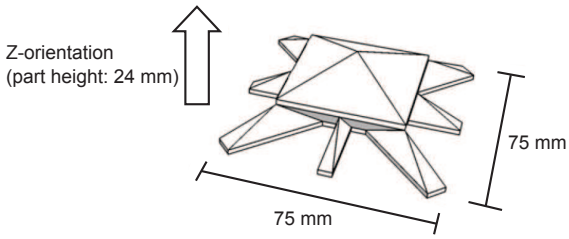


Figure 2.13 – La géométrie normalisée de contrôle de puissance [Baumers2010]

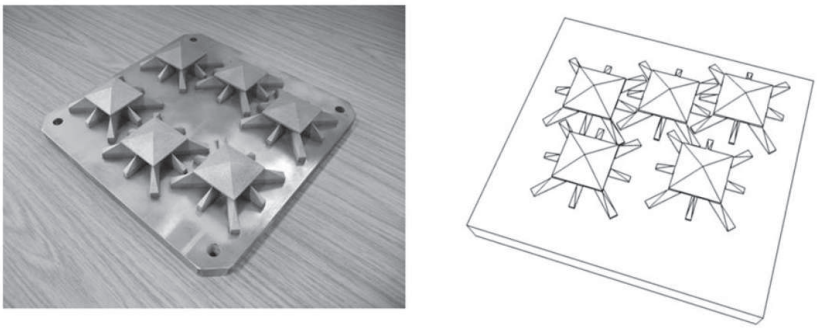


Figure 2.14 – Configuration de remplissage maximal de l'espace de travail dans le cas de la fusion sélective laser (à gauche) et de la fusion par faisceau d'électrons (à droite) [Baumers2011]

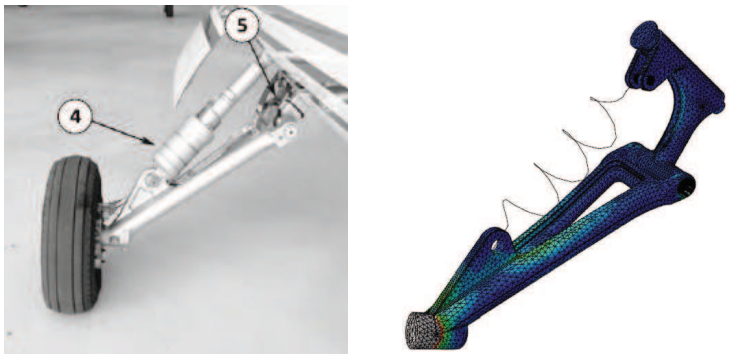
Les travaux réalisés par Mognol et Baumers sont très intéressants car ils permettent de mettre en évidence l'importance de la prise en compte du couple pièce-procédé dans le cadre d'une analyse de la consommation d'énergie électrique des procédés de fabrication par ajout de matière.

3.1.3 Comparaison des procédés additifs avec les procédés traditionnels

Dans un premier temps, la fabrication par ajout de matière permettait de fabriquer essentiellement des pièces plastiques. De ce fait, l'une des premières études menée afin de comparer la fabrication additive par fusion sélective laser avec d'autres procédés s'est intéressée à l'injection plastique [Telenko1997, Telenko2010]. Dans ces études, les auteurs, de l'Université du

Texas à Austin, comparent les deux procédés d'un point de vue consommation d'énergie électrique. 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. Néanmoins, cette première étude ne prend pas en compte la nécessité de fabriquer le moule utilisé par le procédé d'injection plastique. Cette étude devrait être complétée afin d'intégrer toutes les données nécessaires à une analyse environnementale.

Ces travaux montrent que pour de faibles quantités de pièces à fabriquer, les procédés additifs sont moins coûteux d'un point de vue environnemental voire économique si l'on se réfère aux travaux menées par Ruffo et al. [Ruffo2006a], de l'Université de Loughborough à Leicestershire, et Atzeni et Salmi [Atzeni2012], de l'École Polytechnique de Turin. Ces derniers comparent, sur le critère de coût économique, l'injection métallique haute pression avec la technologie de frittage laser métallique. Dans cette étude, ils prennent en compte les possibilités de gains de matières et de diminution d'assemblage qu'offre la fabrication par ajout de matière (Figure 2.15). Sur un exemple de pièce aéronautique, ils concluent que la fabrication additive n'est plus rentable, économiquement, à partir d'une production de 42 pièces (Figure 2.16).



(a) Pièce d'étude (b) Pièce reconçue

Figure 2.15 – Pièce reconçue [Atzeni2012]

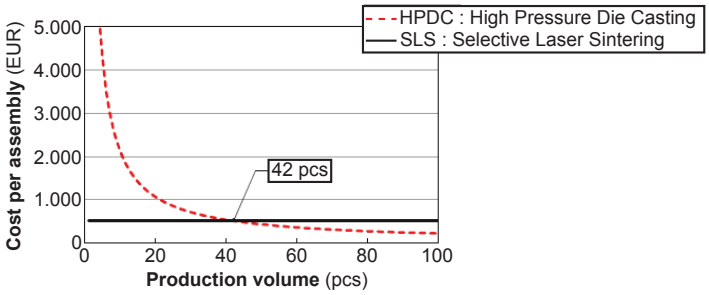


Figure 2.16 – Analyse du point de rupture économique comparant le procédé conventionnel d'injection haute pression (HPDC) avec la technique de fusion sélective laser (SLS) [Atzeni2012]

Dans leur étude, Ruffo et al., comparent sur ce même critère, la fabrication d'une pièce (Figure 2.17) soit par injection plastique soit par frittage laser de poudre plastique. Contrairement au matériau métallique, le point de rupture pour lequel la fabrication additive n'est plus rentable, d'un point de vue économique, est de 8000, 10 000 ou 14 000 pièces selon la modélisation, à coût variable et dépendant de la machine, proposée par Ruffo et al. et de 14 000 pièces selon la modélisation, à coût constant, proposée par Hopkinson et al. [Hopkinson2003], pour des matériaux plastiques. La figure 2.18 résume ces études.

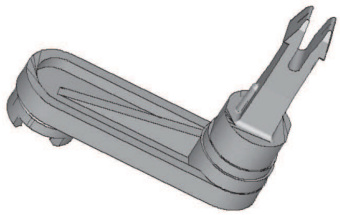


Figure 2.17 – Levier, l'objet de l'étude [Ruffo2006a]

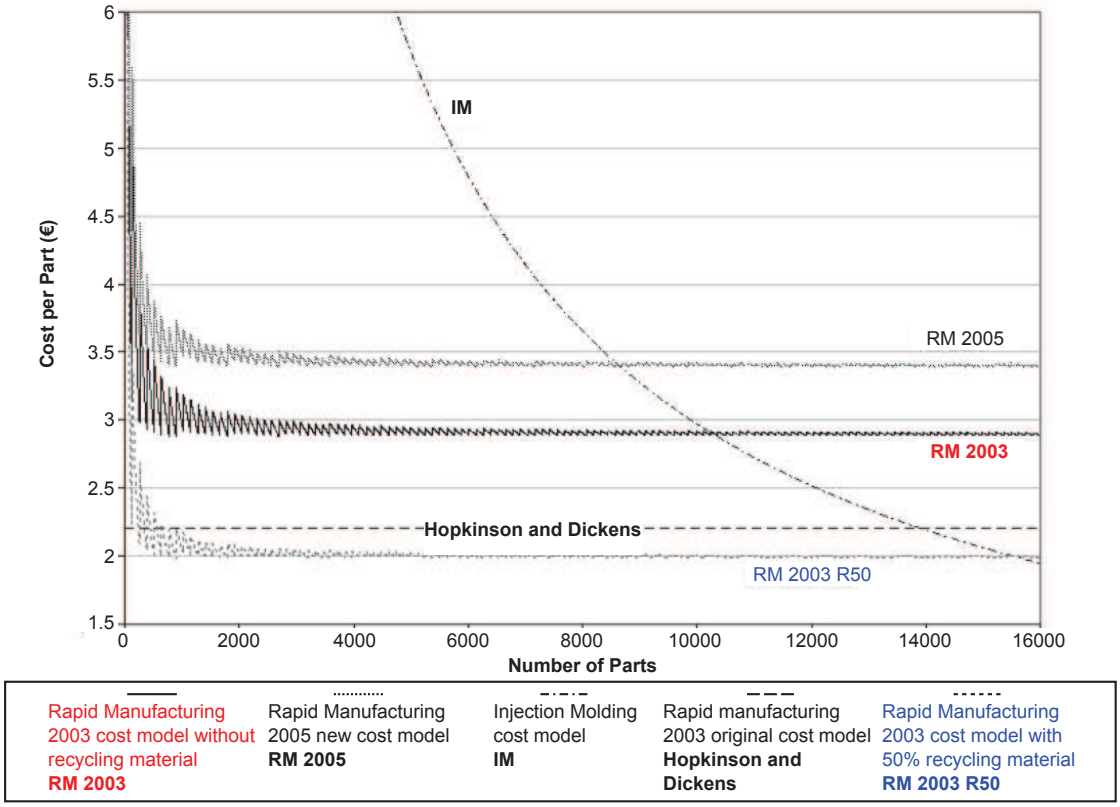
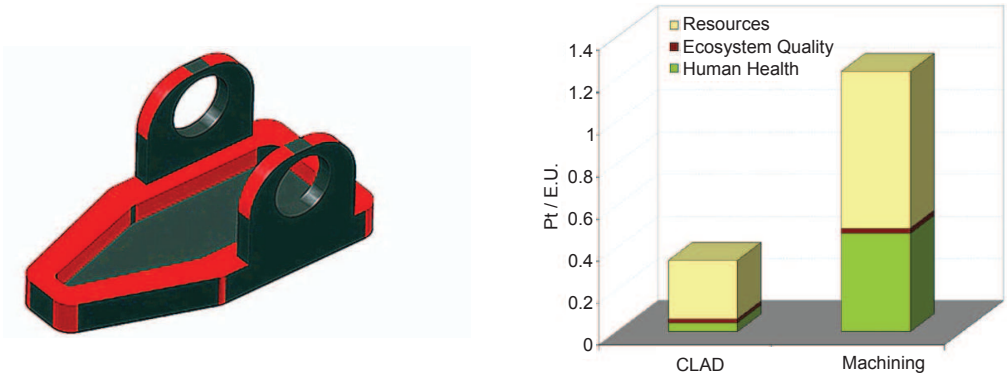


Figure 2.18 – Comparaison des modèles de coûts économique entre l'injection plastique et la fusion sélective [Ruffo2006a]

Avec ce même objectif de comparaison de procédé, l'équipe de Morrow, de l'Université du Michigan à Ann Arbor, propose en 2007 une étude permettant la comparaison de la fabrication par ajout de matière avec l'usinage [Morrow2007]. Dans cette étude, ils s'intéressent à la fabrication de différentes pièces dont un moule pour l'injection plastique réalisé soit par ajout de matière soit par usinage. Cette étude propose la mise en place d'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 le procédé le plus approprié. Dans le cas contraire l'utilisation des procédés par ajout de matière est le plus optimal. Dans cette même étude, les auteurs montrent que la fabrication additive peut aussi être utilisée pour la réparation de moule. L'objectif étant de re-déposer une peau sur le moule usé afin de ré-usiner les surfaces abîmées et non pas toute la pièce.

Plus récemment, Serres et al. ont proposé une étude comparant, sur une géométrie de pièce donnée (Figure 2.19a), la fabrication additive par projection de poudres et l'usinage [Serres2011]. Cette étude permet de mettre en avant que sur l'ensemble du cycle de vie de la pièce, de l'extraction de la matière première à la fabrication, la fabrication additive permet de diminuer de près de 80 % les impacts environnementaux générés (Figure 2.19b). Néanmoins, cette étude ne prend en compte qu'une seule géométrie de pièce pour les deux procédés, ne tenant ainsi pas compte des règles métiers procédés permettant de proposer des géométries adaptées aux procédés.



(a) Pièce d'étude

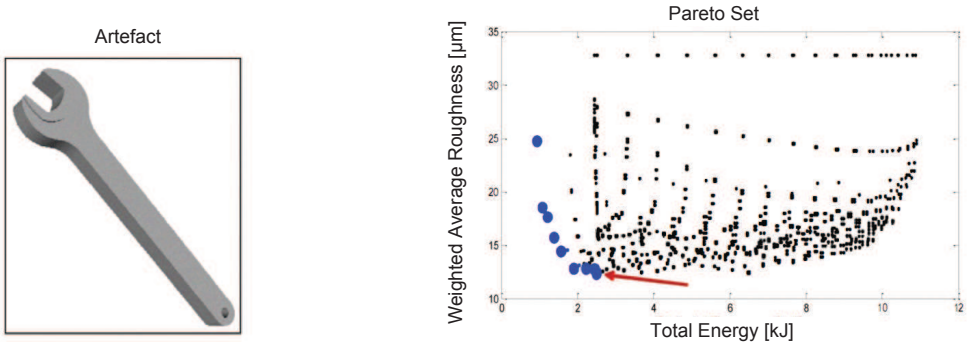
(b) Résultats de l'ACV

Figure 2.19 – Comparaison environnementale des procédés d'usinage et de fabrication additive [Serres2011]

3.1.4 Prise en compte de la dualité consommation énergétique de la machine et qualité de la pièce

Dans la section 1.2.4, nous avons cité certaines études s'intéressant à l'intégrité de la surface de la pièce en fonction de la lubrification utilisée. En fabrication additive, la qualité de la pièce produite est aussi un critère important. En effet, une pièce dont la qualité géométrique ne répond

pas au cahier des charges ne pourra être acceptée même si la consommation d'énergie électrique lors de la production a été minimisée. Strano et al. de l'Université de Exeter ont étudié la corrélation entre l'état de surface final de la pièce et la consommation énergétique de la machine [Strano2010]. De formation mathématicienne, cette équipe propose une optimisation du couple état de surface-consommation électrique dont la pièce d'étude est illustrée par la figure 2.20a et les résultats sont présentés sur la figure 2.20b. Cette étude s'appuie en partie sur la modélisation de l'état de surface proposée précédemment par Campbell et al. [Campbell2002] et repris récemment dans une autre étude par Strano et al. [Strano2013].



(a) Pièce d'étude

(b) Résultats sous forme de front de Pareto

Figure 2.20 – Objet d'étude à fabriquer et front de Pareto correspondant [Strano2010]

Cette première partie permet de référencer un certain nombre d'études menées sur la consommation d'énergie électrique des procédés de fabrication par ajout de matière. On peut s'apercevoir qu'il est important de considérer l'ensemble du couple pièce-procédé lorsque l'on souhaite caractériser un tel procédé. La pièce produite ainsi que son positionnement dans l'espace machine ont de fortes influences sur les résultats finaux.

Le tableau 2.2 résume l'ensemble des études s'intéressant à la consommation électrique de ces procédés. On remarque sur ce tableau deux colonnes caractérisant les procédés. La première s'intéresse plus particulièrement à la consommation électrique massique des machines, appelée ECR (Energy Consumption Rate) et exprimée en kWh/kg. La seconde s'intéresse à l'impact environnemental massique (I.E.m) de ces machines de tel sorte que :

$$I.E.m = ECR * fc_{electricite}. \tag{2.4}$$

Ce facteur $\text{fc}_{electricite}$ est un facteur de caractérisation permettant de convertir une énergie consommée (kWh) en impact environnemental (exprimé en mPts).

Ce tableau permet de faire une première comparaison entre les procédés de fabrication additive. Dans ce tableau, cinq technologies de machine ont été étudiées. Il est tout de même

Technologie étudiée	Machines	Matériau	ECR (kWh/kg)	Impact environnemental (mPts/kg)	Nb de pièces*	Référence
Stéréolithographie	SLA-250	Résine Epoxy SLA 5170	33	19	***	[Luo1999]
	SLA-3000	Résine Epoxy SLA 5170	41	24	***	
	SLA-5000	Résine Epoxy SLA 5170	21	12	***	
Selective Laser Sintering	Sinterstation DTM 2000	Polyamide	40	23	***	
	Sinterstation DTM 2500	Polyamide	30	17	***	
	Vanguard HiQ	Polyamide	15	8	**	[Sreenivasan2010]
	EOSINT M250 Xtended	Poudre Métallique (Bronze + Ni)	710	405	1	[Mognol2006]
	EOSINT P760	Polyamide PA2200 Balance 1.0	37	21	63	[Kellens2011b]
		Polyamide PA2200 Speed 1.0	40	23	12	
		Polyamide PA3200GF	26	15	11	
Fused Deposition Modeling	FDM 1650	ABS	346	198	***	[Luo1999]
	FDM 2000	ABS	116	66	***	
	FDM 3000	ABS	697	397*	1	[Mognol2006]
	FDM 8000	ABS	23	13	***	[Luo1999]
	FDM Quantum	ABS	202	115	***	
Selective Laser Melting	MTT SLM 250	Poudre Métallique SAE 316L	31	18	6	[Baumers2010]
Electron Bean Melting	Arcam A1	Poudre Métallique Ti-6Al-4V	17	10	5	

* Nombre de pièces fabriquées en même temps lors de l'enregistrement.
** Fabrication sur l'espace total de travail de la machine (380*330*340 mm)
*** Calcul dépendant de débit de matière fusionnée

Tableau 2.2 – Tableau comparatif, d'un point de vue environnemental, des machines de fabrication additive [Le Bourhis2012]

difficile de conclure sur la machine ayant le plus fort impact environnemental car ces machines ne permettent pas de réaliser des pièces aux fonctionnalités identiques. Par exemple, une machine de stéréolitographie permettra de fabriquer des prototypes dont la durée de vie est limitée contrairement aux machines de fusion sélective laser ou de fusion par faisceau d'électrons qui permettent de réaliser des pièces mécaniques fonctionnelles dont la durée de vie peut être bien plus importante.

Ce tableau est une image de l'impact environnemental de la phase de fabrication. Néanmoins, dans le cadre d'une analyse de cycle de vie, il est nécessaire de s'intéresser plus précisément à la fonctionnalité de la pièce ainsi les résultats présentés ne permettent pas de conclure sur la machine qui permettra de fabriquer la pièce qui aura le moins d'impact sur l'ensemble de son cycle de vie.

3.2 Consommation de matière première

Les procédés additifs sont connus pour ne consommer que la matière nécessaire à la production de la pièce finale. Néanmoins, quelque soit la technologie employée (dépôt de fil fondu, impression 3D, fusion sélective laser, etc.) on ne peut pas considérer que toute la matière consommée se retrouve sur la pièce finale.

Pour la mise en forme des matières plastiques par impression 3D il est nécessaire de considérer la consommation de matière afin de créer les supports nécessaires à la fabrication de la pièce. Ces supports seront par la suite supprimés soit par dissolution soit manuellement. De même, lorsque l'on utilise la technologie de fusion sélective laser une partie de la poudre présente dans l'espace de travail ne pourra être réutilisée [Dotchev2009].

Il en va de même lors de la mise en forme de matériaux métalliques. Pour les procédés utilisant la technologie de projection de poudres, une partie de la poudre projetée n'est pas fusionnée et il est nécessaire de considérer cette perte dans l'analyse environnementale. Pour le procédé utilisant la technologie de lit de poudres, toute la poudre présente dans l'espace de travail n'est pas fusionnée et nécessite un traitement post-fabrication.

Dans la partie suivante, nous allons nous intéresser aux études traitant des poudres à recycler.

3.2.1 Recyclage de poudres plastiques

Que ce soit les poudres métalliques ou les poudres plastiques, leurs utilisation nécessitent une certaine attention. En effet, tandis que les poudres plastiques sont sensibles au vieillissement qui altère leurs propriétés mécaniques [Choren2001], les poudres métalliques peuvent être sensibles à l'humidité contenue dans l'air provoquant leurs oxydations. De même, l'exposition de ces poudres polymères aux faisceaux laser altère aussi leurs propriétés mécaniques comme a pu le montrer l'équipe de Gornet [Gornet2002] et de Pham [Pham2008].

Afin d'éviter le vieillissement prématuré des poudres plastiques, Dotchev et al. ont mis en place en 2009 une méthodologie permettant de recycler les poudres polymères [Dotchev2009]. Dans cette étude, ils étudient l'influence du taux de poudre recyclé dans la poudre initiale sur la qualité de la pièce finale. L'objectif est de limiter la formation de l'effet "peau d'orange" sur les pièces produites. En fonction du nombre d'utilisation de la poudre plastique, ils définissent une quantité minimale de poudre neuve nécessaire au bon fonctionnement du procédé.

Même si les poudres métalliques peuvent être sensibles à leurs conditions d'utilisation, elles sont tout de même moins sensibles à l'insolation due à l'utilisation de laser. De ce fait, on ne trouve pas d'études s'intéressant au recyclage de ces dernières. En général, l'ensemble de la poudre non-fusionnée est ré-utilisée après un traitement par tamisage.

3.3 La prise en compte de l'ensemble des flux ayant un impact sur l'environnement

L'évaluation de la performance environnementale des procédés de fabrication passe nécessairement par une prise en compte de l'ensemble des flux traversant le procédé. Il en va de même pour les procédés additifs même si ces derniers utilisent moins de consommables que les procédés plus traditionnels. Il est donc peu envisageable de nos jours d'évaluer la performance environnementale d'un procédé de fabrication par ajout de matière en considérant uniquement la consommation d'énergie électrique comme cela a pu être fait par Streenivasan et al. [Sreenivasan2010].

Certes, une partie de l'impact environnemental engendré lors de la fabrication d'un produit est due à la consommation électrique de la machine mais l'ensemble des produits traversant le système doivent être pris en compte. La matière utilisée ainsi que les déchets produits ont aussi leur part d'impact environnemental. Les fluides tels que les gaz inertes permettant d'éviter l'oxydation ou les fluides permettant le refroidissement de la machine, dans le cas de machine plus volumineuse que les simples imprimantes 3D, doivent aussi être pris en compte car ils ont un rôle à jouer dans l'impact environnemental global.

Kellens et al. proposent, en appliquant la méthodologie UPLCI qu'ils ont développée, une étude sur cycle de vie des technologies de friction sélective par laser et fusion sélective par laser [Kellens2010, Kellens2011b, Duflou2011]. Cette méthodologie prend en compte l'ensemble des flux traversant le système étudié. Ils analysent la consommation d'énergie électrique, la consommation d'air comprimé, la consommation de matériau, en prenant en compte l'impact environnemental dû à l'atomisation et à la valorisation, et le temps de fabrication. La méthodologie développée permet de documenter, d'analyser et d'améliorer la connaissance des procédés de fabrication de pièces unitaires. En effet, la collecte de données étant réalisée soit par des méthodes empiriques soit par des méthodes théoriques, il est nécessaire de développer comme a pu le faire Kellens lors de ses travaux de thèse [Kellens2013] une méthode permettant d'agglomérer et d'uniformiser l'ensemble de ses données afin de les rendre exploitables par la suite. 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. Dans ses travaux, Karel Kellens applique la méthodologie développée sur des procédés de fabrication de pièces unitaires qui sont la fabrication additive, le découpage laser et l'électro-érosion. Pour finir, il propose des pistes d'amélioration de ces procédés d'un point de vue environnemental en se basant à la fois sur la consommation d'énergie électrique, sur la consommation de matière mais aussi sur l'architecture même des machines étudiées.

De même, Verma et Raï, de l'Université de Buffalo, proposent une étude non plus orientée uniquement sur l'optimisation de la consommation énergétique mais prenant également en compte la consommation de matière [Verma2013]. En considérant ces deux facteurs de consommation, ils mettent en place une optimisation multi-objectifs permettant de minimiser globalement la consommation de matière et la consommation électrique. De plus, ils imposent une certaine

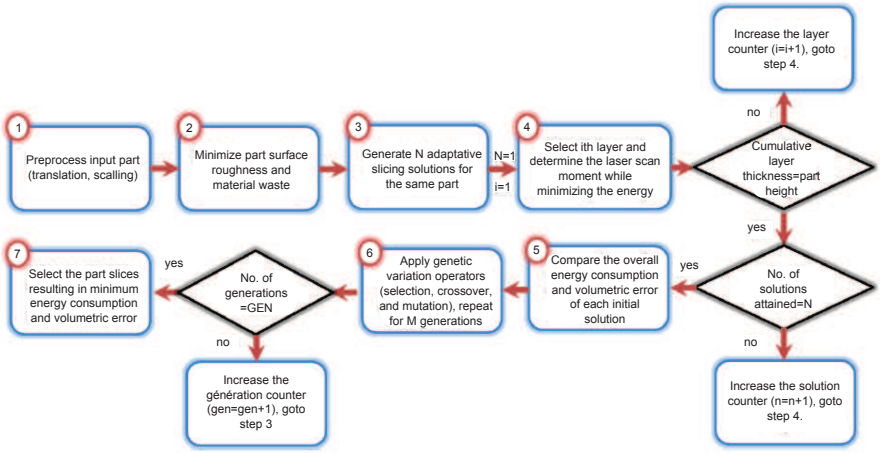


Figure 2.21 – Structure de l'optimisation développée pour un tranchage adaptatif [Verma2013]

qualité de la pièce en couplant la minimisation des consommations précédemment citées avec la maximisation de l'état de surface. Dans cette étude ils mettent en place une double boucle d'optimisation. Dans un premier temps, ils optimisent globalement la pièce en minimisant la quantité de matière utilisée et en maximisant l'état de surface. Dans un second temps, ils optimisent pour chaque tranche de la pièce, la consommation d'énergie électrique. La figure 2.21 résume l'algorithme d'optimisation mis en place.

Cette prise en compte de l'ensemble des flux de consommations est une étape essentielle pour la caractérisation des procédés de fabrication par ajout de matière. Les études prenant en compte cette remarque sont très récentes (2010, 2013) et nécessitent d'être développées. De nos jours, la caractérisation environnementale des procédés de fabrication ne doit plus se contenter d'une simple analyse de la consommation énergétique.

3.4 La fabrication additive, un atout majeur pour la diminution des impacts environnementaux sur cycle de vie

Les études menées dans le cadre de l'analyse de la performance environnementale des procédés de fabrication par ajout de matière sont en général centrées sur le procédé. Ces études permettent de comparer, localement, les procédés de fabrication entre eux. Cela permet alors de faire un choix technologique sur le procédé qui sera le plus respectueux de l'environnement dans la phase de production. Il est nécessaire d'avoir une vision claire et précise du procédé de fabrication et les études citées sont intéressantes pour cela. Néanmoins, cette vision reste très locale et peut être parfois désavantageuse pour les procédés additifs car l'énergie mise en jeu pour la production de pièces peut être conséquente.

Une autre façon d'analyser la performance environnementale d'un procédé de fabrication est de se concentrer sur la pièce produite. C'est sur ce point que la fabrication par ajout de

matière peut avoir un intérêt. En effet, même si l'impact environnemental dû à la phase de production peut être important, il peut être négligeable vis à vis de l'ensemble du cycle de vie de la pièce. Dans ce cas, en analysant les possibilités offertes par la fabrication additive (conception optimisée minimisant la masse, intégration de fonctions multiples, etc.) il se peut que sur l'ensemble du cycle de vie, la pièce produite en fabrication par ajout de matière génère moins d'impacts environnementaux qu'une pièce usinée par exemple.

Le projet collaboratif ATKINS s'est intéressé à cette problématique [Hague2007, Reeves2008b]. Dans ce projet, les auteurs ont étudié l'ensemble des possibilités offertes par la fabrication additive afin de diminuer les impacts environnementaux des pièces produites. Hormis les avantages de conception déjà cités, la fabrication par ajout de matière permet aussi de diminuer les temps de disponibilité des pièces ainsi que les impacts engendrés par les transports (entre le lieu de production et le lieu d'utilisation). En effet, les centres de fabrication peuvent être rapprochés du centre d'utilisation. On parle alors de dématérialisation de la chaîne de production. La pièce à produire peut être transmise sous forme de fichier numérique et fabriquée proche du lieu de consommation. Cela permet alors de diminuer l'impact environnemental dû à la phase de transport qui est une source d'impacts environnementaux importante. Les entreprises manufacturières y gagnent aussi car elles ont besoin de très peu de temps pour adapter leur chaîne de production au marché ("Changeover time").

Ce projet a permis de mettre en avant les possibilités de la fabrication additive dans le but de minimiser les impacts environnementaux globaux d'un produit. De plus, à la suite de ce projet, un outil logiciel a été développé afin de permettre à l'utilisateur de bénéficier d'une aide dans le but de l'orienter dans le choix de procédés minimisant soit l'impact environnemental, soit l'impact économique. Une des conclusions de ce projet est que la fabrication additive peut être très fortement bénéfique aux domaines de l'aéronautique et du transport terrestre étant donné les possibilités de minimisation de masse des pièces embarquées.

3.5 Synthèse

Les efforts pour caractériser la performance environnementale des procédés de fabrication par ajout de matière ont souvent porté sur la consommation d'énergie électrique de ces procédés. Dans cette partie, nous avons analysé les différentes études menées sur ces aspects. On peut s'apercevoir que peu d'études s'intéressent à la consommation de fluides et de matières pour ces procédés.

Ce manque de données est sans doute dû à la jeunesse de ce procédé de fabrication. Néanmoins, nous l'avons déjà souligné, il est important dans ce contexte d'analyse environnementale de prendre en compte l'ensemble des flux traversant le procédé afin d'évaluer sa performance environnementale de façon la plus complète possible.

4 Intégration de la performance environnementale dans la chaîne numérique complète

La chaîne numérique des procédés de fabrication est assez complexe. En effet, entre l'idée du concepteur associée à sa conception du produit et le produit final il y a un certain nombre d'étapes permettant la mise en forme de ce produit. De ce point de vue, la fabrication par ajout de matière à tendance à réduire cette chaîne numérique au minimum. Le cas ("simple") de l'imprimante 3D permet d'illustrer ce concept. Entre la conception du produit et sa réalisation l'utilisateur n'a qu'à imprimer sa pièce. Néanmoins, cette chaîne numérique n'est pas aussi simple pour l'ensemble des autres technologies. Il est alors intéressant de se demander à quel niveau de la chaîne numérique l'information associée à l'impact environnemental doit être placée. Autrement dit, cette information doit-elle être disponible en phase de conception ou de fabrication.

Les études citées dans les sections précédentes se contentent d'analyser post-process l'impact environnemental associé au moyen de production. En général, les auteurs déduisent des études qu'ils ont menées des règles à appliquer afin de minimiser l'impact environnement des pièces suivantes. Or, cette démarche nécessite la mise en place de campagnes d'expérimentations et de caractérisations. Ces campagnes de caractérisation peuvent être contraignantes et il est possible de s'en passer comme nous allons le voir dans la suite de cette section.

4.1 Consommation d'énergie électrique et chaîne numérique

Une autre façon intéressante d'évaluer l'impact environnemental d'un procédé est de le faire avant la phase de fabrication. En effet, la mise en place de méthodes d'évaluations pre-process permettent de prévoir puis de diminuer (d'optimiser) les consommations de flux. Pour cela, il faut donc proposer des modèles qui vont être capable de prévoir les consommations, le plus précisément possible, puis d'analyser les facteurs qui ont le plus fort impact afin de proposer une optimisation permettant la réduction de ses consommations.

Dans ses travaux de thèse, Ioan Oliver Avram [Avram2010] a développé un tel outil. Cet outil permet d'analyser à partir d'instructions de pilotage machine (code G) la consommation d'énergie électrique de la fabrication d'une pièce associée à ce programme. Cette méthodologie a été développée pour les procédés de fabrication par enlèvement de matière.

La figure 2.22 illustre la méthodologie développée par Avram durant ses travaux de thèse qui s'intègre au sein de la chaîne numérique. L'outil développé permet d'estimer la consommation de l'outil de production à partir du fichier de pilotage de la machine. Depuis ce fichier, une première étape consiste à interpréter les instructions de la machine. Puis en estimant la force de coupe nécessaire à la fabrication de la pièce, la méthodologie permet d'évaluer la consommation électrique de la machine en phase de production. Néanmoins, aucune possibilité de retour sur la conception n'est possible dans le cadre de cette méthodologie.

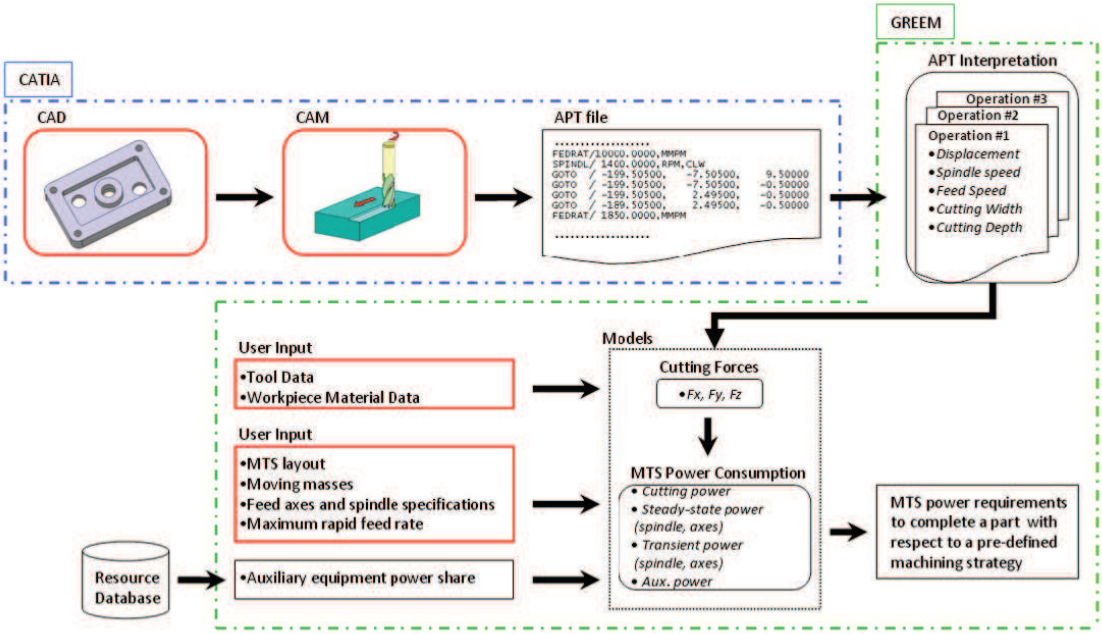


Figure 2.22 – Représentation schématique de la méthodologie permettant d'estimer la puissance électrique nécessaire [Avram2011]

Plus récemment, l'équipe de David Dornfeld du LMAS, Laboratory for Manufacturing And Sustainability, de l'Université de Berkeley a proposé un outil d'évaluation de l'impact environnemental inclut dans la chaîne numérique du procédé de fabrication [Kong2011]. À partir de la connaissance du programme, des paramètres machines et de la région de production, ils déterminent les émissions de gaz à effet de serres associées à la pièce à fabriquer. La figure 2.23 illustre la méthodologie. Cet outil d'évaluation moins complexe que celui proposé par Avram, estime le temps de fabrication nécessaire pour produire la pièce. En associant ce temps de fabrication aux puissances absorbées pour des phases d'usinages représentatives de la pièce à produire (puissance absorbée contenue dans une base de données) ils estiment la consommation d'énergie électrique traduites par la suite en émissions de gaz à effet de serres.

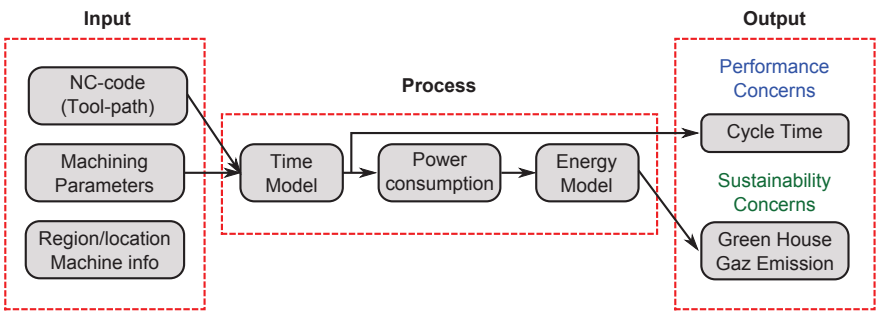


Figure 2.23 – Architecture du logiciel de simulation [Kong2011]

4.2 Synthèse

Le concept de l'intégration dans la chaîne numérique de données liées à la consommation d'énergie électrique commence à se développer. Les deux études précédentes illustrent cette intégration dans la chaîne numérique. Ce concept est intéressant car il permet d'évaluer la consommation d'énergie électrique avant la phase de fabrication contrairement aux études se contentant d'analyser la consommation post-process.

Néanmoins, on remarque un manque d'informations permettant d'évaluer l'impact environnemental dû au procédé de fabrication. Les modèles d'intégration proposés n'évaluent que la consommation électrique du procédé. Or la consommation électrique n'est pas la seule source d'impact environnemental des procédés. Des données concernant la consommation de fluides ou de matières doivent être intégrées dans cette chaîne numérique afin de proposer une vision plus détaillée de l'impact environnemental associé au programme généré.

Pour finir, il serait tout aussi intéressant de mettre en place une boucle de retour permettant aux concepteurs ou aux fabricants d'adapter leurs productions afin de minimiser leurs impact sur l'environnement.

5 Synthèse et positionnement de nos travaux de recherche

5.1 Synthèse

L'ensemble des parties de ce chapitre nous ont permis de réaliser l'état de l'art concernant les méthodes employées afin de minimiser l'impact environnemental des procédés de fabrication.

Pour les procédés plus traditionnels tel que l'usinage, les modèles locaux, tels que ceux développés en lien avec la théorie de la coupe, permettent d'évaluer précisément la consommation électrique de certaines entités des machines-outils. Néanmoins, d'un point de vue plus global, les modèles permettant d'évaluer la consommation de la totalité de la machine restent moins précis. En couplant des approches locales, citées précédemment, et des approches globales basées sur l'état physique du procédé on peut envisager d'évaluer finement la consommation de ces derniers. Néanmoins, on ne retrouve pas de telles approches couplant ces deux points de vues.

De plus, les approches menées sont généralement très centrées sur la coupe ou le procédé et ne prennent pas en compte l'ensemble des étapes nécessaires à la production d'un produit (fabrication du brut, finition, recyclage des déchets, par exemple).

En fabrication additive, on ne retrouve pas de modèles précis permettant d'évaluer la consommation énergétique du procédé tels qu'ils ont pu être développés en usinage en se basant sur la théorie de la coupe. Il semble qu'il y ait un manque de connaissances du fonctionnement réel du procédé afin d'en déterminer des lois de comportements qui permettraient d'évaluer la

consommation électrique en phase de fabrication. Il est actuellement possible de mesurer la consommation énergétique du procédé mais il n'est pas possible de l'évaluer et de la prédire.

De plus, que ce soit en usinage ou en fabrication additive, 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 consommés.

Il faut noter que certaines études, essentiellement en usinage, vont un peu plus loin et prennent en compte la consommation de fluides et de matières dans la phase de production. Ces études visent à diminuer, par exemple, la consommation de lubrifiant de coupe en proposant des technologies de lubrification alternatives. Néanmoins, en restant centré sur le procédé et sur les améliorations locales possible, les impacts environnementaux engendrés par ces nouvelles technologies ne sont pas pris en compte. Par exemple, l'utilisation d'azote pour refroidir l'outil est une technique permettant de diminuer l'utilisation de fluides de coupe mais dans ce cas il est nécessaire de prendre en compte la production d'azote. Ces études ne sont possibles qu'avec une vision globale du processus de fabrication.

Pour finir, l'intégration dans la chaîne numérique de données environnementales est nécessaire pour pouvoir proposer par la suite des possibilités d'amélioration des produits conçus. Ces données environnementales doivent contenir l'ensemble des flux consommés ou émis par le procédés, que ce soit la matière première ou l'énergie électrique mais aussi les émissions de déchets et de gaz. Toutes ces données doivent alors être converties en impacts environnementaux afin de pouvoir être comparées entres elles.

5.2 Positionnement de nos travaux de recherche

La méthodologie que nous avons développée et qui sera présentée dans le chapitre suivant a pour objectif de répondre à l'ensemble des verrous scientifiques qui ont été levés dans ce chapitre. Cette dernière permet de prendre en compte les impacts environnementaux associés à la phase de fabrication de pièces mécaniques. Ses objectifs sont doubles.

Dans un premier temps, il est nécessaire de pouvoir évaluer pré-process la consommation de l'ensemble des flux traversant le système. Cette prédiction nécessite alors la mise en place de modèles locaux modélisant le comportement de la machine. Ces modèles de prédiction pourront être introduits dans la chaîne numérique complète. Ils doivent être à la fois liés finement aux moyens de production mais il est aussi nécessaire que ces modèles prennent en compte toutes les étapes permettant la mise en forme de la pièce.

Dans un second temps, nous souhaitons garder une vision globale des possibilités offertes par la fabrication additive. Pour cela, l'intégration de ces données environnementales dans la chaîne numérique permet de mettre en place une boucle d'optimisation offrant la possibilité de

proposer soit au concepteur soit au fabricant une vision des impacts environnementaux générés par la conception ou par les paramètres de fabrication.

La méthodologie développée est illustrée par la figure 2.24. Cette méthodologie présente à la fois l'évaluation de la consommation associée au couple pièce-procédé mais aussi à la boucle d'optimisation. Dans le troisième chapitre de ce manuscrit, nous développerons cette méthodologie d'évaluation de la performance environnementale des procédés de fabrication par ajout de matière. Dans le quatrième chapitre, nous présenterons un exemple d'application pour le procédé de fabrication par projection de poudres.

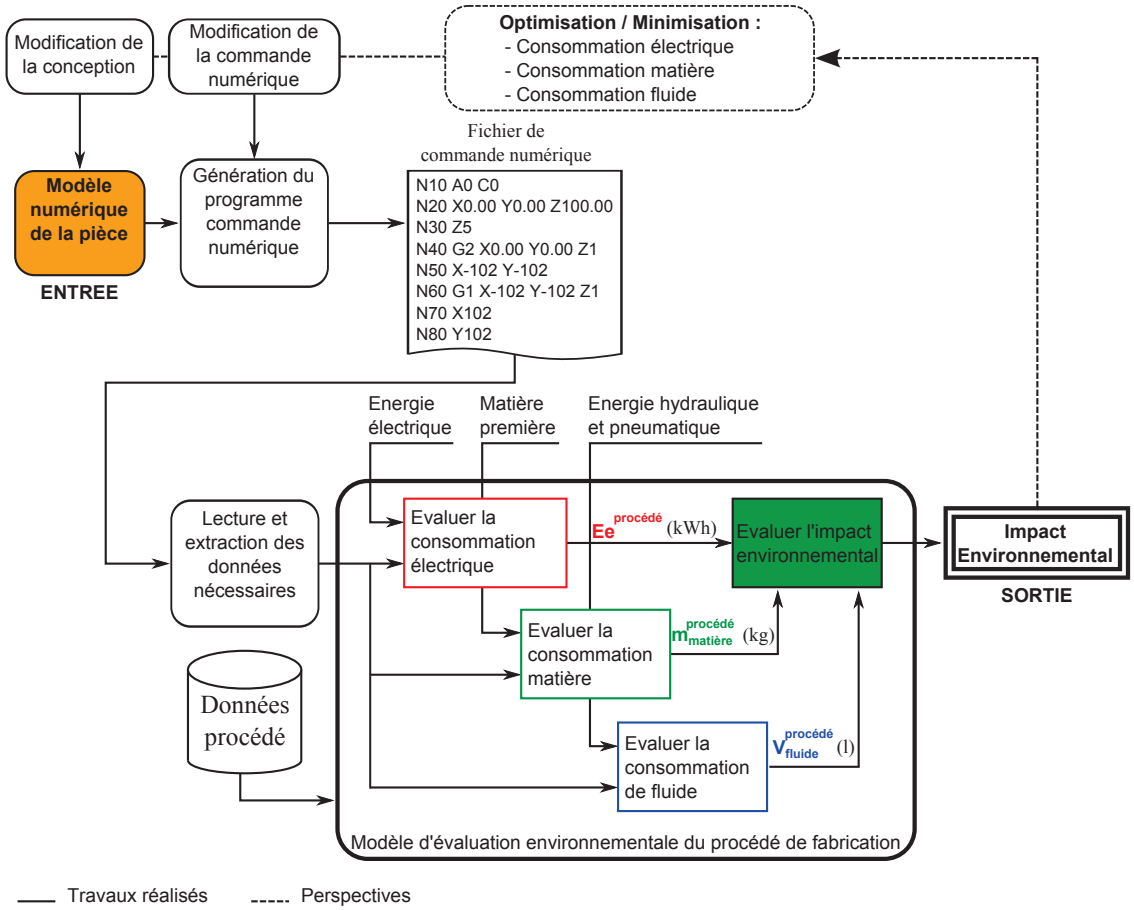


Figure 2.24 – Méthodologie d'évaluation de la performance environnementale des procédés de fabrication [Le Bourhis2013]

3

Méthodologie d'évaluation environnementale d'un procédé de fabrication

Sommaire

1 **Approche générale** 60
2 **Modélisation du procédé de fabrication** 62
3 **Synthèse sur la méthodologie** 75

Dans le troisième chapitre de ce manuscrit nous allons présenter la **méthodologie d'évaluation environnementale d'un procédé de fabrication** proposée afin de répondre aux différents verrous scientifiques identifiés précédemment. Ce chapitre est décomposé en trois parties.

Dans une première partie, nous prendrons un peu de recul sur le process pour nous intéresser à l'**approche générale** du processus conduisant à la production d'une pièce mécanique. En effet, il est important, dans le cadre d'une étude s'appuyant sur la méthode d'analyse du cycle de vie, de s'intéresser à l'ensemble des phases menant à la production d'un produit afin de limiter les transferts d'impacts en phase de fabrication.

Dans la seconde partie nous nous intéresserons plus particulièrement au process de fabrication. Nous **modéliserons** d'un point de vue environnemental **le procédé de fabrication**. Les impacts environnementaux générés lors de cette étape sont essentiellement dus à la consommation de ressources et à la production de déchets. C'est donc cette approche couplant l'ensemble des consommations qui sera présentée.

Pour finir, nous **synthétiserons** sur les apports d'une telle méthodologie.

1 Approche générale

La méthodologie d'évaluation de l'impact environnemental des procédés de fabrication que nous avons développée durant ces travaux de thèse a pour objectif de lever les verrous scientifiques que nous avons précisés dans le chapitre précédent.

Cette méthodologie, basée sur notre connaissance fine des procédés de fabrication, permettant d'analyser la performance environnementale de ces derniers, prend en compte deux aspects. Le premier, orienté processus de fabrication et illustré par la figure 3.1, s'intéresse à l'ensemble des étapes de mise en forme d'une pièce mécanique. Le second, orienté process, illustré par la figure 3.2, a pour objectif d'évaluer quantitativement l'ensemble des consommations de ressources du couple pièce-procédé.

La production d'un produit s'effectue généralement par la succession d'étapes de mise en forme. En effet, il est rare de produire une pièce directement en n'utilisant qu'un seul procédé. La figure 3.1 illustre un de ces ordonnancements d'étapes.

Il est donc nécessaire, lorsque que l'on s'intéresse à la performance environnementale d'un couple pièce-procédé(s), de prendre en compte l'ensemble des étapes nécessaires à la mise en forme du produit final. Il n'est pas suffisant de s'intéresser qu'à l'étape de mise en forme prépondérante dans la fabrication d'un produit. En effet, une vision ne s'intéressant qu'à cette phase de mise en forme peut conduire à une analyse faussée car les impacts environnementaux qui pourraient être minimisés lors d'une phase de mise en forme peuvent être reportés sur une autre étape. Par exemple, il semble peu judicieux de ne s'intéresser qu'à l'étape de fabrication par projection de poudres sans s'intéresser aux étapes de production de la poudre et/ou de finition de la pièce. La part de l'impact environnemental engendré par la projection de poudres par rapport à l'impact environnemental global dû à la production de la pièce est peut être minime comparé aux étapes nécessaires pré et post projection. Il en va de même pour l'usinage, où l'ensemble des étapes de production du brut de la pièce, de recyclage des copeaux par exemple doivent être pris en compte dans l'analyse environnementale associée au procédé d'usinage.

Pour cela, une vision globale, comme celle proposée par l'outil d'analyse du cycle de vie, doit être utilisée pour évaluer la performance environnementale d'un processus de fabrication.

Sur cette figure, nous avons, de plus, recontextualisé la phase de fabrication vis-à-vis de l'ensemble des autres étapes de vie du produit.

Comme le montre cette figure, l'étude pour laquelle nous développons des modèles se focalise plus précisément sur la phase de fabrication. En effet, la fabrication de pièces mécaniques est souvent vue comme une boite noire dans laquelle il y a un manque cruel de données afin d'alimenter les bases de données qui servent à réaliser des ACV de produits.

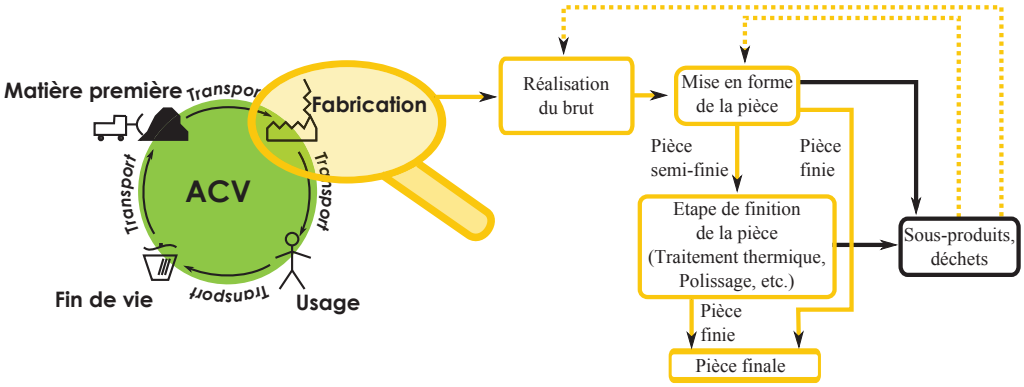


Figure 3.1 – Focus sur l'étape de fabrication lors d'une analyse de cycle de vie d'un produit

La méthodologie que nous proposons s'intéresse donc à l'ensemble des étapes de fabrication d'un produit. Cette réflexion autour de l'analyse du cycle de vie, nous a conduit à nous placer dans le cadre du cycle de fabrication. Les étapes de fabrication prises en compte dans cette analyse globale sont :

1. L'étape de production du brut de la pièce. Cette étape consiste à obtenir la forme brute qui servira de matière première pour l'étape de mise en forme. Ce brut peut être de différentes formes. Soit sous forme de lopins ou de cylindres de matière dans le cas de l'usinage, soit sous forme de poudres métalliques ou plastiques dans le cas de la fabrication additive, soit sous forme de granules de polymère dans le cas de l'injection plastique voire sous forme de matière en fusion dans le cas de la fonderie. Cette matière première servira de base par la suite pour le procédé de mise en forme.

2. L'étape de mise en forme de la pièce. Cette étape consiste, grâce à un ensemble de processus de fabrication ou sous-étapes, à transformer la matière première, obtenue à l'étape précédente, en une pièce finie ou semi-finie. C'est dans cette étape que l'on retrouve le procédé de mise en forme de la pièce. On y retrouve les procédés d'usinage, de fabrication additive, de fonderie, d'injection plastique, de forge, de découpe, etc. On parle de pièce finie ou semi-finie car à la sortie de cette étape de fabrication, la pièce n'a pas forcément les caractéristiques dimensionnelles ou structurelles attendues par le cahier des charges. Il est donc nécessaire de réaliser une étape de finition qui permettra de répondre au cahier des charges du client.

3. L'étape de finition de la pièce. Cette dernière étape, incluse dans l'ensemble de l'étape de fabrication, permet d'obtenir la pièce finale aux dimensions et caractéristiques attendues. Pour les procédés de fonderie ou de fabrication additive cette étape peut être une étape d'usinage. En effet, les pièces obtenues en sortie de ces procédés ne sont généralement pas utilisable telles qu'elles. Cette étape peut aussi être l'occasion de réaliser des traitements thermiques tels que la trempe ou le recuit, permettant de relâcher les contraintes internes induites par le procédé de mise en forme sur la matière, pour les procédés d'usinage par exemple.

4. L'étape de recyclage des déchets de production. Ces déchets peuvent être de différentes natures mais doivent être pris en compte pour que l'on puisse évaluer de façon pertinente l'impact environnemental global du couple pièce-procédé. Dans cette étape on retrouve le recyclage des déchets métalliques ou le recyclage des fluides nécessaires lors de la production. Ces déchets peuvent être par exemple soit des copeaux métalliques, issus de l'usinage lors des étapes de mise en forme du produit ou de finition du produit, soit de la poudre métallique, issue de poudre non fusionnée dans le cas de la fabrication additive, ou des déchets plastiques. Associés à ces déchets de matières premières, on retrouve aussi les fluides à traiter issus de la production tels que les fluides de coupe pour l'usinage.

La connaissance de l'ensemble des étapes de fabrication est essentielle afin de proposer une vision globale et complète de l'impact environnemental associé à la pièce produite. À partir de cette connaissance, il est ensuite possible de définir une modélisation de chacune de ces étapes d'un point de vue environnemental.

2 Modélisation du procédé de fabrication

La modélisation précise de chacune des étapes de fabrication est essentielle afin d'évaluer la performance environnementale du système de production. Dans les bases de données utilisées lors d'analyse du cycle de vie on retrouve des informations sur l'ensemble de ces étapes de fabrication. Par exemple, la base de données EcoInvent ou le module Solidworks Sustainability utilisent une vision macroscopique pour les données qu'elles exploitent. Pour les procédés d'usinages ces bases de données utilisent une valeur moyenne globale, consommation par litre de matière enlevées, permettant de "caractériser" le procédé. Or cette vision globale ou macroscopique ne permet pas de prendre en compte, par exemple, l'influence des paramètres de fabrication sur la consommation énergétique finale. Ainsi, ces données sont souvent peu précises. De plus, elles ne sont qu'une image d'un procédé et ne permettent pas de mettre en avant la relation entre les paramètres de fabrication, la pièce à produire et l'impact environnemental.

De ce fait, une modélisation des étapes de fabrication prenant en compte les paramètres d'entrée de la machine est nécessaire. L'objectif de ce modèle est dans un premier temps de pouvoir prédire l'ensemble des consommations générant l'impact environnemental du procédé. Puis, dans un second temps, de mettre en place une boucle de minimisation en jouant sur les paramètres de conception ou sur les paramètres de fabrication.

La figure 3.2 présente la vision globale de la méthodologie développée. Cette figure illustre la nécessité de prendre en compte l'ensemble des flux de matières, d'énergies et d'informations dans la modélisation des étapes de fabrication. À partir de la connaissance précise des procédés de fabrication, traduits sous forme de modèles, et des paramètres de fabrication, il est alors possible de faire le lien entre la conception de la pièce, modèle numérique, et les impacts environnementaux associés.

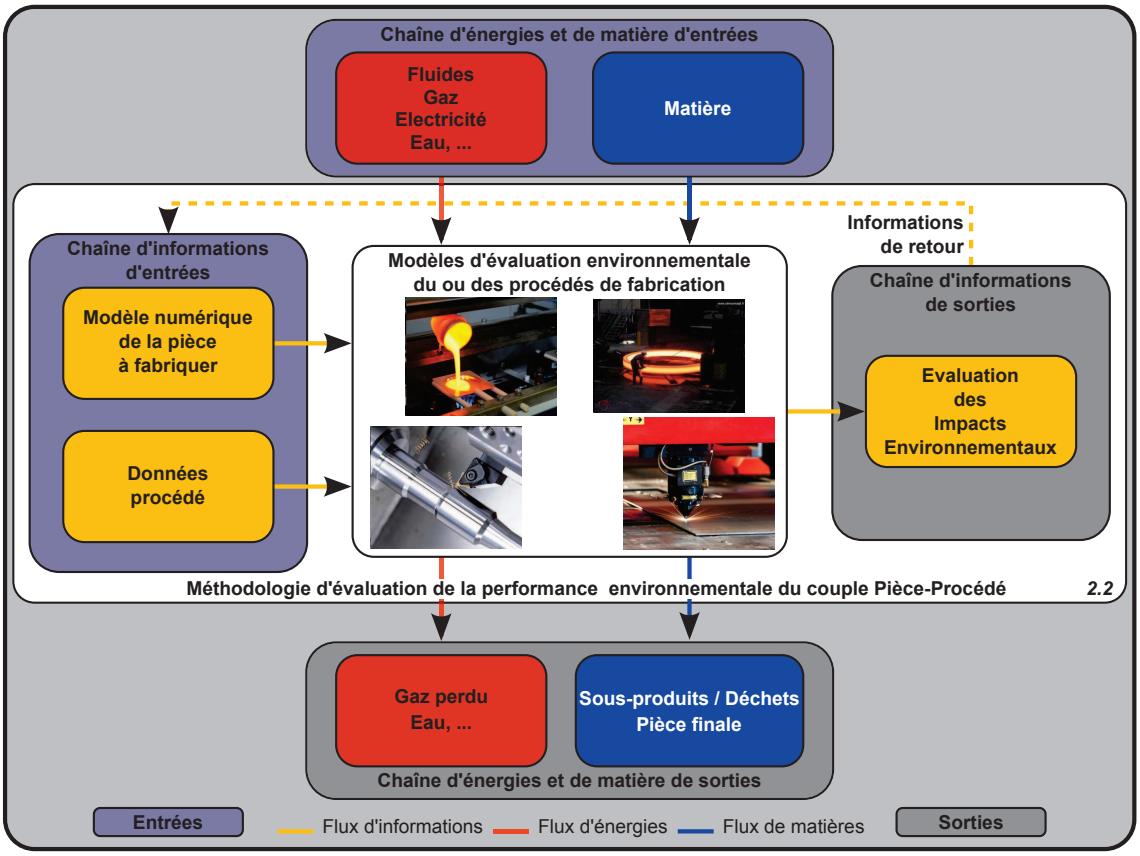


Figure 3.2 – Modélisation des flux de matières, d'énergies et d'informations dans la méthodologie développée

L'enjeu de la modélisation du procédé est donc de lier l'impact environnemental dû à la production d'une pièce à son modèle numérique.

La première étape nécessaire à la mise en place d'un modèle du procédé est de définir l'ensemble des flux qui seront pris en compte et par conséquent les limites de l'étude. En effet, dans la méthodologie développée nous proposons de prendre en compte l'ensemble des flux intervenant dans la fabrication de la pièce mais il est tout de même nécessaire de poser certaines limites à l'étude.

La figure 3.3 illustre les limites que l'on peut imposer à l'étude environnementale d'un procédé de fabrication. Cette figure s'intéresse plus particulièrement au procédé de fabrication par projection de poudres, mais la méthodologie développée permet de s'adapter à tous les types de procédé de fabrication.

On remarque sur cette figure que les consommations de gaz inerte, d'air comprimé, de fluides hydrauliques, de poudres métalliques ainsi que d'électricité sont prises en compte lors de l'évaluation environnementale. Néanmoins, il est important de souligner que les limites s'arrêtent à

Figure 3.3 – Limite CLAD

leur consommation comme il peut être indiqué dans la section 6.2 de la norme ISO 14955-1 qui définie les frontières du système lors d'une analyse environnementale d'une machine outil [ISO2012a].

En effet, nous ne nous intéresserons pas à la production du gaz inerte ni à la production des fluides hydrauliques ni à la production de l'air comprimé. De même, nous ne nous intéressons pas non plus à la fabrication de la machine.

Il serait possible d'extrapoler l'étude en intégrant la production de l'ensemble des intrants et la fabrication de la machine. Cela serait intéressant car une telle étude permettrait de montrer qu'un choix optimal des composants (les moteurs d'axes par exemple) ainsi que l'architecture de la machine permettent d'optimiser sa consommation énergétique. Ces études font déjà parties de recherches menées par Kroll et al. [Kroll2011] et l'équipe de Henri Paris [Nguyen2013].

On a pu remarquer lors de ces travaux de thèse que cette vision prenant en compte l'ensemble des consommations dues au procédé de fabrication a été développée suivant une approche peu différente dans les travaux de thèse de Karel Kellens. La méthodologie qu'il a développée lors de ses travaux de thèse vise à évaluer l'impact environnemental de tout type de procédé de fabrication en prenant en compte l'ensemble des flux traversant ce procédé.

Après avoir définit les limites associées à notre étude, nous allons définir les données nécessaires à la mise en place de l'évaluation environnementale du couple pièce-procédé.

2.1 Données nécessaires à la modélisation

Dans la méthodologie que nous avons développée, nous nous sommes fixés comme objectif de rester centrés sur le couple pièce-procédé. En effet, nous avons montré dans le chapitre précédent, que ce couplage est important car la géométrie de la pièce ainsi que son positionnement dans l'espace machine influent sur les consommations du procédé.

En proposant comme point d'entrée de notre méthodologie *le modèle numérique de la pièce* cela nous permet d'envisager la possibilité de minimiser les impacts environnementaux engendrés par la pièce en phase de fabrication en modifiant sa géométrie. De plus, il est ainsi possible de proposer aux concepteurs du produit un outil de visualisation graphique qui permettra d'indiquer les zones de la pièce pour lesquelles l'impact environnemental pourrait être optimisé.

De ce fait, la donnée d'entrée, représentant la pièce dans le couple pièce-procédé, de notre méthodologie est la conception de la pièce et plus particulièrement son *modèle numérique*. La connaissance précise du procédé de fabrication est essentielle afin de définir des modèles fins traduisant le comportement du procédé. Ceci se traduit naturellement par une connaissance des paramètres de pilotage de la machine ainsi que des actionneurs utilisés. Cette connaissance est stockée dans une *base de données*, définissant le procédé dans le couple pièce-procédé, qui sera utilisée lors de l'évaluation environnementale.

2.2 Ordonnancement de la méthodologie

La figure 3.4 illustre la méthodologie développée. Cette dernière a donc pour objectif de relier l'impact environnemental, sortie de la méthodologie, exprimé dans notre cas en millipoints, unité environnementale issue de la méthode Eco-Indicator 99, au modèle numérique de la pièce, fichier d'entrée dont les formats peuvent être divers et variés, issu généralement de logiciel de conception assistée par ordinateur. Cette méthodologie est décomposée en quatre étapes :

- Génération du programme numérique ;
- Lecture et extraction des commandes de pilotage ;
- Construction d'une base de données procédés ;
- Évaluation de l'impact environnemental.

Dans la suite de cette section nous décrirons différentes étapes de la chaîne numérique permettant de relier le fichier d'entrée à l'impact environnemental. On peut remarquer sur cette figure que la sortie de la méthodologie, l'impact environnemental, peut servir dans la boucle de retour ce qui permet de mettre en place une étape d'optimisation. En effet, il peut être intéressant pour le concepteur ou le fabricant de disposer d'outils lui indiquant les possibilités d'améliorations de son produit dans le but de diminuer l'impact environnemental global.

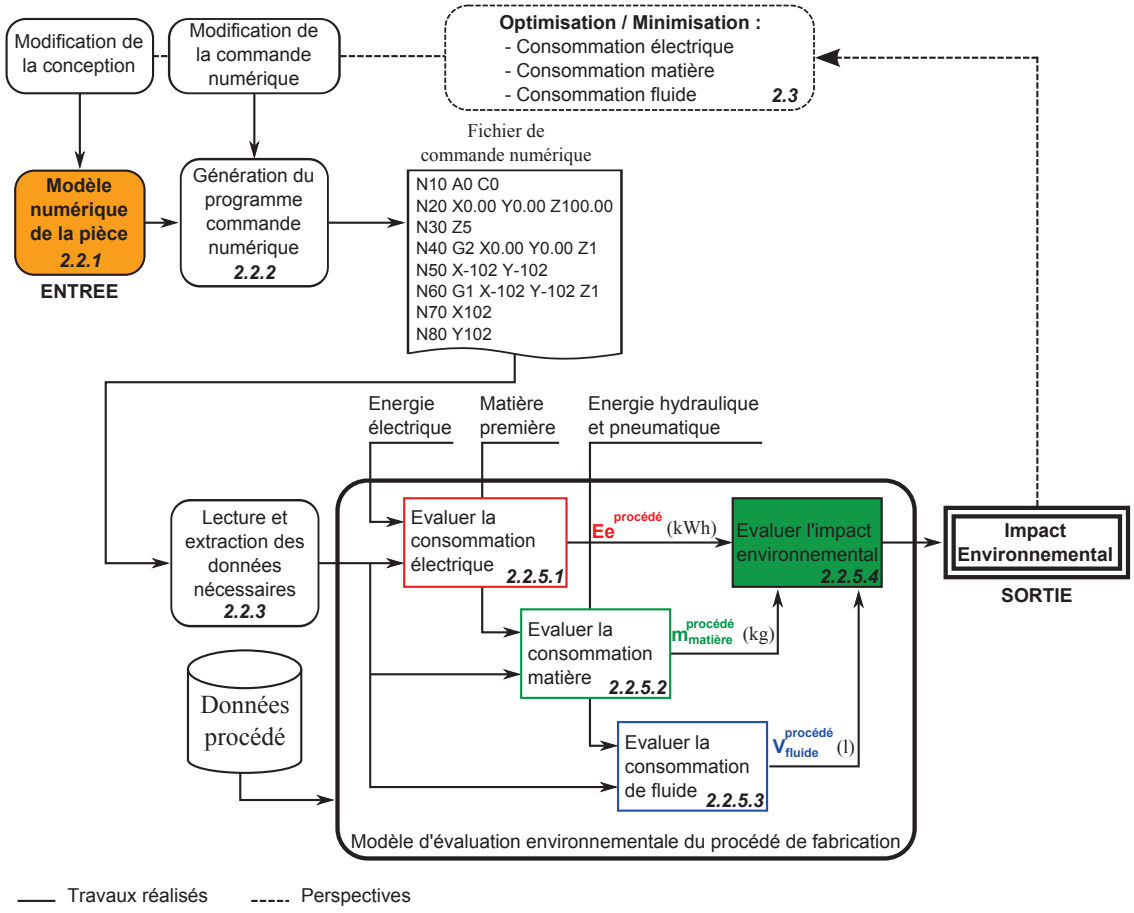
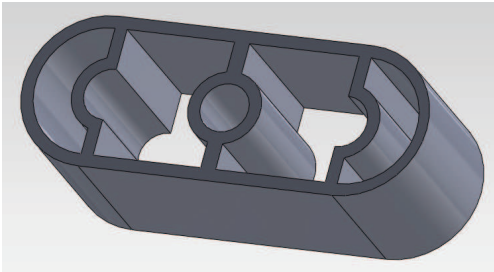


Figure 3.4 – Méthodologie d'évaluation de la performance environnementale du couple Pièce-Procédé [Le Bourhis2014]

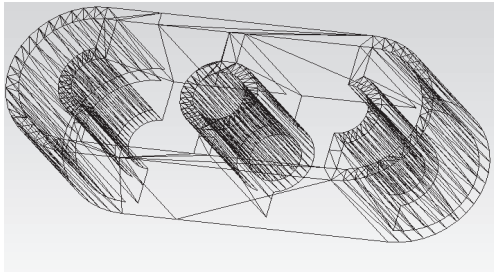
2.2.1 Création du modèle numérique de la pièce

Le modèle numérique de la pièce à concevoir est généralement le point d'entrée de tous les logiciels de fabrication assistée par ordinateur (FAO) permettant de générer les programmes de commande des procédés de fabrication. La problématique principale liée au modèle numérique est le format d'échange utilisé. En effet, le modèle numérique est discrétisé en éléments simples, des triangles ou des tétraèdres pour le format STL par exemple. La possibilité de traiter différents formats d'échanges doit être prise en compte. La figure 3.5 illustre ce qu'est un modèle numérique de pièce.

Dans notre méthodologie, le modèle numérique est considéré comme une image discrétisée de la pièce. Néanmoins, un modèle numérique peut contenir bien d'autres informations sur la pièce telle que son matériau, par exemple.



(a) Fichier numérique



(b) Fichier au format d'échange STL

Figure 3.5 – Exemple de modèle numérique de pièce

2.2.2 Génération du programme à commande numérique

À partir du modèle numérique de la pièce, une première étape consiste à générer le programme à commande numérique. Ce programme peut être généré soit par un logiciel de FAO associé à un post-processeur propre à chaque machine, soit manuellement par l'opérateur. Ce programme contient l'ensemble des données nécessaires au pilotage de la machine telles que les vitesses de déplacement ou les points de passage pilotés. Il contient aussi, pour les programmes utilisés en usinage, les vitesses de rotation de broche permettant d'atteindre les vitesses de coupe désirées. La commande définissant la vitesse de rotation de broche peut être remplacée par une commande définissant la puissance laser nécessaire dans le cas de la fabrication par ajout de matière.

Le code de programmation utilisé pour définir le pilotage de la machine est le code-G [ISO1980]. Ce code est une traduction du fichier discrétisé en ligne de commande - provoquant de ce fait une perte de données. Un exemple de commandes programmées en code G est illustré sur la figure 3.6.

```
G0 A3=0 B3=0 C3=0 F5000
X0 Y0
Z 92.00
N1 S1510
N2 G1 X0 Y0 Z 32
N3 X-61.2413 Y-120.1622 Z92.00
N4 X-61.2413 Y-120.1622 Z88.70
N5 X-55.21 Y-110 S5000
```

Figure 3.6 – Exemple de fichier en code G utilisé en usinage

Dans l'exemple de la figure 3.6 on peut distinguer huit lignes de commandes dont nous allons détailler le contenu. La première ligne permet de commander les axes A, B et C de la machine à leurs positions initiales (0) à la vitesse commandée, dont la valeur est précédée par la lettre F, de 5000 mm/min. Ensuite, les axes X et Y se mettent en mouvement pour rejoindre leur position initiale (0) à la même vitesse que la ligne précédente. En effet, lorsqu'aucune instruction de vitesse n'est donnée les axes se déplacent à la dernière vitesse programmée. La ligne quatre

définie la vitesse de rotation de la broche (1510 tours par minute). Cette valeur sera toujours précédée de la lettre S. À la ligne cinq, le programme déplace l'axe Z à la coordonnée Z = 32 mm à la vitesse de travail de la machine. Cette consigne de vitesse, dont la valeur est contenue dans la mémoire machine, est indiquée par la commande G1. Ensuite, les instructions sont lues ligne après ligne.

Le code-G est le langage de programmation le plus couramment utilisé pour le pilotage des machines outils. Néanmoins, ce type de code permet de traduire uniquement d'un point de vue géométrique la pièce à fabriquer. L'utilisation de ce langage de programmation peut atteindre des limites dans le cas, par exemple, de l'échange d'informations entre procédés ou phase de production. Il est impossible de réaliser des échanges bi-directionnels entre le fabriquant et le concepteur. Ce langage n'est utilisé que dans un seul sens, du concepteur à la machine outil. De plus, on ne peut pas y intégrer de données traduisant des résultats de simulation, ou utiliser ce type de langage pour échanger ou récolter des informations sur l'état du moyen de fabrication permettant de définir des données procédés. Cette thèse n'a pas vocation à remettre en question ce langage de programmation c'est pour cela que nous détaillerons pas plus ce paragraphe. De plus des travaux de thèse, tels que ceux de Renan Bonnard, ont été menés afin de définir les limites de ce langage afin de proposer de nouveaux langages de programmation pour l'échange d'informations et le pilotage de machines outils [Bonnard2010].

2.2.3 Lecture et extraction des données du programme à commande numérique

Les deux premières étapes de la méthodologie sont généralement réalisées automatiquement. La conception et la génération du programme à commande numérique sont des étapes classiques que le concepteur et le fabriquant sont amenés à réaliser. À partir du fichier de commande numérique nous allons devoir extraire les données nécessaires à l'évaluation environnementale du couple pièce-procédé.

Nous avons développé, avec le logiciel de calcul numérique Matlab® (2011b, The MathWorks, Rennes, France), un programme permettant d'extraire les données issues de ce fichier de commandes. Chaque ligne de commande est alors lue et chaque instruction est extraite. Ces instructions qui peuvent être des consignes de vitesses d'avance, des points de passages, des puissances laser commandées ou des vitesses de coupe sont stockées dans des matrices qui seront réutilisées par la suite.

Si on reprend l'exemple de la figure 3.6, lors de la lecture de la première ligne, les vecteurs correspondants aux instructions G, A3, B3, C3 et F seront complétés avec les valeurs associées à ces commandes. Il est tout de même nécessaire de compléter les autres vecteurs (X, Y, Z, S, etc.) avec les valeurs initiales. En effet, comme nous l'avons précisé si une instruction n'est pas associée à une valeur dans la ligne n, on considère que cette instruction à la même valeur que la celle de la ligne (n-1) ou (n-2) voire (n-k) si aucune valeur n'est associée à cette instruction avant la k^{ième} ligne précédente.

À chaque donnée (X, Y, Z, A, F, S etc.) correspond un vecteur qui sera complété en fonction des consignes se trouvant dans ce fichier.

2.2.4 Données procédés

Le langage de programmation en code-G ne pouvant pas contenir d'informations autres que les commandes de pilotages de la machine permettant de respecter la forme géométrique de la pièce, comme nous l'avons précisé dans la section 2.2.3, il est de nécessaire réaliser un certain nombre de mesures préalablement afin de pouvoir caractériser le procédé de fabrication.

Cette étape est donc la construction d'une base de données qui permettra de caractériser le procédé étudié. En effet, pour la suite de l'étude, il est donc nécessaire de connaître un certain nombre de paramètres propres à la machine tels que le moment d'inertie de chacun des axes, l'accélération maximale, la consommation des entités, etc.

La figure 3.7 est un exemple de protocole permettant l'acquisition de données nécessaires permettant d'alimenter notre méthodologie.

Dans le cas de machines complexes, il est important, dans un premier temps, d'inventorier l'ensemble des unités (Étape 1 sur la figure 3.7) de la machine ayant un impact sur l'environnement soit en lien avec leur consommation d'énergie électrique, leur consommation de fluides ou encore leur consommation de matière première.

Pour obtenir toutes les informations relatives à la caractérisation des entités, il est nécessaire de réaliser une campagne d'essais sur les machines. Pour chaque entité, on détermine l'ensemble des paramètres influents la (ou les) consommation(s) de cette dernière (Étape 2 sur la figure 3.7). Puis, nous utilisons alors un protocole d'essai pour caractériser l'ensemble de ces entités. Ce protocole consiste en une succession de commandes (Étape 3 sur la figure 3.7) des différentes entités de la machine (moteur d'axes, broche d'usinage, laser, distributeur de poudres, etc.). Selon l'entité à caractériser et les flux d'entrée-sortie, les consignes sont différentes.

Pour les entités consommant de l'énergie électrique, ce qui est le cas de l'entité caractérisée dans l'exemple de la figure 3.7, nous enregistrons la puissance électrique absorbée en fonction de la consigne (Étape 4 sur la figure 3.7). Puis, nous évaluons la réponse de l'entité en fonction de la consigne sous forme de courbe de réponse (Étape 5 sur la figure 3.7), à laquelle nous associons une fonction polynôme approximant cette courbe. Cette démarche est répétée pour l'ensemble des entités et les résultats, qui peuvent être exprimés sous forme de courbe de réponse (puissance absorbée en fonction de la vitesse pilotée par exemple), sont stockés dans la base de données procédé.

Il en va de même, pour l'ensemble des entités composant la machine, on détermine le rendement de chacune de ces entités.

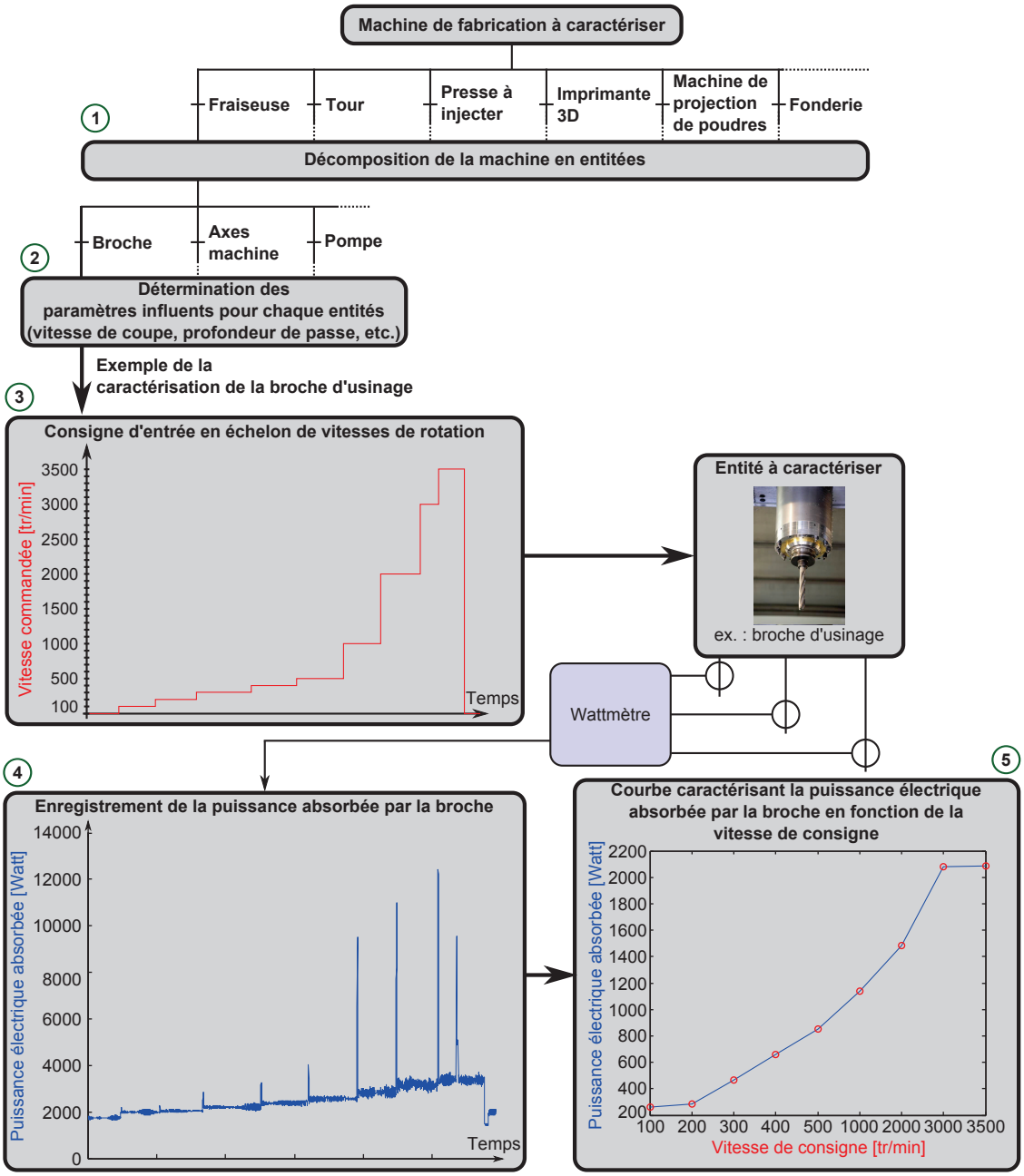


Figure 3.7 – Exemple de protocole d'acquisition de données pour une fraiseuse 3 axes, Vernier CV600

La base de données construite servira par la suite lors de l'évaluation de l'impact environnemental du procédé.

2.2.5 Évaluation de l'impact environnemental

Cette étape d'évaluation de l'impact environnemental répond au verrou scientifique identifié dans la bibliographie. Dans cette étape il est question d'évaluer, dans un premier temps, l'ensemble des consommations d'électricité, de matières premières et de fluides, exprimées respectivement en kWh, kilogrammes et litres, et de déchets de production des entités de la machine en fonction du programme de pilotage de la machine. Ces consommations seront ensuite traduites en impact environnemental pour pouvoir être comparées par la suite. Cette évaluation donne lieu à quatre étapes dont trois sont menées en parallèles (évaluation de la consommation électrique, évaluation de la consommation de matière, évaluation de fluides).

i. Consommation électrique.

L'évaluation de la consommation électrique est une étape nécessaire dans l'évaluation environnementale du procédé de fabrication. Comme nous avons pu le voir dans le chapitre précédent, un certain nombre d'études proposent des modèles afin de caractériser le plus précisément possible la consommation électrique d'un procédé en fonction de la commande.

Pour déterminer - avec justesse - la consommation électrique d'un process, il est important dans un premier temps de connaître l'ensemble des entités liées à la machine dont la consommation électrique doit être prise en compte. On parle ici d'entités liées à la machine car la prise en compte uniquement des entités physiquement présente sur la machine ne suffit pas. Cette réflexion rejoint la réflexion menée par Karel Kellens dans ses travaux de thèse [Kellens2013]. On peut prendre l'exemple d'une unité de régulation de température pour des axes machines dont la consommation peut être importante mais qui est déportée de la machine. Cela va de même pour des unités d'évacuation de gaz.

Une fois ces entités identifiées, une donnée importante pour évaluer la consommation énergétique d'un procédé est le temps de fabrication ou le temps durant lequel les entités de la machine absorberont une puissance électrique. Une évaluation de ce temps de fabrication peut être obtenu à partir d'équations mécaniques régissant le comportement de la machine. On ne peut pas ignorer les écarts entre le temps de fabrication réel et le temps simulé même si les modèles de prédiction sont de plus en plus précis. Or, ces écarts ont une importance non négligeable sur l'énergie électrique consommée. En effet, même si les simulations de puissance absorbées peuvent être précises, l'intégration de cette puissance sur un temps de fabrication plus ou moins correct peut conduire à des erreurs. C'est donc ce produit puissance, temps de fabrication qui doit être précis. Une connaissance précise du temps de fabrication permettra une estimation de la consommation électrique la plus précise possible.

Les données du procédé contenues dans la base de données associées aux données issues soit du programme à commande numérique (vitesses, positions, etc.) soit d'équations régissant le fonctionnement du système permettent de connaître la consommation d'énergie électrique associée à ce programme. Ce programme permet de piloter la machine qui fabriquera la pièce

considérée, définie par son modèle numérique. Or il est important de noter que ce programme n'est pas spécifique à la pièce, plusieurs programmes à commande numérique peuvent être utilisés pour fabriquer la même pièce. Les différences entre ces programmes se feront alors à la fois sur la consommation de la machine mais aussi sur la qualité de la pièce produite.

ii. Consommation de matière.

La consommation de matière première fait partie des trois sources d'impacts liées au procédé de fabrication. Il est donc nécessaire de pouvoir déterminer et surtout de prendre en compte cette consommation dans une méthodologie d'évaluation environnementale. Cette consommation peut être de trois types.

Pour les procédés par enlèvement de matière, la consommation de matière première est due à la production de déchets métalliques sous forme de copeaux. Dans notre méthodologie, c'est cette consommation qui sera prise en compte dans le cas de tels procédés. Pour ce type de procédé, la connaissance du débit de copeaux et du temps de fabrication permet de déterminer la matière consommée.

Pour les procédés par ajout de matière, de soudage, d'injection ou de fonderie, cette consommation est essentiellement due au rendement matière du procédé. En effet, pour les procédés par ajout de matière, une partie de la poudre peut ne pas être fusionnée alors qu'elle a été soit projetée soit déposée dans un lit de poudre. De même, une partie de la matière déposée dans les procédés de dépôt de fils fondus sert uniquement de support, cette matière doit être supprimée à la fin de la fabrication.

De plus, n'oublions pas de prendre en considération la consommation de matière pour la pièce produite. C'est à dire la matière qui constituera la pièce finie ou semi-finie. On parle de pièces semi-finie pour les pièces où on laisse, volontairement, une sur-épaisseur de matière afin de réaliser une étape de finition (présentée sur la figure 4.3) afin d'ajuster les dimensions de la pièce aux dimensions du cahier des charges.

Afin de pouvoir comparer les procédés entre eux, il semble évident que cette consommation de matière première doit être prise en compte. En effet, il peut s'avérer que, pour des applications de type aéronautique où le buy to fly ratio peut atteindre 10 à 20 %, 80 % de la matière première soit enlevée pour obtenir la pièce finale. D'autant plus que ces pièces peuvent être réalisées dans des matériaux (tel que le titane) dont l'extraction a un fort impact environnemental.

iii. Consommation de fluides.

L'évaluation de la consommation de fluides dans les procédés de fabrication est une donnée souvent manquante lors de l'analyse environnementale de la phase de production. Dans la méthodologie développée, nous avons voulu prendre en compte cette consommation. Pour cela, il

est nécessaire de distinguer l'ensemble des fluides dont la consommation sera affectée ou non par le procédé.

En effet, on peut distinguer d'une part les fluides dont la consommation sera dépendante de la pièce produite. C'est le cas des gaz inertes dans les procédés de fabrication par soudage par exemple. Ces gaz servent en partie à isoler le bain de fusion de l'oxygène présent dans l'air extérieur qui aurait pour conséquence d'oxyder le matériau en fusion. La consommation de ces gaz dépend directement 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, on peut classer les fluides dont la consommation ne dépendra pas directement de la pièce produite. Ces fluides sont souvent utilisés par des entités annexes mais leur consommation doit être prise en compte. C'est le cas des fluides servant au refroidissement des machines. Ces fluides sont changés régulièrement mais leur consommation n'est pas directement liée à la pièce produite. De même, pour les fluides de lubrification dans les procédés d'usinage dont une partie est consommée soit par évaporation soit lors de l'évacuation de la pièce finie. Pour ces fluides, il sera difficile de relier leur consommation avec le temps de fabrication de la pièce. Néanmoins, en connaissant la fréquence de changement de ces fluides et le nombre de pièces produites ou le taux de charge de la machine durant cette période, on pourra associer une fraction de fluide consommé par pièce pour l'évaluation environnementale.

Pour évaluer la consommation de fluides il est donc nécessaire de référencer l'ensemble de ces fluides utilisés par le procédé (fluide de coupe, gaz inerte, fluide hydraulique, etc.).

iv. Traduction en impact environnemental.

Les sources d'impacts issus des différentes consommations citées précédemment n'étant pas exprimées dans une unité comparable, une étape d'évaluation environnementale devient nécessaire. Cette étape permet à la fois de traduire ces consommations en une unique unité sommable mais elle permet aussi de relativiser la consommation de chaque source d'impact les unes par rapport aux autres. Si l'on prend un exemple extrême, la consommation d'une tonne d'acier a un impact bien moindre sur l'environnement que la consommation d'un kilogramme de matière radioactive. Cette étape a donc pour objectif de mettre en lumière ce genre de problème.

Dans notre méthodologie, nous avons utilisé la méthode d'évaluation Eco-Indicator 99 [Goedkoop1999]. Cette méthode d'évaluation environnementale orientée dommage permet d'exprimer l'ensemble des impacts environnementaux en millipoints, mPts (ou éco-points pour la méthode ReCiPe). Le Point étant défini comme l'impact environnemental causé par un européen moyen durant toute une année. Chaque consommation est alors traduite en mPts à l'aide de facteurs de caractérisation dont certaines valeurs sont données dans le tableau 3.1. Ces facteurs de caractérisation se retrouvent dans la base de données associée à cette méthode de quantification.

Elément	Type	Masse volumique (20°C, 1atm) (kg/m^3)	Facteur de caractérisation [fc] (mPts/kg)
Fluides de refroidissement	Eau distilllée	1 000	0.0026
Gaz conformeur/protecteur	Argon	1.7837	7.2
Gaz porteur	Argon	1.7837	7.2
Poudre métallique	Acier	7 800	86
Electricité	France		12 (mPts/kWh)

Tableau 3.1 – Facteurs de caractérisation issus de la méthode Eco-Indicateur 99

Cette méthode permet aussi de connaître l'ensemble des impacts locaux sur l'environnement. Il est par exemple possible de connaître la contribution de chacune de nos sources d'impacts sur l'eutrophisation de l'eau ou son acidification ou sur l'émission de gaz à effet de serre.

D'autres méthodes orientées dommages telles que la méthode Européenne ReCiPe [Goedkoop2013], utilisée par Karel Kellens dans ces travaux de thèse et qui est une évolution de la méthode Eco-Indicateur 99, la méthode Suisse Impact 2002+ [Jolliet2003], la méthode japonaise LIME [Itsubo2003] ou la méthode américain TRACI [Bare2006], auraient pu être utilisées mais dans le but de s'uniformiser avec les études précédentes, nous avons préféré utiliser la méthode Eco-Indicateur 99. Le choix de l'utilisation d'une méthode plutôt qu'une autre se fait à la fois en fonction des catégories d'impacts visées, de la localisation géographique, mais aussi en fonction de la documentation et de la transparence des données utilisées dans la méthode de quantification [Jolliet2004].

2.3 Boucle de retour

À partir de cet indice environnemental ou de l'ensemble des consommations, il est possible de revenir en amont afin de minimiser ou d'optimiser les consommations dans le but de diminuer l'impact environnemental global de la pièce conçue d'un point de vue fabrication. Pour cela, la boucle de retour mise en place permet de modifier soit le fichier de commandes numériques en comparant des trajectoires minimisant l'impact environnemental de la fabrication [Le Bourhis2013] ou en utilisant des paramètres machines optimaux [Le Bourhis2014], soit la conception de la pièce en proposant des formes adaptées à la fabrication additive minimisant l'impact environnemental global.

De plus, afin que le concepteur de la pièce puisse avoir conscience des impacts environnementaux engendrés par sa conception il est nécessaire qu'un retour lui soit donné sur sa conception. Ce retour peut être fait en décomposant la pièce sous forme d'octree auquel est associé un indice environnemental, tout comme il a pu être fait en terme de fabricabilité par Kerbrat et al. [Kerbrat2011].

3 Synthèse sur la méthodologie

Dans ce chapitre nous avons présenté la structure générale de la méthodologie que nous avons développée durant ces travaux de thèse. Cette méthodologie a pour objectif de lever les verrous scientifiques que nous avons évoqués dans le chapitre précédent. Cette méthodologie permet alors :

1. De prendre en compte l'ensemble des étapes de fabrication nécessaires à la production d'une pièce.
2. De prendre en compte l'ensemble des flux d'énergies et de matières utilisés en phase de fabrication afin d'en déterminer leur consommation.
3. Elle permet de plus de lier le modèle numérique de la pièce à l'impact environnemental engendré en phase de fabrication.
4. Pour finir cette méthodologie a été développée afin d'être utilisée dès la phase de conception.

La méthodologie que nous proposons répond à l'ensemble des contraintes imposées par l'analyse environnementale d'un procédé de fabrication. Elle associe à la fois une vision globale sur les étapes de fabrication et une vision locale associée au procédé de fabrication et au pilotage de ce dernier. En effet, nous avons pu voir dans le chapitre précédent que la consommation, en particulier d'énergie électrique, était liée à la fois au procédé de fabrication mais aussi à la pièce de part ses formes géométriques et son positionnement dans l'espace machine.

Dans le chapitre suivant, nous allons voir de quelle manière il est possible d'appliquer ce type de méthodologie au procédé de fabrication par ajout de matière et en particulier à la technologie par projection de poudres métalliques.

4

Application de la méthodologie au procédé par projection de poudres

Sommaire

1	**Introduction à la fabrication par projection de poudres**	78
2	**Atomisation de la poudre**	80
3	**Fabrication par projection de poudres**	91
4	**Valorisation de la poudre non fondue**	110
5	**Synthèse**	121

Dans ce chapitre, la méthodologie présentée précédemment sera appliquée à la technologie par projection de poudres. L'acceptation ainsi que le développement, dans le monde industriel, de cette technologie passe en outre par une caractérisation environnementale.

Le **procédé** sera présenté en détail dans une première partie.

Afin d'évaluer cette technologie selon la vision globale d'analyse de cycle de vie, nous allons nous intéresser dans **une deuxième partie**, à l'analyse environnementale de **la production de poudres par atomisation**.

Dans une **troisième partie**, nous évaluerons, en utilisant des **modèles analytiques ou empiriques**, **la performance environnementale de la technologie par projection de poudres**. Cette technologie permet de réaliser des pièces innovantes, aux formes complexes, mais son acceptation industrielle ne sera possible qu'à coût environnemental et de revient maîtrisé.

Dans une **quatrième partie**, nous verrons qu'une partie de **la poudre projetée précédemment nécessite un traitement post-fabrication** afin d'être réutilisée dans de bonnes conditions. Les travaux menés permettent de mettre en évidence les possibilités offertes par un recyclage de la poudre.

La **dernière partie** de ce chapitre permettra de synthétiser quant aux apports possibles de la technologie par projection de poudres d'un point de vue environnemental.

1 Introduction à la fabrication par projection de poudres

La fabrication additive par projection de poudres est une technologie relativement récente comparée aux technologies du type fusion sélective laser ou dépôt de fil fondu. Néanmoins, on peut remarquer une forte augmentation du nombre de publications et de dépôts de brevets ces dernières années autour de la projection de poudres. L'étude réalisée par l'équipe de Dubourg met en avant cette évolution depuis 1984 [Dubourg2008]. La figure 4.1 résume cette étude et permet de mettre en évidence la publication constante de brevets et l'augmentation de publications d'articles traitant des technologies de fabrication additive par projection de poudres. Nous avons repris et complété cette étude sur la publication d'articles scientifiques à partir de l'année 2006 jusqu'à 2013 en s'appuyant sur le moteur de recherche de ScienceDirect et entre autre du mot clé "Laser Cladding". On remarque une explosion du nombre de publications ces dernières années ce qui prouve que cette technologie intéresse de plus en plus la communauté scientifique. À l'origine, cette technologie était utilisée pour le rechargement de pièces métalliques afin de réaliser, entre autres, des opérations de maintenance. En imaginant projeter la matière non plus sur une pièce existante mais sur un substrat, qui pourra, ou non, être supprimé par la suite, il est alors possible de fabriquer des pièces fonctionnelles directement à partir de leur modèle numérique.

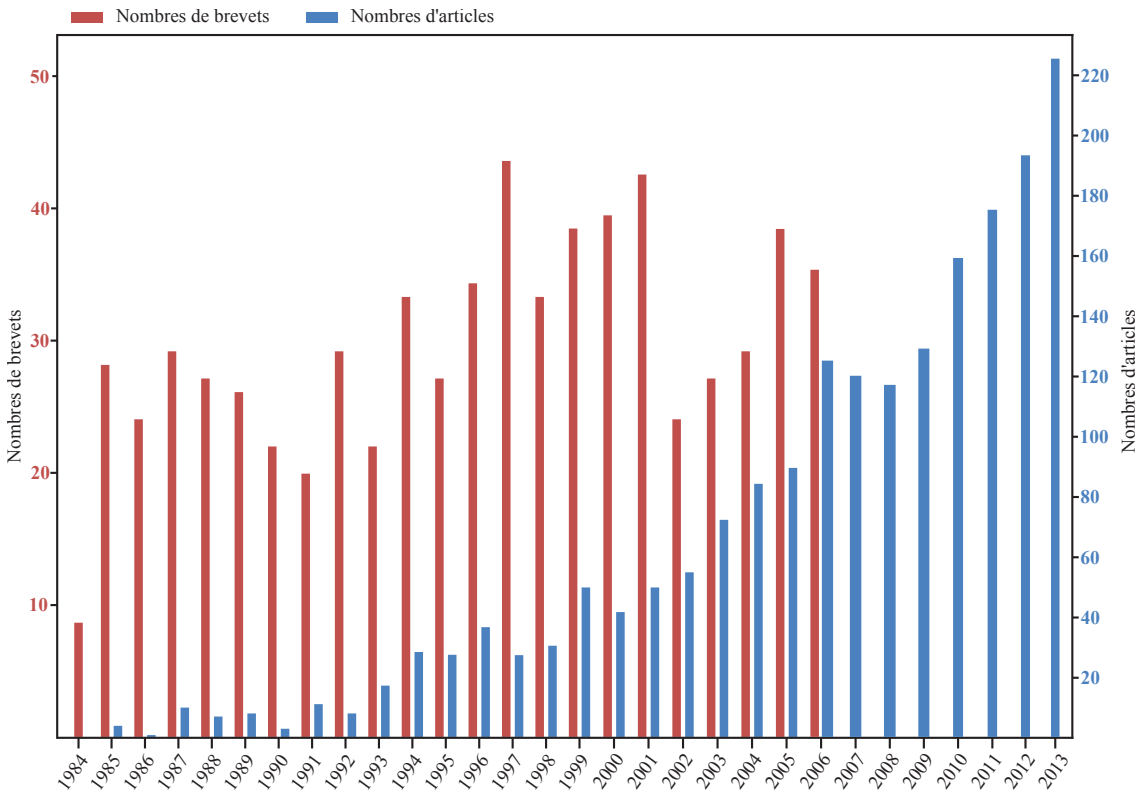


Figure 4.1 – Évolution du nombre de publications de brevets et d'articles traitant de la projection de poudres de 1984 à 2013

Au vu de ce graphique et des trente années de développement, on peut considérer que la technologie de projection de poudres arrive à maturité et qu'elle n'en est plus au stade expérimental. Ainsi, les industriels peuvent se rendre compte des nombreuses possibilités offertes par ce procédé, telles que la fabrication de pièces multimatériaux [Muller2013], de pièces aux parois minces ou de pièces aux formes internes ou externes complexes. La pièce aéronautique, appelée Airduck, proposée sur la figure 4.2 illustre les possibilités offertes par cette technologie en termes de formes complexes et parois minces. Les libertés de fabrication, citées ci-dessus, intéressent particulièrement les domaines de l'aéronautique et du médical.

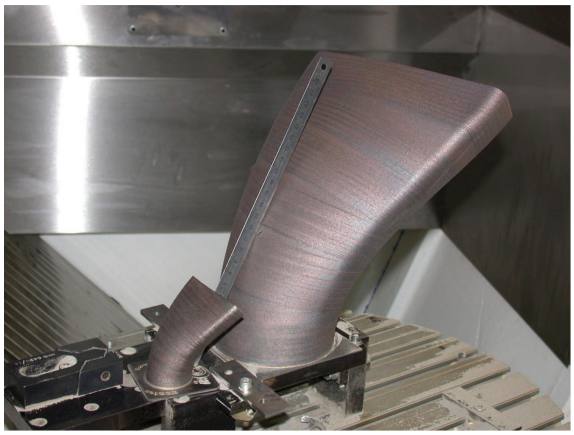


Figure 4.2 – Exemple de pièce obtenue par projection de poudres

L'acceptation de ces procédés de fabrication dans le monde industriel passe par une caractérisation environnementale. Ce point a fait l'objet d'un chapitre complet dans le "Roadmap for additive manufacturing" [Bourell2009]. Cette caractérisation nécessite une étude globale des impacts environnementaux générés (ou évités) par ce procédé durant tout le cycle de vie de la pièce. Pour cela, il est important de s'intéresser à la fois à la phase de fabrication, d'usage et de recyclage des pièces produites par projection de poudres ainsi qu'au transport nécessaire entre ces phases.

Dans la suite de ce chapitre, nous nous intéresserons au procédé de fabrication par projection de poudres appelé CLAD (Construction Laser Additive Directe). Dans les sections suivantes nous nous efforcerons de proposer des modélisations fines de l'ensemble des phases de fabrication d'un produit obtenu par projection de poudres. Comme nous avons pu le voir au chapitre 3, les étapes prises en compte dans le cadre d'une analyse du cycle de vie d'un produit sont au nombre de quatre. On parle alors de l'étape d'extraction des matières premières, de l'étape de fabrication du produit considéré, de l'étape d'utilisation de ce produit et de l'étape de recyclage. Pour un produit mis en forme par projection de poudres, la phase de fabrication se décompose en deux étapes, atomisation puis fabrication, voire trois si l'on réalise une étape de finition, comme le montre la figure 4.3. Cette étape est réalisée soit par parachèvement, grâce à la broche d'usinage montée en parallèle sur notre machine [Hascoet2013], soit par polissage laser où la source laser est utilisée sans projection de poudres afin de lisser les aspérités de surface dues

au procédé [Rosa2014]. 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 de mettre en place des études pré-process d'évaluation des impacts environnementaux d'une pièce à partir de son modèle numérique.

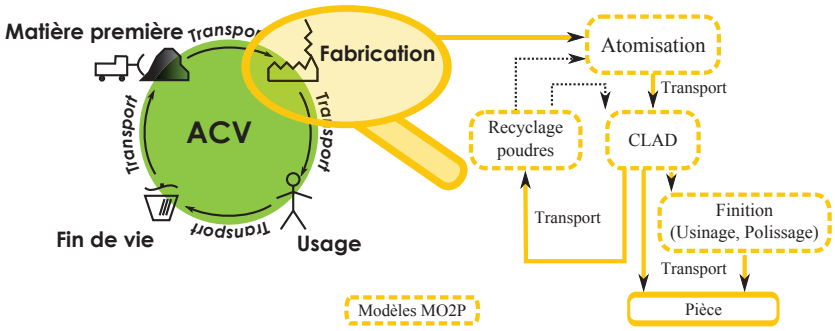
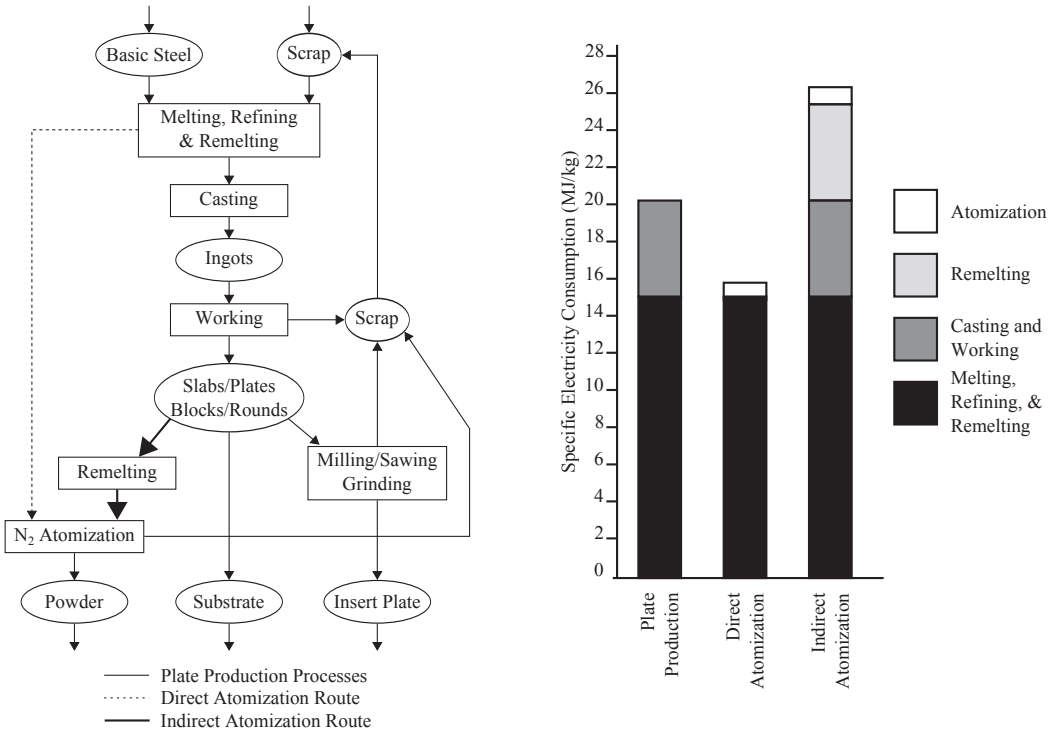


Figure 4.3 – Focus sur l'étape de fabrication lors d'une analyse de cycle de vie d'un produit "CLADé"

2 Atomisation de la poudre

L'une des premières étapes de la projection de poudres est l'obtention de la poudre métallique, céramique ou polymère qui servira par la suite de matière première. Il existe différentes méthodes d'obtention des poudres que l'on peut classer selon qu'elles soient obtenues par voie sèche ou par voie humide. Tandis que les poudres céramique et polymère peuvent être obtenues par un procédé d'agglomération séchage, l'atomisation directe ou indirecte est l'une des techniques d'obtention de poudres métalliques [Lagutkin2004, Zeoli2011]. Dans notre cas, l'étude des impacts environnementaux associés à l'atomisation de poudre est importante car elle est souvent vue comme une étape énergivore contrairement aux procédés d'obtention de matières brutes en plaques, tubes ou blocs réalisées plus communément par laminage ou extrusion. Néanmoins, ces préjugés doivent être vérifiés car la production de matières premières pour l'usinage nécessite plusieurs phases de fabrication. La figure 4.4 reprend les principales phases de production de poudres par atomisation directe ou indirecte issue d'une étude menée par l'équipe de Morrow [Morrow2007].

Dans cette étude, ils comparent la production de poudres à la production de plaques et de substrats pour les procédés conventionnels. On peut remarquer sur le graphique de la figure 4.4b que la consommation électrique associée à la phase de production de poudres dépend de la technologie utilisée. Pour la technologie d'atomisation par voie directe, la consommation énergétique est 20% moins importante que pour la production de plaque métallique, soit environ 16 MJ par kilogramme de poudres atomisées [Morrow2007].



(a) Etapes de fabrication

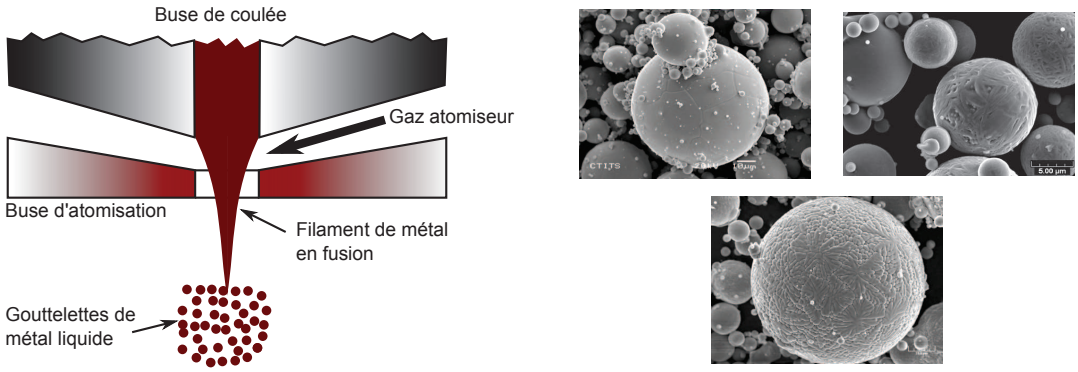
(b) Consommation électrique par étape

Figure 4.4 – Comparatif de production de matières premières en plaques ou en poudres [Morrow2007]

2.1 Principe de l'atomisation

L'atomisation de poudre métallique consiste en une succession d'étapes permettant de faire passer le matériau brut sous forme de bloc à l'état de poudre. Pour cela, on utilise un creuset permettant de mettre en fusion le matériau considéré. Une fois le matériau en fusion, l'onde de choc provoquée par le gaz d'atomisation (Argon), entraîne une instabilité du jet de matière en fusion conduisant à sa désintégration. Cette désintégration conduit en la transformation en fines gouttelettes du jet de matière qui vont se solidifier sous l'effet convectif du gaz inerte. La figure 4.5a représente le phénomène conduisant à la désintégration et la figure 4.5b présente des vues microscopiques des particules de poudres obtenus par atomisation. La figure 4.6 présente le dispositif permettant de réaliser cette atomisation.

Dans le cadre de la production de poudres métalliques par atomisation, les études menées sur l'évaluation de la performance environnementale du procédé ne s'intéresse qu'à sa consommation électrique. De plus, comme l'indique Morrow dans ses travaux, il y a même très peu d'études s'intéressant à cet aspect. On ne trouve pas, non plus, de publication traitant de l'ensemble des consommations lors la production de poudres. Or, il est nécessaire dans le cas de notre méthodologie de prendre en compte l'ensemble des flux traversant le système. Nous avons



(a) Schématisation du processus d'atomisation

(b) Vues microscopiques des particules de poudre

Figure 4.5 – Obtention de poudres métalliques par atomisation gazeuse (IRTES-LERMPS)

donc mené des études sur la production de poudres métalliques avec le Laboratoire d'Études et de Recherches sur les Matériaux, les Procédés et les Surfaces (LERMPS) situé sur le campus de l'Université Technologique de Belfort-Montbéliard. Ce laboratoire est doté d'un moyen d'élaboration de poudres métalliques par atomisation gazeuse. La connaissance fine de ce process de production de poudres est nécessaire afin d'alimenter nos modèles d'évaluation environnementale des procédés de fabrication additive. Dans notre cas, il est donc nécessaire de s'intéresser aussi à la consommation de gaz inerte (Argon) ainsi qu'à la consommation d'eau utilisée pour le refroidissement de la machine. Les sections suivantes seront structurées suivant le protocole utilisé lors de la production de poudres.

2.2 Atomisation gazeuse réalisée avec le laboratoire IRTES-LERMPS

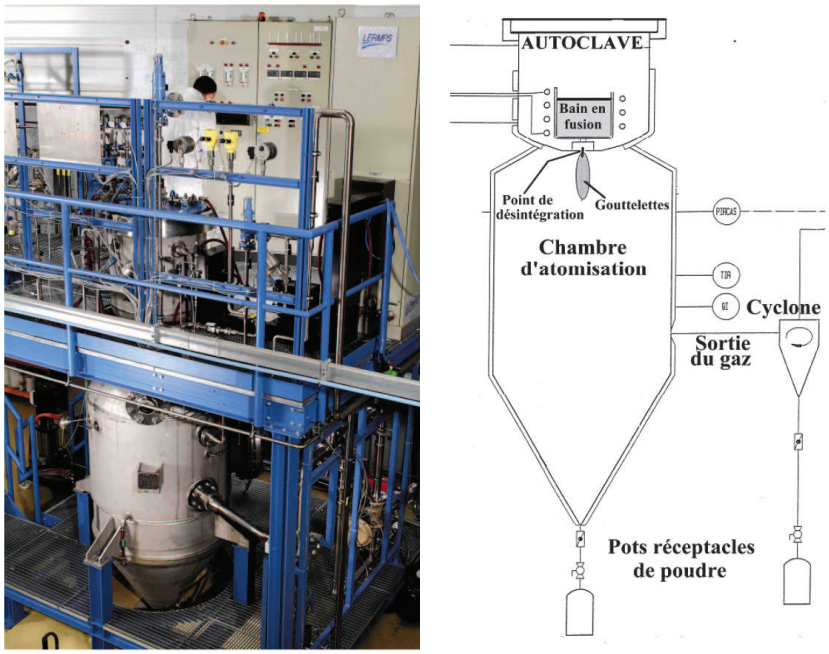
La tour d'atomisation présentée sur la figure 4.6 peut être décomposée en trois entités :

- l'autoclave, dans lequel se trouve la matière première, un système de refroidissement à eau, l'inducteur qui permet la mise en fusion de la matière ainsi qu'une série de capteurs pour contrôler le process ;
- le creuset, situé dans l'autoclave, doté de la buse d'atomisation et de son système de chauffage. Ce creuset peut être de deux types, soit froid, soit chaud et de différentes tailles selon la quantité de poudres à atomiser ;
- la chambre d'atomisation, dans laquelle la matière sera atomisée en fines gouttelettes grâce à un gaz inerte (Argon). Cette chambre est mise sous vide au moyen d'une pompe à vide.

Afin de modéliser le plus finement possible cette étape de fabrication, une campagne de mesures a été menée afin de connaître :

- la consommation électrique de l'ensemble des entités composant la tour d'atomisation ;
- la consommation de gaz inerte utilisée lors de l'atomisation ;

- la consommation d'eau nécessaire au refroidissement de l'autoclave et du creuset froid lorsqu'il est utilisé.



(a) Tour d'atomisation (b) Schéma simplifié de la tour d'atomisation

Figure 4.6 – Tour d'atomisation gazeuse d'IRTES-LERMPS

Lors de cette campagne d'expérimentation, nous avons caractérisé les deux types de creusets. Le matériau produit par atomisation est du verre métallique à base de Zirconium, Cuivre, Aluminium, Nickel et Titane.

2.3 Consommation électrique

2.3.1 Mise sous vide de l'enceinte

La première étape nécessaire à l'atomisation de la poudre consiste à mettre sous vide l'ensemble autoclave-chambre d'atomisation. La durée associé à cette phase de mise sous vide est de 20 à 30 minutes ($t_{vide}^{atomisation}$). Cette mise sous vide est nécessaire pour éviter toute oxydation du matériau. Le vide sera ensuite maintenu durant toute la durée de l'atomisation ($t_{fab}^{atomisation}$) afin d'éviter l'oxydation du matériau lors de sa fusion. La pompe à vide utilisée dans notre cas est dotée d'un moteur électrique d'une puissance nominale de 2.2 kW. N'ayant pas pu accéder aux branchements de la pompe, nous considèrerons un rendement théorique de l'ordre de 50 %. La puissance électrique nominale théorique de cette pompe, notée $Pe_{pompe\ à\ vide}^{atomisation}$, est de 4.4 kW. On peut donc en déduire la consommation électrique associée à la pompe à vide selon l'équation suivante :

$$Ee^{atomisation}_{pompe\ à\ vide} = Pe^{atomisation}_{pompe\ à\ vide} * (t^{atomisation}_{vide} + t^{atomisation}_{fab})$$
$$Ee^{atomisation}_{pompe\ à\ vide} = 4.4 * (0.5 + t^{atomisation}_{fab})$$

$$\boxed{Ee^{atomisation}_{pompe\ à\ vide} = 2.2 + \frac{4.4}{3600} * t^{atomisation}_{fab} \quad (kWh)} \tag{4.1}$$

La consommation d'énergie électrique de la pompe à vide n'est pas constante et dépendra du temps nécessaire à l'atomisation car cette dernière reste en fonctionnement tout au long du process.

2.3.2 Préchauffage de la buse d'atomisation

Une fois que la pression dans l'autoclave et la chambre d'atomisation a atteint 2,5 mbar, une deuxième étape consiste à préchauffer la buse d'atomisation. En utilisant le phénomène d'échauffement par effet Joule, la buse en graphite, assimilée dans ce cas à une résistance, est portée à une température proche de la température de fusion du matériau afin d'éviter tout choc thermique lors du passage de la matière en fusion dans cette dernière. La buse, illustrée par la figure 4.7, est alimentée par une tension continue, U_{buse}, et parcourue par un courant continu, I_{buse}. La puissance électrique traversant la buse est transformée intégralement en chaleur. Nous donnerons uniquement la valeur moyenne de l'énergie nécessaire au préchauffage de la buse.

$$Ee^{atomisation}_{préchauffage\ buse} = U_{buse} * I_{buse} * t^{atomisation}_{préchauffage\ buse}$$

$$Ee^{atomisation}_{préchauffage\ buse} = 21 * 90 * 0.1667$$

$$\boxed{Ee^{atomisation}_{préchauffage\ buse} = 0.32 \quad (kWh)} \tag{4.2}$$

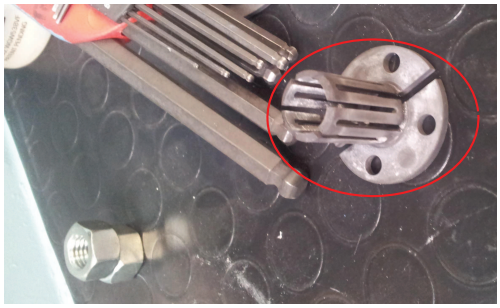


Figure 4.7 – Résistance d'atomisation en graphite

2.3.3 Mise en chauffe du bain de fusion

Une fois ces premières étapes terminées, vient l'étape de la mise en fusion de la matière. Pour cela l'inducteur permettant la mise en fusion de la matière est alimenté. La commande de cet inducteur se fait proportionnellement à la tension maximale admissible. Cette commande est donc un paramètre important pour la suite de l'étude. Lors de la campagne d'essai, nous avons relevé la puissance électrique absorbée par l'inducteur en fonction de la commande pilotée. Ce relevé nous permet de mettre en place un modèle de consommation électrique dépendant du pilotage de la machine. La consommation électrique de l'ensemble de la tour d'atomisation ne sera donc pas constante et dépendra de la consigne d'entrée. La tour d'atomisation étudiée est dotée de deux types de creuset comme nous avons pu l'évoquer précédemment. Ces deux creusets feront l'objet de deux études distinctes du fait de leurs technologies.

2.3.4 Creuset froid

Ce creuset est appelé ainsi car il est refroidi en permanence. L'avantage de ce type de technologie est qu'elle permet d'atteindre des températures de fusion élevées ainsi qu'une dynamique thermique importante. En effet, il suffit de 105 secondes pour élever la température de la matière étudiée jusqu'à son point de fusion, 1060°C. De plus, une fois la consigne de chauffe arrêtée, la température au sein de l'autoclave redescend suffisamment rapidement de telle sorte que l'autoclave peut être réouvert et rechargé en matière première dans les 10 minutes suivant la fin de l'atomisation. Néanmoins, cette technologie ne permet pas d'atomiser des quantités de poudres supérieures à 5 kg. Afin d'analyser le comportement énergétique de ce creuset, nous avons fait varier la consigne en tension de 10% à 100% de la tension maximale. La figure 4.8 illustre l'enregistrement effectué lors de l'expérimentation. Ces courbes représentent les résultats de la puissance absorbée par l'inducteur en fonction de la consigne.

À partir de ces courbes, il est donc possible de modéliser le comportement de l'inducteur en terme de consommation électrique. La figure 4.9 représente la courbe de la puissance électrique absorbée en fonction de la commande. Cette figure permet alors de définir une fonction mathématique, $Pe^{atomisation}_{creuset\ froid}(U_{max})$, qui pourra ensuite être utilisée par le modèle d'évaluation pré-process de l'atomisation de poudre métallique.

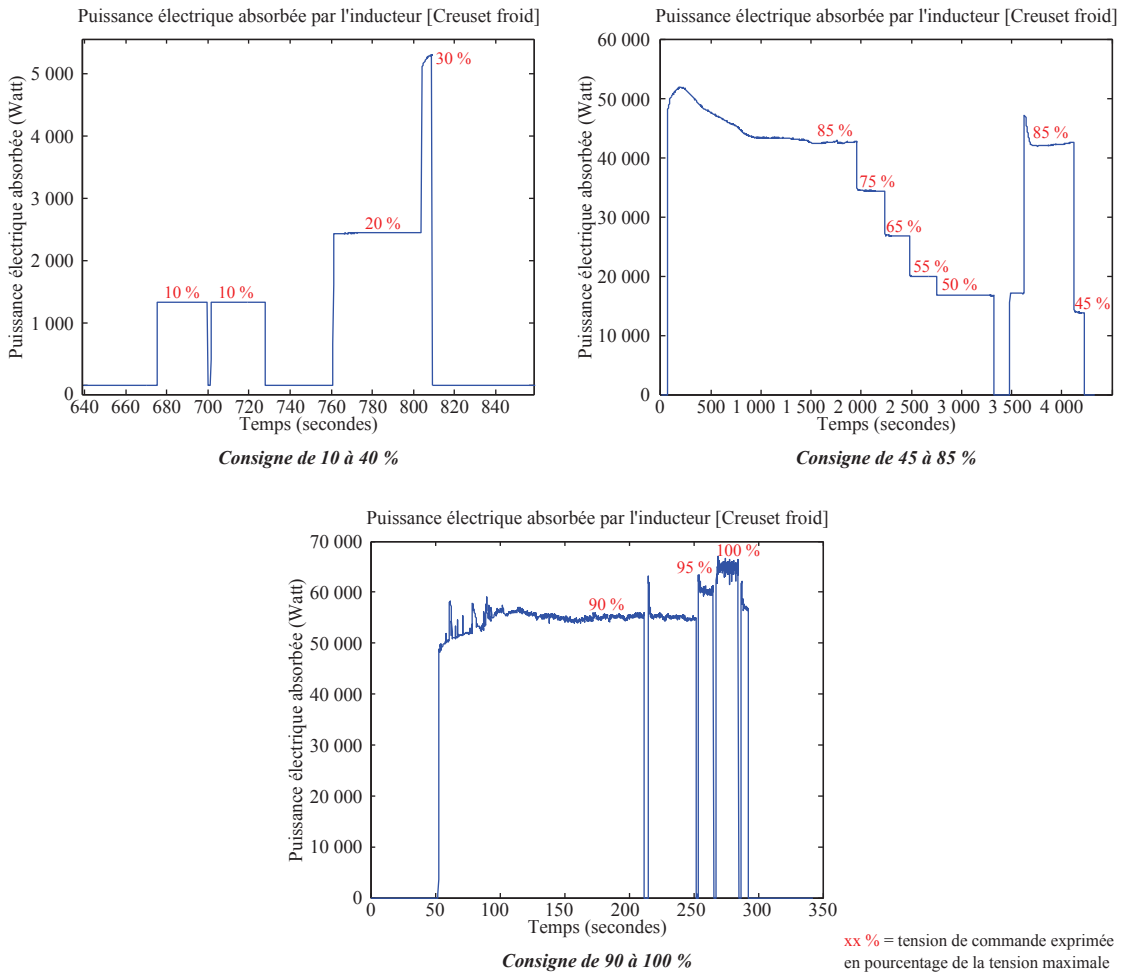


Figure 4.8 – Puissance absorbée par l'inducteur, cas du creuset froid

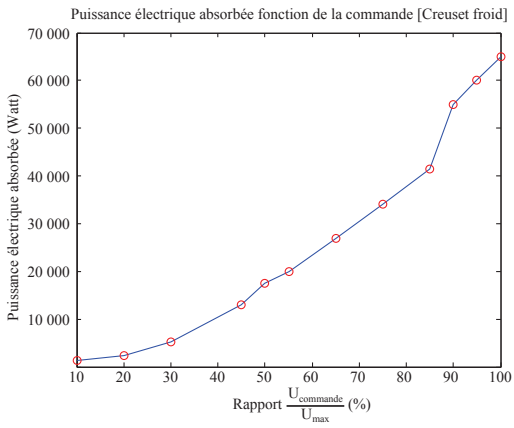


Figure 4.9 – Puissance absorbée par l'inducteur en fonction de la consigne, cas du creuset froid

2.3.5 Creuset chaud

L'étude suivante s'intéresse à la consommation électrique du creuset chaud. Pour ce second creuset, le temps nécessaire à la montée en température de la matière, jusqu'à son point de fusion (1060°C), est d'environ 3 à 4 minutes pour une masse de matière initiale de 2580 grammes. De plus, une fois l'atomisation débutée, il faut attendre 2 à 3 heures pour pouvoir recharger l'autoclave en matière première. La figure 4.10 représente le relevé de la consommation lors de l'atomisation.

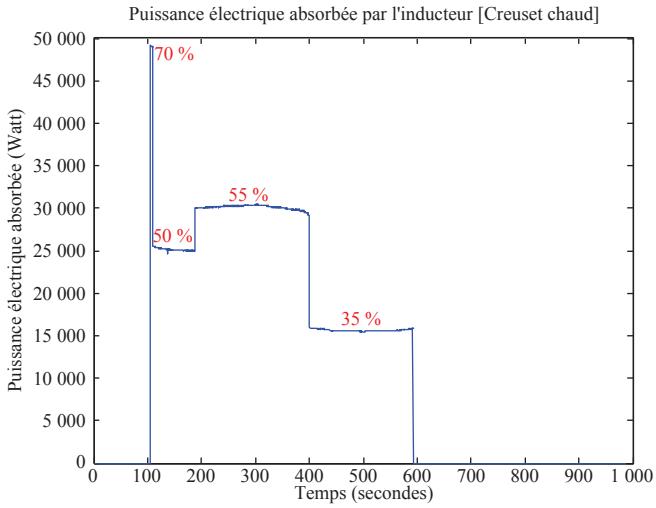


Figure 4.10 – Puissance absorbée de l'inducteur, cas du creuset chaud

La plage de commande n'ayant pas été explorée sur son intégralité, la courbe, présentée sur la figure 4.11, définissant la puissance absorbée en fonction de la commande de l'inducteur est définie sur l'intervalle 35% à 70%. Néanmoins, une interpolation de cette courbe sur les intervalles [10% ; 35%] et [70% ; 100%] permet de définir la fonction $Pe^{atomisation}_{creuset\ chaud}(U_{max})$. Tout comme la précédente fonction, cette dernière servira à calculer la consommation électrique attendue de l'inducteur lors de la phase d'atomisation en fonction de la consigne en tension.

Suite à ces expérimentations, il est donc possible de définir la consommation énergétique de l'inducteur en fonction du type de creuset utilisé ainsi que du temps d'atomisation suivant l'équation 4.3. La figure 4.12 représente la puissance électrique absorbée de chacun des deux creusets en fonction de la commande. On remarque que pour une même commande en tension, le creuset dit froid consomme moins d'électricité. L'utilisation de ce creuset est donc intéressante dans le cadre de l'atomisation de faible quantité de poudres. Pour rappel, ce creuset ne permet pas d'atomiser plus de 5 kg de poudres mais peut être rechargé rapidement. Le creuset dit chaud sera alors utile afin d'atomiser une plus grande quantité de poudres (jusqu'à 50 kg).

$$\boxed{Ee^{atomisation}_{inducteur} = \frac{1}{3600}\int_0^{t^{atomisation}_{fab}} Pe^{atomisation}_{creuset_i}(U_{max}) * dt \quad (kWh)} \tag{4.3}$$

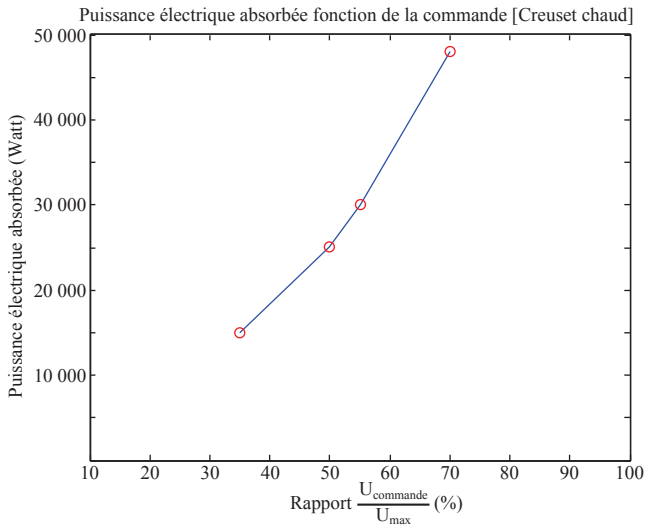


Figure 4.11 – Puissance absorbée de l'inducteur en fonction de la consigne, cas du creuset chaud

Avec i définissant le type de creuset utilisé (chaud ou froid). La fonction $Pe_{creuset_i}^{atomisation}(U_{max})$ permet de connaître la puissance électrique consommée par chaque creuset en fonction de la tension de commande.

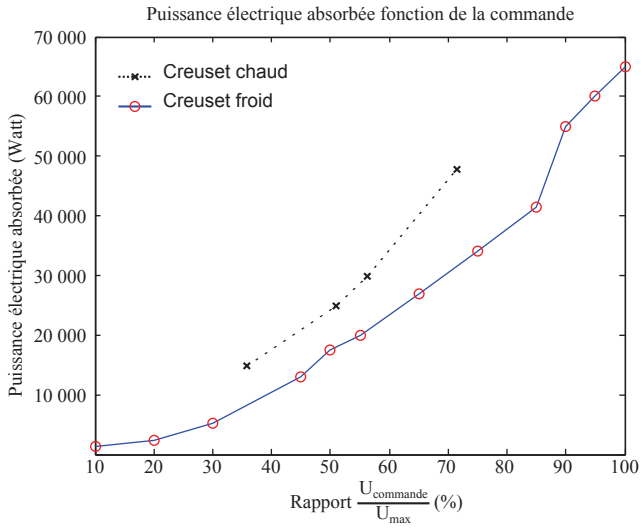


Figure 4.12 – Puissance absorbée de l'inducteur en fonction de la consigne, cas des deux creusets

2.4 Consommation de gaz

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 d'électricité. Nous allons donc nous intéresser à la consommation de gaz inerte nécessaire lors de l'atomisation. Le gaz utilisé lors

de l'atomisation de la poudre est de l'argon ($\rho_{argon} = 1,7837.10^{-3}\ kg.l^{-1}$). L'évaluation de la consommation d'argon permettra d'alimenter le calcul des impacts environnementaux générés lors de la production de poudres. L'instrumentation déjà présente sur la tour d'atomisation nous permet d'enregistrer le débit de gaz utilisé et d'en déduire la consommation de gaz lors de l'atomisation. La figure 4.13 illustre la variation du débit de gaz au sein de la chambre d'atomisation.

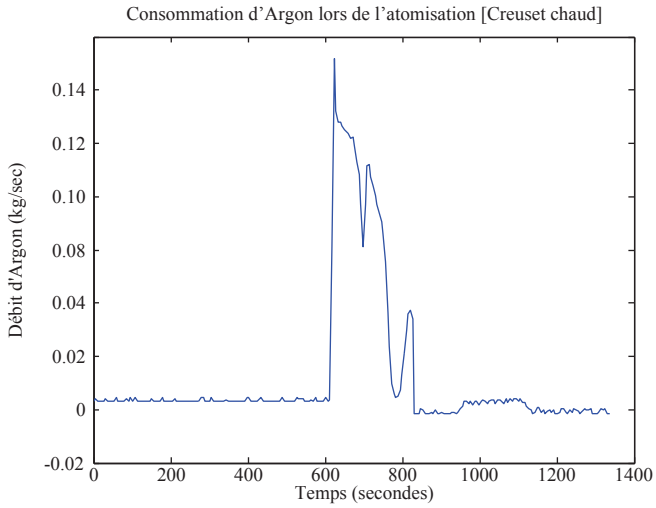


Figure 4.13 – Consommation d'Argon lors de l'atomisation, cas du creuset chaud

En connaissant le débit massique de gaz, il est possible de calculer la consommation de gaz suivant l'équation 4.4.

$$\boxed{V_{argon}^{atomisation} = \frac{1}{\rho_{argon}} * \int_0^{t_{atomisation}} dm_{argon}^{atomisation} * dt \quad (l)} \tag{4.4}$$

2.5 Consommation d'eau

Concernant ce dernier point, l'eau utilisée pour le refroidissement de l'autoclave circule, normalement, en circuit fermé. Sa consommation ne dépend donc pas de la quantité de matière à atomiser. Cependant, pour des raisons de vitesse de refroidissement de l'autoclave, une partie de l'eau circulant dans ce circuit doit être renouvelée par de l'eau "fraiche". C'est cette consommation qui sera prise en compte par la suite. Il serait sans doute plus intéressant de dimensionner un échangeur thermique de telle sorte que le refroidissement de l'autoclave soit régulé. Pour notre exemple, nous ne considérerons pas de refroidisseur. Le débit d'eau renouvelée est de 15 l/min lors de l'atomisation. A partir de ces valeurs, il est donc possible de déterminer la quantité d'eau rejetée lors de l'atomisation.

$$\boxed{V_{eau}^{atomisation} = d_{eau}^{atomisation} * \frac{t_{fab}^{atomisation}}{60} \quad (l)} \tag{4.5}$$

2.6 Synthèse de l'étude sur l'atomisation de poudres

Les modèles d'évaluations construits dans les sections précédentes sont issus d'expérimentations menées lors de l'atomisation de 1.3 kg de verre métallique. Ce matériau, dont le point de fusion est proche de 1060°C, nous a permis d'explorer l'ensemble de la plage de fonctionnement de la tour d'atomisation. Les modèles ainsi construits permettent de prédire la consommation d'énergie électrique, de gaz et d'eau pour la production de poudres métalliques par atomisation gazeuse.

Le tableau 4.1 résume les consommations pour l'obtention d'un kilogramme de poudres de verres. Dans ce tableau, on retrouve la consommation d'énergie électrique, la consommation de fluides et d'eau et la durée totale d'atomisation prenant en compte à la fois la phase l'atomisation, la mise en fusion du matériau mais aussi le temps de mise sous vide.

$t_{fab}^{atomisation}$	2400 secondes
$Ee_{pompe\ à\ vide}^{atomisation}$	2.25 kWh
$Ee_{préchauffage\ buse}^{atomisation}$	0.25 kWh
$Ee_{inducteur}^{atomisation}$	2.48 kWh
$V_{argon}^{atomisation}$	7230 litres
$V_{eau}^{atomisation}$	154 litres

Tableau 4.1 – Valeurs de consommations pour l'obtention d'un kilogramme de verre métallique

L'énergie électrique consommée peut être comparée avec les données bibliographiques issues de l'étude de Morrow. Dans notre cas, l'atomisation de 1.3 kilogrammes de poudres de verre métallique nécessite 23 MJ soit 18 MJ/kg. Morrow considère, dans son étude, que l'atomisation directe de poudres métalliques consomme 16 MJ/kg. L'énergie électrique que nous avons mesuré est comparable à la valeur donnée par Morrow. Dans l'étude que nous avons réalisée, nous avons utilisé 2580 grammes verres métalliques en entrée (matière première) et nous obtenons, en sortie du process, 1.3 kilogrammes de poudres. Le rendement global de l'atomisation est proche de 50%. Cette étude ayant été menée en phase expérimentale pour l'atomisation de verre métallique, le rendement n'est donc pas optimal. L'impact environnemental dû à la production de poudres métalliques par atomisation, dans des conditions de fabrication stabilisées, serait sans doute moindre.

Dans cette première section, l'étude menée montre que la consommation énergétique due à la production de matières premières sous forme de poudres métalliques est semblable à la production de matière première sous forme de plaques ou de lopins pour les procédés traditionnels tel que l'usinage. De plus, dans cette section, nous proposons une évaluation, en plus de la consommation énergétique, de la consommation de fluides et d'eau nécessaires à la mise en forme de poudres par atomisation gazeuse. Les données issues de cette étude peuvent servir de valeurs

moyennes lors de la réalisation d'ACV. En effet, les modèles locaux mis en place permettent d'évaluer de manière très précise l'ensemble des consommations dues à cette technique de mise en forme. Cette prise en compte de l'étape de mise en forme de la matière première est importante dans le cadre de l'analyse de cycle de vie.

3 Fabrication par projection de poudres

3.1 Présentation de la machine étudiée

Une fois la matière première obtenue sous forme de poudre, la seconde étape est la fabrication par projection de poudres. La machine étudiée est une machine d'usinage cinq axes à commande numérique, Huron KX5, sur laquelle a été greffée l'ensemble des éléments nécessaires à la fabrication par projection de poudres. La figure 4.14 représente la configuration de la machine. Sur cette figure, les flux d'énergies et de matière sont représentés comme des bus continus d'alimentations. Chaque élément de la machine est connecté aux flux nécessaires à son fonctionnement.

Sur la figure 4.14 on distingue 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, l'unité de régulation de la température, etc. Toutes ces unités nécessaires à la fabrication doivent être prises en compte dans le cadre de l'évaluation environnementale du procédé.

Pour cette étude nous avons donc pris en compte l'ensemble des flux consommés (électricité, matières premières et fluides) ainsi que les émissions produites. Dans notre cas, les émissions sont dues aux gaz rejetés lors de la fabrication, à la poudre non fusionnée lors de la projection, aux copeaux générés lors de la phase de finition et à la pièce produite qui peut aussi être vue comme une émission.

La figure 4.15 permet d'illustrer de façon plus précise la méthodologie utilisée afin de déterminer l'impact environnemental associé au modèle numérique de la pièce à fabriquer. Plusieurs étapes sont nécessaires afin d'évaluer au mieux cet impact environnemental.

Dans un premier temps, à partir du fichier numérique de la pièce, il est nécessaire de générer le programme de commandes de la machine. Ce programme de commandes est écrit dans un fichier appelé "Fichier de commande numérique". Pour notre machine étudiée ce programme est écrit en code-G. À partir de ce fichier de commande numérique, une lecture de chacune des lignes permet d'extraire l'ensemble des données nécessaires à l'évaluation environnementale. On peut retrouver dans ce fichier les commandes de déplacements des axes de la machine (vitesses et positions), la puissance laser qui servira à fusionner la poudre projetée, le débit de poudre à projeter etc.

En couplant ces données issues du programme à commande numérique aux données liées au moyen de production telles que l'inertie des axes, le jerk et l'accélération maximale atteignable par la machine ainsi que le rendement de la buse de projection par exemple, il est possible de déterminer les consommations des trois sources (électricité, fluide et matière) d'impacts environnementaux.

Dans la suite de cette section consacrée à l'analyse environnementale du procédé de fabrication par projection de poudres, nous développerons les modèles mis en place pour l'évaluation de la consommation de chacune des sources d'impacts précédemment citées. Nous nous intéresserons dans un premier temps à la consommation électrique de l'ensemble des entités constituant le moyen de production. Dans un second temps, nous nous intéresserons à la consommation de matières premières. Puis nous développerons les modèles associés à la consommation de fluides.

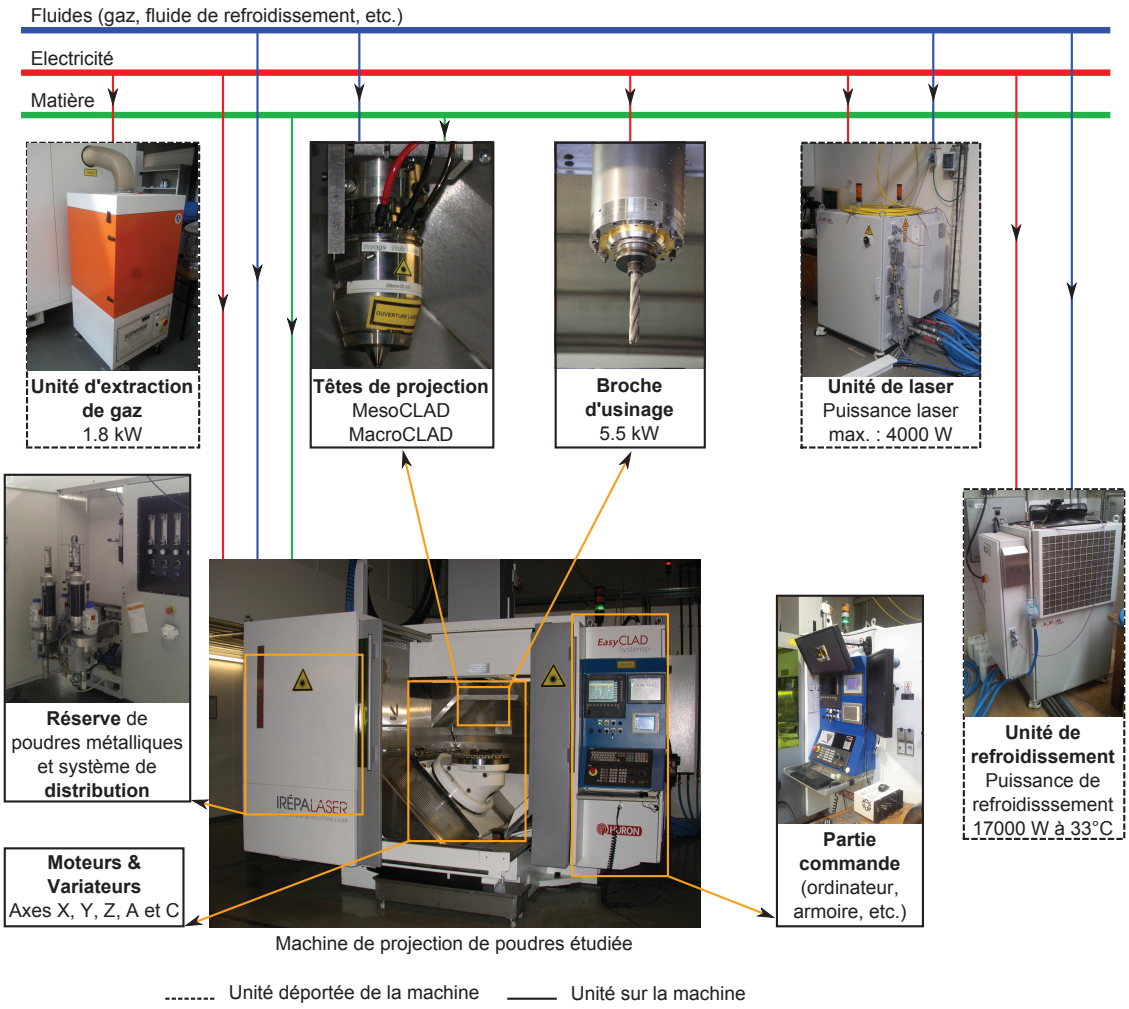


Figure 4.14 – Illustration de l'ensemble des éléments nécessaires à la fabrication par projection de poudres

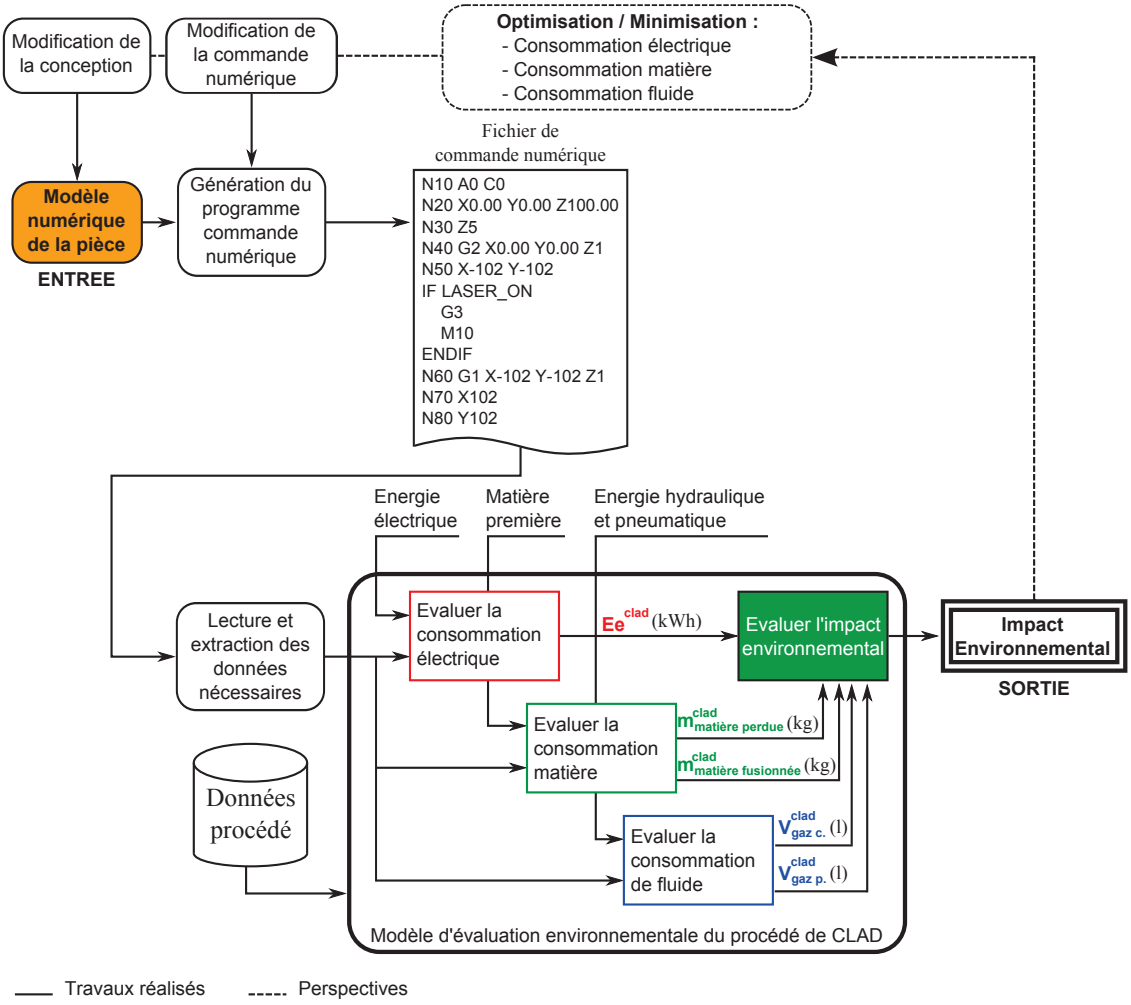


Figure 4.15 – Méthodologie d'évaluation de la performance environnementale du couple Pièce-Procédé pour le procédé CLAD

3.2 Évaluation de la consommation d'énergie électrique

Afin de déterminer la consommation électrique de notre moyen de production, il est nécessaire de référencer l'ensemble des entités consommant de l'énergie. Comme nous avons pu le voir dans le chapitre 2 les entités constituants la machine peuvent être classées en deux catégories. D'un côté, on distingue les éléments "passifs" de la machine dont leur consommation est constante et ne dépend pas de la pièce à fabriquer tels que l'unité d'extraction de gaz et l'ordinateur. De l'autre côté, on retrouve des éléments "actifs" donc la consommation dépend de la pièce à produire tels que le laser, les moteurs d'axes, etc. La figure 4.16 présente l'ensemble des entités retenues pour cette étude. On retrouve les deux classifications de composants de type actifs et passifs.
En ce qui concerne les éléments passifs, nous distinguons :

- l'armoire électrique,
- les composants hydrauliques (pompe par exemple),
- ainsi que l'unité d'extraction de gaz et de particules.

En ce qui concerne les éléments dits actifs, on distingue :

- l'ensemble moteur-variateur de chacun des axes,
- l'unité de refroidissement des moteurs couples,
- le laser,
- l'unité de régulation de la température du laser,
- l'unité de projection de poudres,
- et l'unité de projection de gaz.

Comme on peut le voir sur la figure 4.16, la première étape de la méthodologie permettant d'évaluer l'ensemble des consommations électriques des entités de la machine consiste en la lecture et l'extraction des données issues du fichier de commandes numériques. Cette étape sera le point de départ des différentes évaluations. En effet, à partir de ces données, il est possible de lier la consommation des axes de la machine en fonction des points de passages pilotés et de la vitesse pilotée. De même, la consommation électrique du laser ainsi que de son unité de régulation dépend de la puissance laser commandée et du temps de lasage. Par la suite, nous détaillerons l'ensemble des fonctions de transfert liant les consommations électriques des entités énumérées avec les données issues du fichier de commandes numériques. Ces fonctions de transfert sont issues soit de modèles physiques décrivant le comportement de l'entité, soit de modèles expérimentaux.

3.2.1 Consommation électrique des axes

Cette partie a pour objectif de proposer une modélisation du comportement de chacun des axes constituant la machine de projection de poudres. Cette modélisation pourra être reprise pour des machines d'usinage conventionnelles. En effet, la machine étudiée est une machine d'usinage sur laquelle a été montée en lieu et place de la broche d'usinage des têtes de projection de poudres. Une attention toute particulière est donc portée sur la modélisation du comportement de ces axes machines en proposant des modèles issus d'équations mécaniques. De plus, hormis l'évaluation de la consommation électrique des axes, cette modélisation permet de connaître avec précision la durée de fabrication, ainsi que l'état physique de la machine à chaque instant. Cette durée de fabrication ainsi que l'état du système sont des données nécessaires pour l'évaluation de la consommation électrique de l'ensemble des entités de la machine.

Cette remarque a fait l'objet d'une étude par Ruffo et al. [Ruffo2006b]. En effet, la durée de fabrication est une donnée essentielle car elle permet d'estimer l'énergie électrique consommée pour les procédés par ajout de matière.

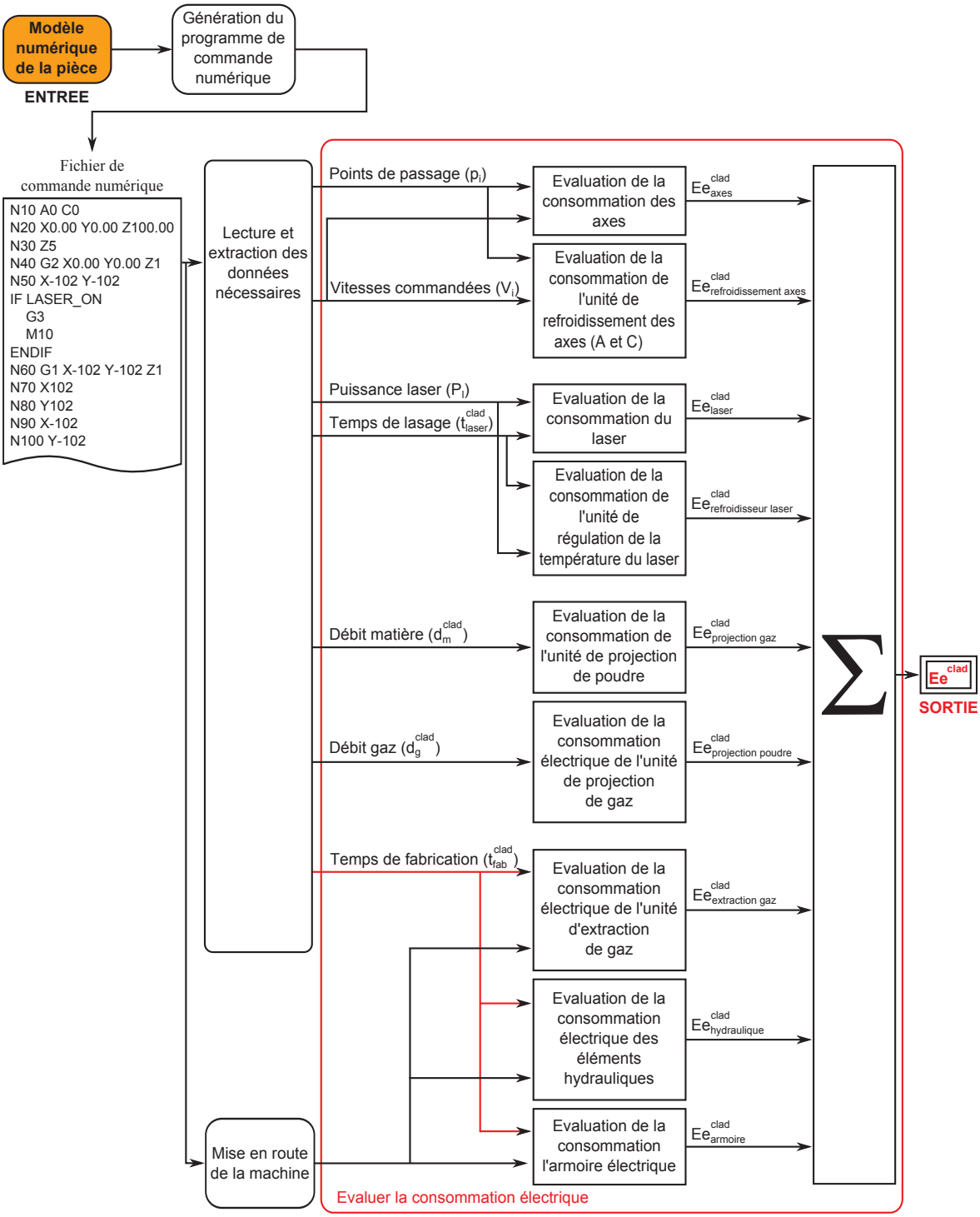


Figure 4.16 – Évaluation de la consommation électrique du procédé CLAD

Dans un premier temps, il est nécessaire de distinguer les deux technologies de moteurs implantés sur la machine de fabrication par projection de poudres. Les axes X, Y et Z sont dotés de moteurs synchrones de chez Siemens de puissance respective de 4.6 kW, 5.8 kW et 5.8 kW. Pour chacun de ces moteurs est associé un variateur de vitesse de chez Siemens. Les axes A et C sont dotés de moteurs couples de chez Etel de couple nominal respectif de 1630 N.m et 990 N.m. Le comportement des moteurs couples ne sera pas modélisé suivant des équations analytiques mais une campagne expérimentale de caractérisation de la consommation de ces axes a été menée et sera présentée par la suite.

Afin d'évaluer l'impact environnemental dû à la consommation électrique des axes, nous nous intéressons à la détermination de l'énergie consommée par les axes, notée Ee_{axes}^{clad} comme le montre la figure 4.16. L'énergie consommée par les axes est donnée par l'intégration de la puissance consommée à chaque instant par les moteurs et ce durant toute la fabrication. Il est donc nécessaire de connaître la puissance électrique absorbée à chaque instant, noté Pe_{axe_i} avec i définissant le type d'axe (X, Y, Z, A ou C), par chacun des axes.

La méthodologie décrite par la suite et illustrée par la figure 4.17 permet de déterminer la puissance électrique absorbée en fonction des paramètres machines (inertie, jerk, accélération, etc.) et des paramètres de commandes issus du programme à commandes numériques qui pilotent le process (vitesse commandée, point de passage de la buse, etc.).

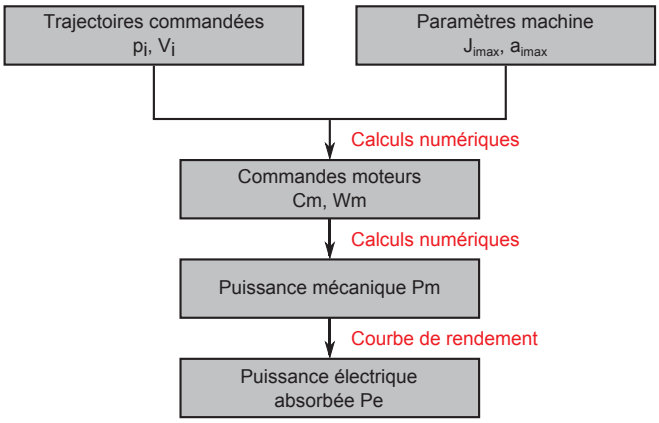


Figure 4.17 – Méthodologie de calcul de la puissance électrique absorbée par les axes X, Y et Z

L'équation 4.6 permet de calculer l'énergie électrique consommée par les axes (X, Y, Z, A et C) sur une trajectoire de fabrication :

$$\boxed{Ee_{axes}^{clad} = \sum_{i=1}^{5} \int_{0}^{t_{fab}^{clad}} Pe_{axe_i}^{clad}(t)\, dt \quad (kWh)} \tag{4.6}$$

À partir de cette équation, on remarque qu'il est nécessaire de connaître la puissance électrique absorbée par chaque axe à chaque instant. Dans une première hypothèse, on peut considérer que la puissance électrique absorbée par chaque moteur d'axe ($Pe_{moteur\ i}(t)$) est égale à la somme de la puissance mécanique sur l'axe moteur pour le déplacement de l'axe considéré ($Pm_{moteur\ i}(t)$), de la puissance due aux pertes par effets Joules au niveau du moteur électrique ($Pertes_{Joules_{moteur\ i}}$), de la puissance due aux pertes fers au niveau du moteur électrique - pertes liant le champ magnétique et la vitesse de rotation du rotor - ($Pertes_{fers_{moteur\ i}}$) et de la puissance dues aux pertes mécaniques ($Pertes_{meca_{moteur\ i}}$). L'équation 4.7, dont la construction est donnée ci-dessous, permet de mettre en relation la puissance électrique absorbée en fonction de la puissance mécanique de l'axe moteur et du rendement de la chaîne de conversion, notée η.

$$Pe_{axe_i}^{clad}(t) = Pm_{axe_i}(t) + \sum Pertes$$

Où : $\sum Pertes = Pertes_{Joules_{axe_i}} + Pertes_{fers_{axe_i}} + Pertes_{meca_{axe_i}}$

$$\eta = \frac{Pm_{axe_i}(t)}{Pe_{axe_i}(t)}$$

$$\eta = \frac{Pm_{axe_i}(t)}{Pm_{axe_i}(t) + \sum Pertes}$$

$$Pm_{axe_i}(t) = Cm_i(t) * \Omega m_i(t)$$

$$\boxed{Pe_{axe_i}^{clad}(t) = Pm_{axe_i}(t) * \frac{1}{\eta(Cm_i(t), \Omega m_i(t))}} \tag{4.7}$$

Les équations précédentes permettent de mettre en évidence l'importance de la connaissance, à tout instant, du couple mécanique sur l'axe, noté $Cm_i(t)$, de la vitesse de rotation de l'axe, notée $\Omega m_i(t)$, ainsi que la fonction définissant le rendement de la chaîne de conversion tel que $\eta = f(Cm_i, \Omega m_i)$. En effet, ces variables, Cm_i et Ωm_i, sont liées respectivement aux pertes par effet Joules et aux pertes fers. De plus, elles permettent de connaître, à tout instant, la puissance mécanique.

Pour la suite de cette étude, nous supposerons que la fonction définissant le rendement de la chaîne de conversion, η, ne sera fonction que de la puissance mécanique. On pourra alors modéliser cette fonction par une courbe de réponse pour laquelle à chaque puissance mécanique correspond un unique rendement. En théorie, le rendement de cette chaîne est régi par une surface de réponse où les paramètres d'entrées sont la vitesse de rotation du moteur ainsi que le couple mécanique sur l'axe moteur. Dans notre cas, on considère que les efforts exercés sur chacun des axes sont constants, la tête de projection n'induisant aucun effort supplémentaire. De ce fait, nous considérons que chaque puissance mécanique est définie par un unique couple de paramètres [couple mécanique sur l'axe moteur - vitesse de rotation moteur]. C'est cette hypothèse qui nous permet de définir une courbe de rendement et non une surface de rendement de la chaîne de conversion.

Afin de déterminer la puissance mécanique théorique sur l'axe i telle que $Pm_{axe_i}(t) = Cm_i(t) * \Omega m_i(t)$, il est nécessaire de calculer dans un premier temps la vitesse de rotation de l'axe considéré (équation 4.8) puis le couple mécanique sur ce même axe (équation 4.9). Du fait de la conservation de la puissance on considère que la puissance mécanique sur l'axe déplacé est égale à la puissance mécanique sur l'axe moteur.

$$\Omega m_i(t) = r_i * \frac{60}{p_i} * V_i(t) \tag{4.8}$$

$$Cm_i(t) = Jt_i * \frac{2\pi}{60} * \frac{60}{p_i} * r_i * a_i(t) + \frac{f_i}{30} * \pi * \Omega m_i(t) + Cr_i \tag{4.9}$$

Avec :

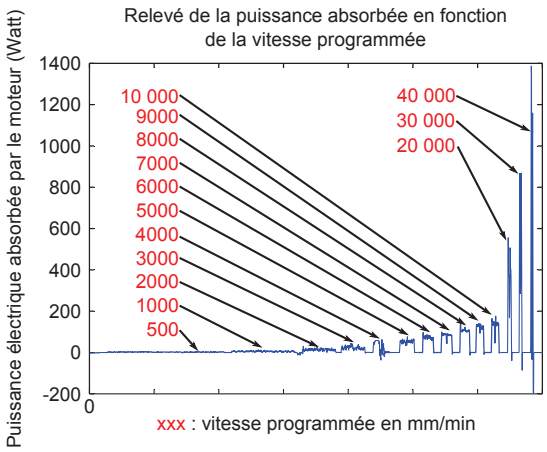
- r_i : Rapport de réduction de l'axe *i* (valeur d'entrée),
- p_i : Pas de vis à droite de la vis à billes de l'axe *i* [m/tr] (valeur d'entrée),
- Jt_i : Moment d'inertie total ramené sur l'axe moteur *i* [kg.m^2] (entrée expérimentale),
- f_i : Coefficient de frottement visqueux de l'axe *i* (entrée expérimentale),
- Cr_i : Coefficient de frottement sec de l'axe *i* (entrée expérimentale),
- V_i : Vitesse linéaire commandée de l'axe *i* [mm/min] (valeur d'entrée),
- a_i : Accélération de l'axe *i* [m/s^2] (valeur d'entrée),
- Cm_i : Couple mécanique de l'axe *i* [N.m] (valeur de sortie),
- Ωm_i : Vitesse de rotation angulaire de l'axe *i* [rad/s] (valeur de sortie).

Ces deux équations permettent de connaître la vitesse de rotation instantanée théorique du moteur ainsi que le couple mécanique instantané théorique sur l'axe moteur en fonction des paramètres de pilotage de la machine issus du fichier de commande numérique. Dans ces paramètres de pilotage de la machine on retrouve la vitesse linéaire pilotée ainsi que l'accélération commandée dépendant elle même du couple position-vitesse.

Comme le montre la figure 4.17, la dernière étape de notre méthodologie consiste à caractériser la courbe de rendement définissant notre moteur. Pour cela, et en s'appuyant sur les hypothèses précédemment citées, nous avons réalisé une série d'essais consistant à enregistrer axe par axe la puissance électrique absorbée en fonction de la vitesse pilotée. Pour ne dépendre que de la vitesse pilotée, nous avons choisi de réaliser des déplacements suffisamment grands de telle sorte que l'on se place dans le régime stationnaire de la machine. Autrement dit, le déplacement est suffisamment grand pour que la vitesse pilotée soit atteinte et que l'accélération soit nulle durant un certains temps.

La figure 4.18 représente l'enregistrement de la puissance électrique absorbée par le moteur de l'axe x en fonction de la vitesse pilotée. Chaque palier représente la consommation électrique pour une vitesse pilotée. Le tableau joint résume les valeurs expérimentales relevées. Il est intéressant de noter que pour des vitesses de commandes très faibles la puissance électrique absorbée est aussi très faible et peut être confondue avec le bruit de mesure.

Ce sont particulièrement ces vitesses qui nous serviront par la suite car la tête de projection de poudres se déplace à des vitesses faibles et proches de 1000 mm/min. Les résultats de mesures pour les autres axes (Y, Z, A et C) sont annexés (Annexe A) à ce manuscrit. La figure 4.18 montre que nous avons aussi réalisé des relevés pour des vitesses de consigne de l'ordre de 10 m/min. Ces valeurs serviront non pas dans le cas de la fabrication additive mais dans le cas de la fabrication hybride (projection de poudres puis usinage) où les vitesses de consigne en phase d'usinage atteignent cet ordre de grandeur.



(a) Relevé de puissance absorbée

Vitesse programmée (mm/min)	Puissance absorbée (Watt)
500	3
1000	6
2000	15
3000	21
4000	43
5000	53
6000	72
7000	87
8000	108
9000	128
10000	141
20000	348
30000	563
40000	695

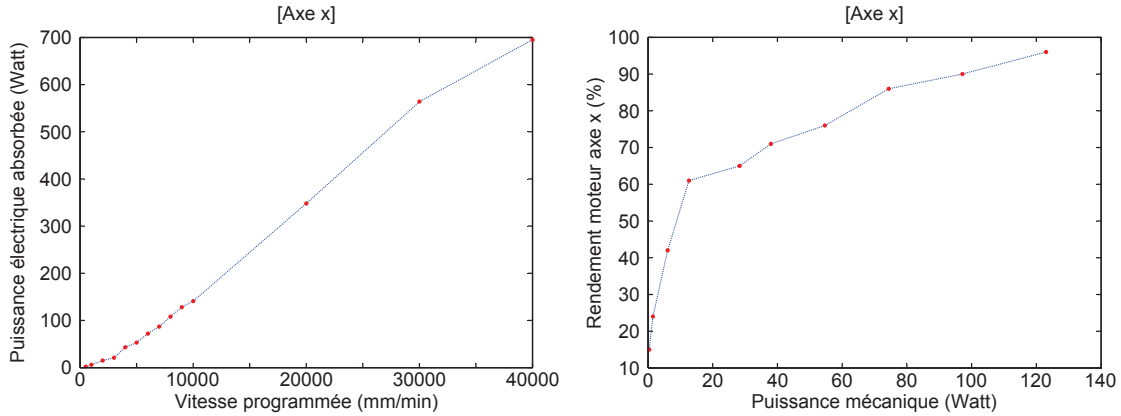
(b) Tableau de consommation

Figure 4.18 – Consommation électrique de l'axe X

À partir de ces relevés de puissance électrique absorbée il est donc possible de définir la courbe de rendement du moteur de l'axe étudié en fonction soit de la vitesse programmée (Figure 4.19a), soit de la puissance mécanique nécessaire au déplacement de cet axe (Figure 4.19b). Ces courbes sont très utiles pour la détermination de la puissance électrique absorbée pour toute puissance mécanique nécessaire. On peut se rendre compte sur ces courbes que le rendement de la chaîne de conversion de chaque axe est faible pour les vitesses et les puissances mécaniques nécessaires dans le cas de la projection de poudres.

La modélisation fine de la consommation électrique des axes de la machine permet de mettre en évidence certains points. On peut ainsi remarquer que pour des vitesses d'avances comme celles utilisées lors de la projection de poudres, la puissance électrique absorbée par les moteurs reste faible. Néanmoins, la modélisation fine proposée permet de connaître l'état du système

ainsi que le temps de fabrication précisément. Ceci sera important pour la suite de l'étude comme nous pourrons le voir.



(a) Puissance absorbée en fonction de la vitesse programmée

(b) Rendement du moteur de l'axe en fonction de la puissance mécanique

Figure 4.19 – Rendement de l'axe X

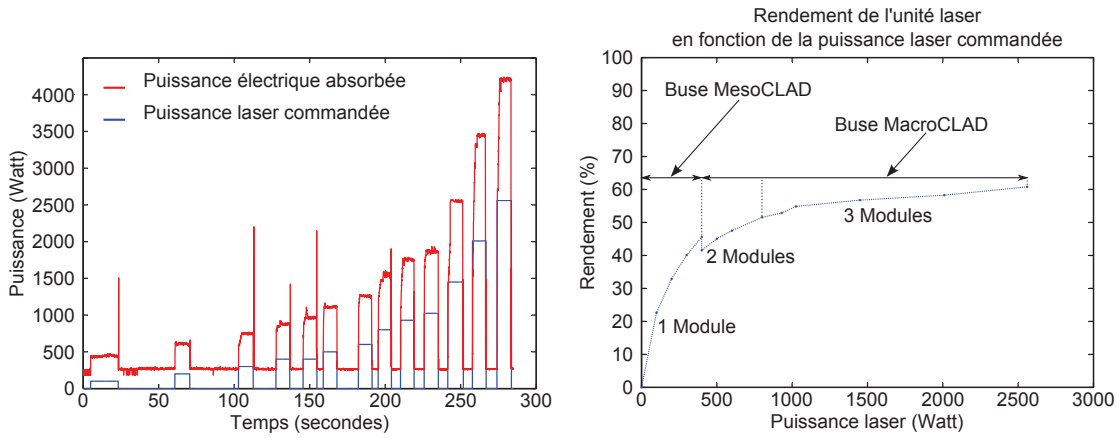
3.2.2 Consommation électrique du laser

La machine de projection de poudres étudiée est dotée d'un laser fibre. Ce laser permet d'obtenir des puissances laser, au niveau du point focal, allant de 100 W jusqu'à 4 200 W. En comparaison, la technologie de type SLS utilise un laser de quelques centaines de Watt. Un tel laser a donc plusieurs avantages. Il est possible de faire fusionner localement une quantité de poudre importante et ainsi d'atteindre des débits de projection de poudres allant jusqu'à 53 mm^3/sec (soit 25 g/min pour de l'acier inoxydable de type 316L). De plus, il est possible de travailler avec des matériaux nécessitant un fort apport énergétique afin de les faire fusionner (le titane, par exemple). La consommation énergétique de ce type de laser est importante et une caractérisation fine est nécessaire afin de déterminer précisément l'impact environnemental associé à l'utilisation de ce type de laser. Afin d'alimenter le laser, la commande électrique est divisée en plusieurs modules de puissance (7 au total) qui sont commandés en fonction de la puissance laser désirée. Chaque module de puissance permet de fournir 700 Watts de puissance laser. Afin de modéliser au mieux la consommation électrique de notre laser, nous proposons un modèle basé sur une série d'expérimentations. En enregistrant la consommation électrique du bloc laser en fonction de la puissance laser commandée, il est donc possible de définir une fonction qui associera à chaque puissance laser commandée, une puissance électrique absorbée. Lors de l'expérimentation, les deux types de buses ont été utilisés (MesoCLAD et MacroCLAD). Il est intéressant de noter que la plus petite des deux buses ne peut pas accepter une puissance laser supérieure à 400 Watts.

La figure 4.20 représente l'enregistrement de la consommation électrique de l'unité laser. Sur la figure 4.20a, la consigne de puissance laser est tracée en bleu tandis que la consommation électrique du bloc est tracée en rouge. À partir de cet enregistrement, il est possible de définir une courbe de rendement présentée sur la figure 4.20b. On peut remarquer sur cette figure le chevauchement des deux types de buses pour la puissance de 400 Watts. Dans cette zone, il est plus intéressant d'utiliser la plus petite des deux buses d'un point de vue consommation électrique. Il est tout de même important de noter que les cordons déposés par cette dernière ne dépassent pas les 0.8 mm de largeur tandis que la seconde buse peut déposer des cordons de près de 4 mm de largeur. Lors d'un choix de stratégie de trajectoires, il peut être nécessaire de faire un choix de tête de projection à utiliser et il faudra alors prendre en compte la remarque précédente. Avant de définir une équation mathématique régissant la consommation électrique du laser, on peut remarquer sur la figure 4.20 la consommation constante de l'unité laser qui est de 250 Watts, notée $Pe^{clad}_{veille\,laser}$. À la suite de ces relevés il est possible de mettre en place une équation mathématique liant la consommation électrique de l'unité laser avec la puissance laser commandée suivant l'équation 4.10. Dans cette équation $g(P_l)$ est définie comme la fonction mathématique qui associe à chaque puissance laser la puissance électrique absorbée (sans la veille).

$$\boxed{Ee^{clad}_{laser} = t^{clad}_{fab} * Pe^{clad}_{veille\,laser} + t^{clad}_{laser} * g(P_l) \quad (kWh)} \tag{4.10}$$

L'étude menée sur la consommation électrique du laser utilisé par le procédé de fabrication par projection de poudres CLAD permet de mettre en évidence une des deux sources de consommation électrique majeure de notre système. De plus, l'utilisation d'un tel laser nécessite l'utilisation d'une unité de régulation de température afin de la limiter au sein du laser. Comme on va le voir dans la partie suivante, ce régulateur a un fort impact en terme de consommation électrique par rapport à l'ensemble de la consommation du système.



(a) Puissance électrique absorbée par le laser

(b) Rendement de l'unité laser

Figure 4.20 – Consommation de l'unité laser

3.2.3 Consommation électrique de l'unité de régulation du laser

La figure 4.21 représente la puissance électrique absorbée par l'unité de refroidissement. Sur ce relevé on peut remarquer que cette unité a deux états de fonctionnement. L'état de veille et l'état en fonctionnement où le régulateur consomme respectivement $Pe_{veille} = 1260W$ et $Pe_{marche} = 2040W$ ce qui n'est pas négligeable vis à vis des autres entités de la machine. La difficulté liée à cette unité de régulation est la modélisation de son état de fonctionnement. En effet, la mise en route de ce régulateur est pilotée par un certain nombres de facteurs tels que la puissance laser, la température de la pièce, le temps de fabrication. Néanmoins, la consommation de cette unité de refroidissement étant importante, il est nécessaire de proposer une modélisation la plus précise possible.

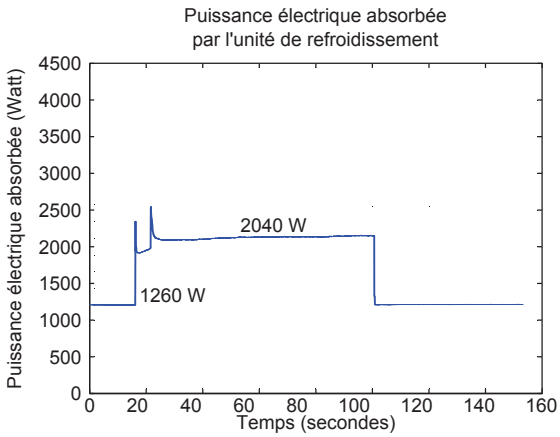


Figure 4.21 – Consommation électrique de l'unité de refroidissement laser

La modélisation proposée est basée sur des équations thermiques simplifiées. On considère que la puissance à évacuer est la différence entre la puissance absorbée par l'unité laser et la puissance laser effective. Autrement dit, cette différence de puissance est intégralement transformée en chaleur. Il faut donc considérer deux états de fonctionnements distincts. Le premier état modélise l'élévation de la température au sein de l'unité laser (Équation 4.11) due à la chaleur à évacuer. Le second modélise la diminution de température au sein de cette même unité suite à la mise en route de l'unité de régulation (Équation 4.12) dont la puissance calorifique permet d'évacuer la chaleur précédente. On considère que le compartiment de l'unité laser représente un volume d'air, V_{air}, de 1 m^3, de capacité thermique $C_{air} = 1,256\ kJ.m^{-3}.K^{-1}$ et $K_{air} = 0.025\ W.m^{-1}.K^{-1}$ à 20°C, dans lequel l'élévation de température sera due à la différence des puissances. La puissance à dissiper est donc vue comme une source extérieure. Dans le second état, on considérera la circulation d'un volume, x_{eau}, de fluide de refroidissement, de capacité thermique $C_{eau} = 4180\ kJ.m^{-3}.K^{-1}$ permettant le refroidissement de l'unité laser.

$$Pe_{laser} - P_{laser} = V_{air} * C_{air} * \frac{d(\Theta(t) - \Theta_{ini})}{dt} + K_{air} * (\Theta(t) - \Theta_{ext}) \tag{4.11}$$

$$P^{clad}_{refroidissement} = x_{eau} * C_{eau} * \frac{d(\Theta(t) - \Theta_{ini})}{dt} \tag{4.12}$$

Les deux équations (4.11 et 4.12) permettent de déterminer l'évolution de la température $\Theta(t)$ au sein de l'unité laser. En fonction de cette température, le régulateur va être soit dans l'état allumé, t_{on}, soit dans l'état de veille. La température de déclenchement est définie par la température maximale admissible par l'unité laser. En connaissant les températures de fonctionnement de l'unité laser, il est possible de définir une plage d'évolution de la température avec un seuil haut impliquant le déclenchement du refroidisseur et un seuil bas impliquant son arrêt. L'équation 4.13 permet de déterminer la consommation énergétique de l'unité de refroidissement en fonction de l'état de ce dernier.

$$\boxed{Ee^{clad}_{refroidisseur} = (Pe^{clad}_{marche\,ref.} - Pe^{clad}_{veille\,ref.}) * t_{on} + Pe_{veille} * t^{clad}_{fab} \quad (kWh)} \tag{4.13}$$

3.2.4 Consommation électrique constante

La machine de projection de poudres étudiée consomme à l'état de veille une puissance électrique, $Pe^{clad}_{constante}$, de 1400 W. Cette consommation constante est due à l'unité de projection de poudres ainsi qu'à l'unité de projection de gaz, aux éléments hydrauliques et à l'armoire électrique gérant la partie commande de la machine. On considère que la puissance constante n'est absorbée que pendant le temps de fabrication t^{clad}_{fab}. À cette première partie s'ajoute l'énergie consommée par l'unité d'extraction des gaz et des particules dont la puissance électrique absorbée, pendant t^{clad}_{fab}, $Pe^{clad}_{extraction\,gaz}$ est constante. On peut alors calculer l'énergie consommée suivant l'équation 4.14.

$$\boxed{Ee^{clad}_{constante} = (Pe^{clad}_{constante} + Pe^{clad}_{extraction\,gaz}) * t^{clad}_{fab} \quad (kWh)} \tag{4.14}$$

3.2.5 Synthèse

La consommation électrique des machines de fabrication représente une grande part des impacts environnementaux qu'elle génère. Dans le cas de la machine de fabrication par projection de poudres on peut remarquer qu'une grande partie de cette consommation énergétique est due à l'unité laser ainsi qu'à son régulateur de température. Les modèles mis en place précédemment permettent de caractériser avec précision la consommation énergétique de notre moyen de production. Néanmoins, dans le cadre de l'analyse de cycle de vie, il est tout aussi important d'évaluer la consommation de matières, de fluides et la production de déchets de fabrication. Ces derniers points sont présentés par la suite.

La figure 4.22 résume la consommation d'énergie électrique en fonction de la puissance laser commandée. Cette figure représente trois états de la machine. Le premier représente la consommation en veille de la machine, le second la consommation constante en fonctionnement et la dernière la consommation électrique en fonction de la puissance laser commandée.

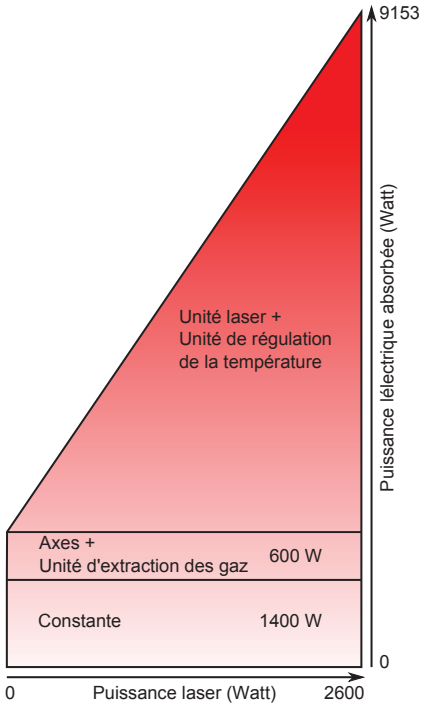
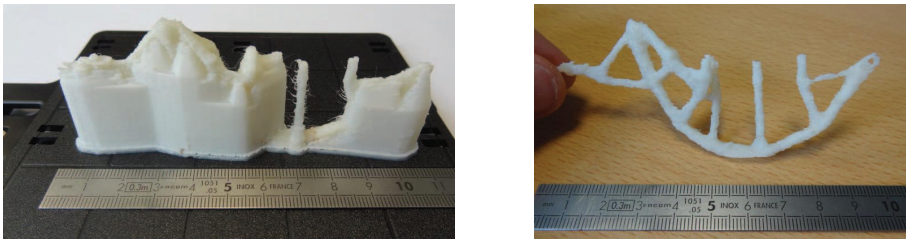


Figure 4.22 – Synthèse de la consommation électrique du procédé CLAD en fonction de la puissance laser commandée

3.3 Évaluation de la consommation de matière

Cette section a pour objectif de mettre en évidence l'importance de prendre en compte la consommation de matières lors de la fabrication par projection de poudres. En effet, tout comme les procédés par enlèvement de matière, la fabrication additive génère des déchets. Il est vrai que cette production de déchets est plus faible que pour les procédés conventionnels mais elle doit être prise en considération. Par exemple, l'impression 3D génère des déchets dus à l'utilisation de matières supports comme le montre la figure 4.23. L'exemple présenté met en avant l'utilisation de supports qui peut être importante dans certains cas. Les procédés par fusion sélective laser, génèrent eux aussi des déchets car même si une grande partie de la poudre non fusionnée est recyclée, une partie de la poudre proche de la zone de fusion ne peut l'être. Un certain nombre d'études scientifiques ont démontré l'avantage de l'utilisation des procédés par ajout de matière en s'intéressant à la réduction de l'utilisation de matières premières car la fabrication par ajout de matière n'utilise que la matière nécessaire à la pièce finale [Hague2007, Benatmane2010]. Néanmoins, la prise en compte des déchets de fabrication est nécessaire dans le but de pouvoir comparer les procédés de fabrication entre eux d'un point de vue environnemental.

La figure 4.24 représente une schématisation de la tête de projection utilisée dans le cadre de la fabrication par projection de poudres. On y retrouve, le faisceau laser permettant la fusion du matériau. Ce faisceau laser est coaxial au cône de poudres, formé par les gaz conformeurs et



(a) Pièce avec support (b) Pièce finale

Figure 4.23 – Exemple de pièce fabriquée par impression 3D avec l'utilisation de support [Ponche2013]

porteurs. Une des difficultés de cette technologie est la formation d'un cône de poudres optimal dans lequel sera projeté le faisceau laser. La formation d'un cône de poudres optimal est essentiel pour la fabrication de la pièce. L'extrémité de ce cône doit être à une distance exacte et connue de la couche précédente. Les réglages des paramètres machine permettant l'obtention de ce cône ne peuvent donc être modifiés.

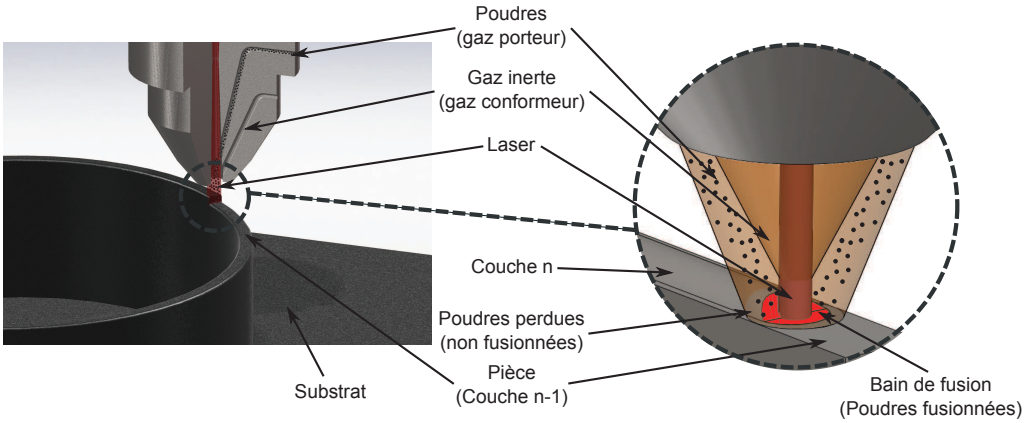


Figure 4.24 – Tête de projection de poudres

On peut remarquer sur cette figure qu'une partie de la poudre projetée rebondit soit sur le substrat soit sur la couche inférieure provoquant ainsi une perte de matières car elle ne sera pas fusionnée. De plus, cette perte de matière dépend du type de buse utilisé ainsi que du débit de poudres commandé. Nous avons réalisé des essais permettant de déterminer le rendement de chaque buse. En considérant les paramètres de fabrication permettant d'obtenir une forme de cordon optimale, le rendement de la tête de projection de plus grand diamètre, MacroCLAD, atteint près de 85%. Pour la seconde buse, MesoCLAD, le rendement est de 50%. Suite à ces remarques, il est donc essentiel de mettre en place des modèles associés à la projection de poudres afin d'évaluer l'impact environnemental lié à la matière perdue ou à la matière utilisée dans la pièce finale.

Tout comme pour l'évaluation de la consommation électrique de notre procédé de fabrication, schématisée par la figure 4.25, la lecture et l'extraction des données issues du programme à commandes numériques nous permet de connaître le débit de poudres d_m^{clad} utilisé lors de la fabrication. De plus, la mise en place d'équations modélisant le comportement de notre machine nous permet de connaître avec précision le temps de fabrication. En effet, comme nous l'avions précisé dans la partie précédente, même si la consommation électrique des axes reste faible devant les autres entités de la machine, la mise en équation du comportement des axes permet de connaître avec précision le temps de fabrication. Cette donnée est nécessaire pour permettre l'évaluation de l'ensemble des composants de la machine.

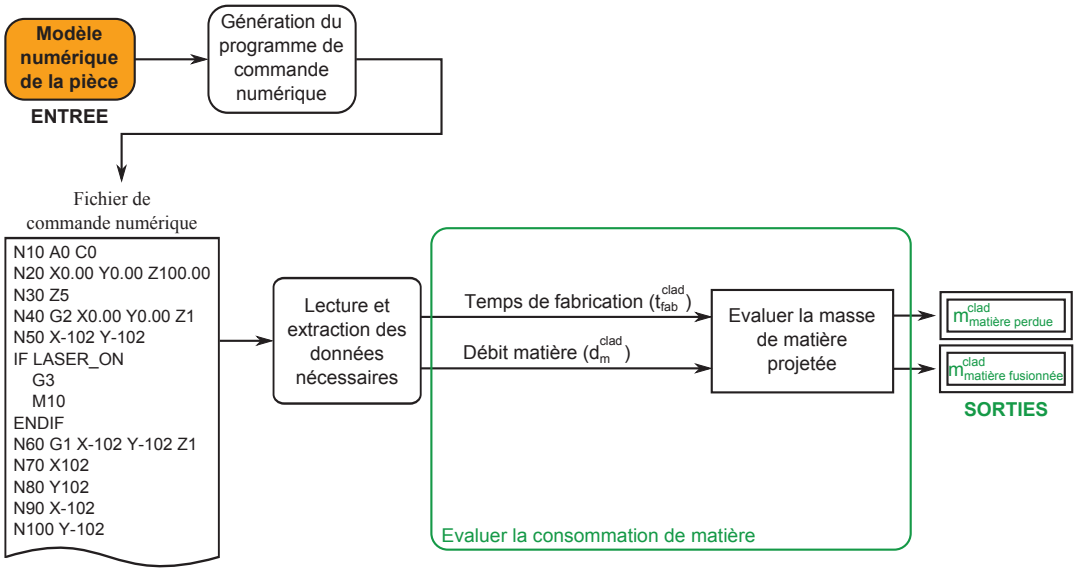


Figure 4.25 – Évaluation de la consommation de matière du procédé CLAD

3.3.1 Consommation de la matière projetée

L'évaluation de la consommation de matière est donnée par l'équation 4.15 où r_b représente le rendement de la buse dépendant du débit de matière commandé et du type de buse utilisée, d_m^{clad} représente le débit de matière commandé et t_{fab}^{clad} représente le temps de fabrication. Dans cette équation, on différencie la masse de poudres fusionnées ($m_{matière\ fusionnée}^{clad}$) de la masse de poudres perdues ($m_{matière\ perdue}^{clad}$). En effet, dans la traduction environnementale qui sera effectuée par la suite, il sera alors possible de pondérer la consommation de matière suivant un coefficient k qui permettra d'appliquer un poids plus important à la poudre perdue.

$$ma_{mat.proj.}^{clad} = m_{matière\ fusionnée}^{clad} + m_{matière\ perdue}^{clad}$$

$$\boxed{m_{mat.\ proj.}^{clad} = [r_b(d_m^{clad}, buse) + k * (1 - r_b(d_m^{clad}, buse)] * \frac{d_m^{clad}}{1000} * \frac{t_{fab}^{clad}}{60} \quad (kg)} \tag{4.15}$$

3.3.2 Synthèse

La méthodologie présentée ci-dessus permet d'évaluer la consommation de matières premières en fonction des paramètres machine se trouvant dans le fichier de commande numérique. Il est important de noter que l'ensemble de la poudre projetée doit être prise en compte dans les calculs de l'impact environnemental.

On peut remarquer que l'équation permettant l'évaluation de la masse de poudres projetées est dépendante du temps de fabrication. En effet, pour la technologie étudiée, il n'est pas envisageable de stopper la projection de poudres lors du process. Afin de stopper la fusion de poudres, seule l'alimentation du laser est coupée car le temps de réponse de l'unité de projection de poudres est trop important (environ 45 secondes avant d'atteindre le régime permanent [Muller2013]). De ce fait, une fois l'unité de projection de poudres démarrée, sauf en cas d'arrêt important du laser, la poudre est projetée en continu. Ce défaut pourrait être évité en rapprochant les bols de poudres plus près de la tête de projection. L'inertie due au transport de la poudre serait alors plus faible et la dynamique de la machine, en terme de projection de poudres, serait augmentée.

Dans la partie 4 de ce chapitre, nous traiterons de la possibilité de recycler la poudre non fusionnée. Il est essentiel de proposer un protocole permettant de recycler cette poudre afin de diminuer son impact environnemental. Néanmoins, la poudre recyclée doit avoir des caractéristiques comparables à la poudre initiale pour qu'elle puisse être utilisée.

3.4 Évaluation de la consommation de fluides

Dans cette dernière partie, la méthodologie permettant d'évaluer la consommation de fluides est présentée. Tout comme pour la consommation de matière, il est nécessaire de prendre en compte cette consommation. Les fluides pris en compte sont de deux types.

- Les fluides dépendant des paramètres de fabrication tels que les fluides nécessaires à la projection de poudres (gaz porteur et gaz conformeur).
- Les fluides indépendants des paramètres de fabrication et dont la consommation peut être assimilée comme constante tels que le fluide nécessaire à l'unité de refroidissement ou l'air comprimé.

La figure 4.26, résume la méthodologie utilisée pour la quantification de la consommation de fluides.

Afin d'évaluer la quantité de fluides consommés, la méthodologie s'appuie sur le modèle numérique de la pièce. Après un traitement puis une extraction des données nécessaires à l'évaluation, la consommation de gaz porteur, la consommation de gaz conformeur ainsi que la consommation de fluide de refroidissement sont estimées.

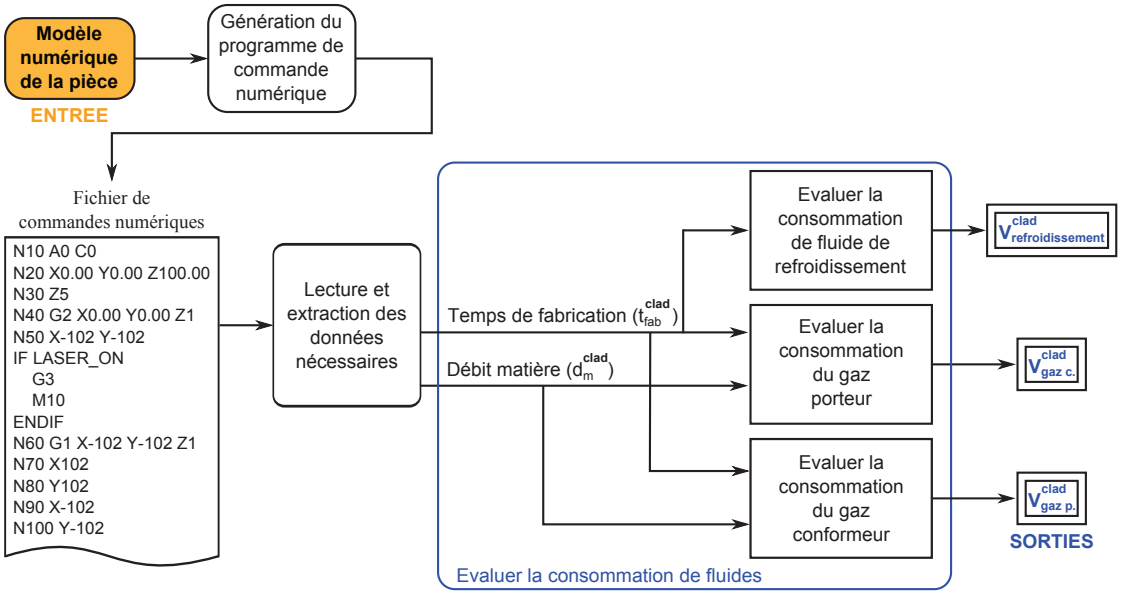


Figure 4.26 – Évaluation de la consommation de fluides du procédé CLAD

3.4.1 Consommation de gaz inerte

La machine étudiée utilise deux gaz de fonctions différentes lors de la fabrication. Ces gaz sont appelés gaz porteur et gaz conformeur et sont représentés sur la figure 4.24. Les fonctions associées à ces gaz sont distinctes. Le premier, le gaz porteur de débit volumique $d_{gaz\,porteur}^{clad}$, est utilisé afin de transporter la poudre métallique se situant dans des bols, sorte de réservoir, jusqu'à la tête de projection. Le second, le gaz conformeur de débit volumique $d_{gaz\,conformeur}^{clad}$, est utilisé pour obtenir la forme intérieure du cône de poudre. La poudre métallique est alors emprisonnée entre ces deux cônes de gaz. La consommation de ces gaz dépend, comme pour la poudre projetée, du débit de matière et du temps de fabrication. En effet, de nombreux essais ont été réalisés afin de déterminer les débits optimaux permettant de former un cône de poudre optimal. La forme du cône de poudre est très sensible à ces débits de gaz. Ces derniers sont donc uniquement dépendant du débit de matière souhaité.

L'équation 4.16 permet d'évaluer la consommation de gaz lors de la fabrication. Cette équation met en avant la possibilité d'utiliser différents types de gaz pour réaliser les fonctions de transport et de création de forme. Le gaz utilisé pour les deux fonctions est de l'argon (gaz inerte). On utilise du gaz inerte afin de protéger le bain de fusion du phénomène d'oxydation.

$$\boxed{V_{gaz}^{clad} = [d_{gaz\,porteur}^{clad} + d_{gaz\,conformeur}^{clad}] * \frac{t_{fab}^{clad}}{60} \quad (l)} \tag{4.16}$$

3.4.2 Consommation de fluides constants

On considère pour cette seconde catégorie de fluides que leur consommation est constante et indépendante des paramètres de fabrication. Dans notre méthodologie nous avons considéré uniquement le fluide nécessaire au système de refroidissement du laser. Ce dernier circulant en circuit fermé, sa consommation ne dépend donc pas de la pièce à produire mais uniquement du taux de charge de la machine. On peut prendre comme hypothèse que ce fluide est changé une fois par an. On peut donc en déduire la consommation de fluide par pièce en fonction du nombre de pièces produites pendant l'année. Dans cette application, il est important de noter que nous considérons uniquement la consommation du fluide de refroidissement. Or, l'unité de régulation de la température peut être utilisée par un ensemble de machines et n'est pas forcément dédiée à cette machine. La consommation d'air comprimé est aussi difficile à évaluer car une partie non négligeable de la production d'air comprimé est faite pour combler les fuites dans le réseau. L'évaluation de la consommation des fluides annexes est difficilement mesurable. Le modèle mis en place, fonctionne pour notre application mais n'est peut être pas à l'image de ce qui peut se faire dans les industries.

$$\boxed{V^{clad}_{refroidissement} = V_{total\,refroidissement} * \frac{t^{clad}_{fab}}{t_{annuel}} \quad (l)} \tag{4.17}$$

3.4.3 Synthèse

La méthodologie proposée ci-dessus permet d'évaluer de façon précise la consommation de fluides utilisés lors de la phase de fabrication, résumée par l'équation 4.18. On distingue deux types de fluides. Les fluides dont la consommation dépendra uniquement de la pièce à produire et les fluides dépendant de la machine. La modélisation de la consommation du premier type de fluide est assez simple contrairement à la seconde qui nécessite quelques hypothèses. En effet, pour évaluer la consommation des fluides utilisés par la machine tels que le fluide de refroidissement, l'air comprimé - utilisé pour le fonctionnement des actionneurs et pré-actionneurs pneumatiques - ou le fluide de refroidissement des axes, il est nécessaire de connaître la fréquence du changement de ces fluides, le taux de charge de la machine si le changement de ces fluides dépend du chargement de la machine, et le nombre de machines utilisant ces fluides.

$$\boxed{V^{clad}_{fluides} = V^{clad}_{gaz} + V^{clad}_{fluide\,refroidissement}} \tag{4.18}$$

3.5 Synthèse de l'étude sur la projection de poudres métalliques

L'étude menée dans cette section permet de modéliser finement le procédé de fabrication par projection de poudres afin d'en évaluer l'impact environnemental. Cette étude nous a permis de mettre en évidence l'importance de proposer des modèles d'évaluations précis, et non pas uniquement des modèles globaux peu précis et non réutilisables, permettant d'obtenir une image la plus précise possible de l'ensemble des consommations liées à la fabrication. Cette modélisation nécessite à la fois la mise en place d'une approche pièce-procédé et une connaissance fine du process de fabrication. Ceci se traduit naturellement par le besoin de partir du pilotage

de la machine et donc de son programme à commande numérique pour déterminer l'impact environnemental associé couple pièce-procédé.

4 Valorisation de la poudre non fondue

Cette section a pour objectif de proposer une méthodologie de recyclage de la poudre projetée mais non fusionnée. En effet, comme nous avons pu le voir dans la sous-section **évaluation de la consommation de matière**, une partie de la poudre projetée rebondit soit sur le substrat soit sur la couche inférieure et n'est donc pas fusionnée par le faisceau laser. Il est donc nécessaire, d'un point de vue environnemental et économique, de proposer une méthodologie permettant de valoriser (par recyclage ou par réutilisation) et caractériser ce type de poudre. En effet, la fabrication additive étant vue comme un procédé de fabrication "propre", car il permet de n'utiliser que la matière nécessaire à la pièce, il est important de limiter la quantité de déchets de fabrication.

Actuellement, les filières de recyclage sont généralement technico-économiquement intéressantes pour des grandes quantités de matériaux, et par conséquent mal dimensionnées pour les petites quantités générés par les procédés de fabrication additive. Seuls les grands industriels, tel que De Richebourg pour le recyclage de matériaux et Hoganas pour la production de poudres, mettent en place des filières pour de grandes quantités à recycler. Néanmoins, l'essor des procédés de fabrication par ajout de matière de poudres métalliques nécessitent dans les années à venir la mise en place de filières plus structurées permettant le recyclage de tout type de poudres même en faible quantité. À partir de cette constatation, nous avons voulu proposer une méthodologie de recyclage de poudres métalliques. Cette méthodologie s'applique à de faibles quantités de poudres à recycler et est issue d'expérimentations de laboratoire. La poudre recyclée sera, dans un premier temps, analysée d'un point de vue géométrique afin d'être comparée à la poudre initiale. Dans un second temps, nous effectuerons des essais mécaniques sur des éprouvettes réalisées avec de la poudre recyclée afin de déterminer les grandeurs mécaniques caractéristiques.

4.1 Méthodologie de recyclage de poudres métalliques

Pour cette étude nous avons utilisé de la poudre d'acier inoxydable de type 316 L dont la distribution initiale est de 45 μm à 90 μm. Cette poudre provient des déchets de production du procédé de projection de poudres étudié dont une partie de la poudre projetée n'est pas fusionnée. Néanmoins, il peut s'avérer que cette poudre soit affectée géométriquement et structurellement du fait de son passage près du bain de fusion. Certains grains peuvent s'agglomérer lors de leur passage près de celui-ci. La figure 4.27 présente la méthodologie de recyclage de la poudre métallique que nous avons mise en place.

4.1.1 Description de la méthodologie de recyclage

Dans un premier temps après avoir aspiré la poudre à recycler il est nécessaire de réaliser une première étape de séchage. En effet après avoir été projetée, la poudre devient humide. Cette humidité est due à l'air ambiant mais aussi aux différents fluides présents dans la machine.

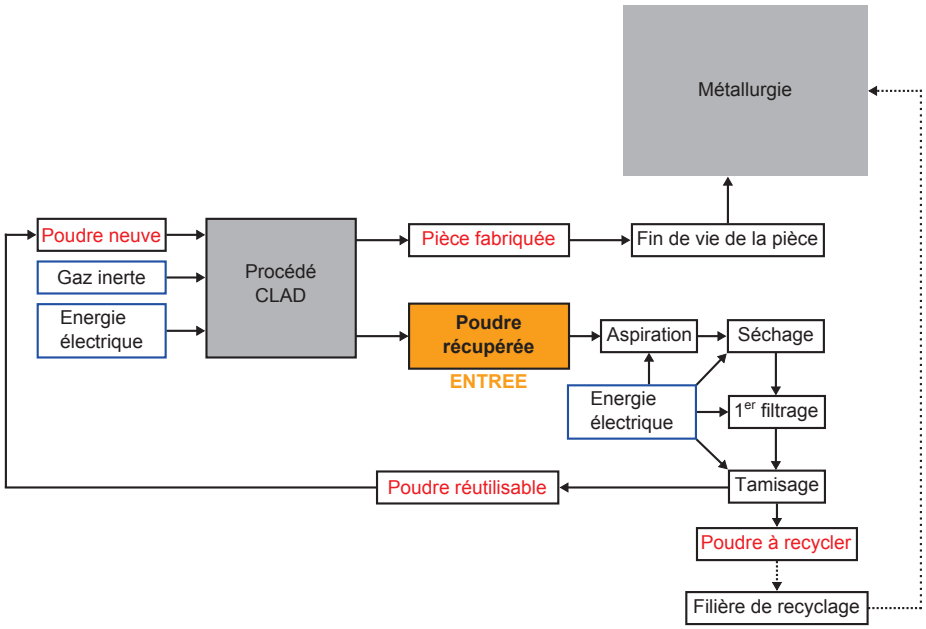


Figure 4.27 – Méthodologie de recyclage de la poudre non fusionnée

Une fois la poudre séchée, nous avons mis en place un premier filtrage "grossier". Ce filtrage permet de supprimer l'ensemble des particules ayant été agglomérées ou les déchets métalliques présents dans la machine. La poudre est ensuite tamisée. Avant de réintroduire la poudre dans la machine, des essais de coulabilité, ainsi qu'une analyse géométrique, ont été réalisés. Pour finir, afin de déterminer l'influence de la poudre recyclée sur les performances mécaniques des pièces fabriquées, nous avons réalisé des éprouvettes de traction en faisant varier le taux de poudre métallique recyclée par rapport à la poudre neuve. Pour la suite de l'étude nous considérerons cinq populations de poudres dont la définition est donnée dans le tableau 4.2. Le protocole expérimental de chaque étape de la méthodologie ainsi que les moyens de contrôle sont présentés par la suite.

Échantillon	**Poudre neuve**	**Poudre recyclée**
Poudre A	100 %	0 %
Poudre B	75 %	25 %
Poudre C	50 %	50 %
Poudre D	25 %	75 %
Poudre E	0 %	100 %

Tableau 4.2 – Définition du taux de poudres recyclées et du taux de poudres neuves par échantillon

4.1.2 Tamisage et caractérisation géométrique

L'étape présentée dans ce paragraphe est une étape essentielle dans le recyclage de la poudre. En effet, lors de la récupération de la poudre dans la machine, nous récupérons un ensemble de déchets (dont des copeaux issus de phase d'usinage réalisée sur la machine) et de la poudre à recycler. Il est donc nécessaire d'homogénéiser la poudre récupérée et de supprimer les éventuels déchets. Pour cela, nous avons réalisé une étape de tamisage.

Nous avons utilisé une tamiseuse mécanique, Retsch AS 200 Basic, sur laquelle il est possible de régler l'amplitude et la durée des oscillations permettant de mettre en vibration le dispositif de tamisage constitué de tamis dont le maillage peut varier de 45 μm à 4000 μm. Nous avons réalisé cette première étape de tamisage avec un tamis de 100 μm afin de supprimer les particules supérieures à cette dimension. Afin d'évaluer l'influence des paramètres de tamisage, nous avons réalisé deux types de tamisage en faisant varier l'amplitude ainsi que la durée de tamisage (voir tableau 4.3). On peut remarquer que selon le type de tamisage, le rendement, défini par le rapport de la masse de poudres initiales sur la masse de poudres finales tamisées, est différent.

	Tamisage 1	**Tamisage 2**
Amplitude (mm)	1.8	2.3
Durée (heure)	1	2
Rendement tamisage (%)	64	90

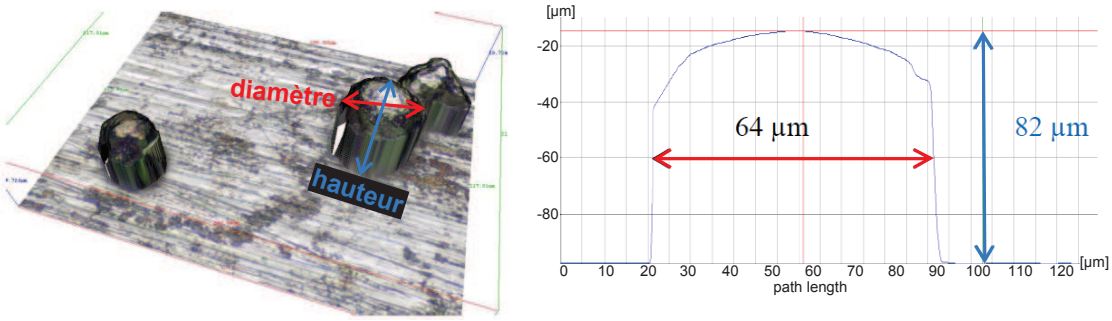
Tableau 4.3 – Paramètres de tamisage

Pour le tamisage de type 2 le rendement du tamisage est de 90 % tandis que pour le tamisage de type 1 le rendement est de 64 %.

Nous avons ensuite procédé à une étape de contrôle géométrique à l'aide d'un appareil de mesure sans contact, Alicona InfiniteFocus, afin de s'assurer que la poudre tamisée, par chaque type de tamisage, soit comparable à la poudre neuve. Cette appareil de mesure permet réaliser une photographie couche après couche d'une pièce dans le but d'obtenir une vue tridimensionnelle. Le capteur optique réalise une première acquisition puis est translaté d'un incrément suivant l'axe orthogonale où une seconde acquisition est réalisée. Ces étapes sont répétées successivement afin d'obtenir une vue tridimensionnelle de l'objet analysé.

En observant les résultats de mesures on s'aperçoit qu'aucune particule de poudre ne peut être représentée par une sphère parfaite. Nous avons donc mesuré, pour chaque particule de poudre photographiée, la plus grande longueur dans le plan. Cette longueur permet de définir le diamètre maximum du grain. Nous avons ensuite mesuré la taille du grain suivant l'axe de la mesure. Cette seconde mesure définit la hauteur du grain. Pour finir, nous avons défini la sphéricité de chaque particule de poudre comme le rapport du diamètre sur la hauteur pour chaque particule. Pour une

particule de poudre considérée comme parfaite le diamètre est égal à la hauteur et la sphéricité vaut 1.

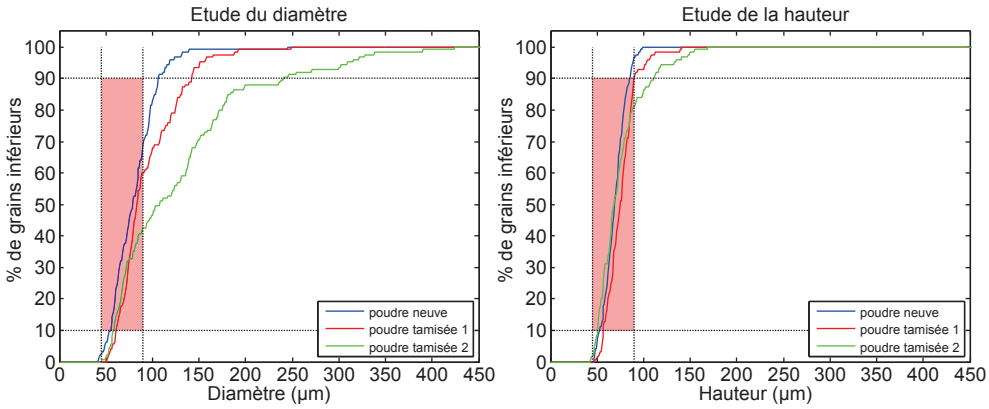


(a) Prise de vue sur Alicona InfiniteFocus

(b) Mesures effectuées

Figure 4.28 – Étude géométrique sur Alicona InfiniteFocus

Ces caractéristiques sont importantes car elles permettent de définir les particules. Pour qu'un échantillon de poudres soit valable d'un point de vue de la norme, en considérant les grains de poudre comme des sphères parfaites, il est nécessaire que 80 % des grains aient un diamètre compris entre 45 μm et 90 μm. Ces études géométriques ont été réalisées sur un population de 125 grains de poudres par échantillon afin d'être en accord avec la norme XP E67-010 [ISO2012b] définissant les caractéristiques géométriques nécessaire pour qu'un lot de poudre soit accepté.



(a) Variabilité des diamètres de particules

(b) Variabilité des hauteurs de particules

Figure 4.29 – Étude géométrique des particules de poudres recyclées en fonction du mode de tamisage

La figure 4.29 illustre les résultats de l'étude géométrique. Sur la figure 4.29a, on représente pour chaque diamètre d - où d varie de 0 μm à d_{max} - le pourcentage de particules de l'échan-

tillon dont le diamètre est inférieur. De même sur la figure 4.29b, on représente pour chaque hauteur h - où h varie de 0 μm à h_{max} - le pourcentage de particules de l'échantillon dont la hauteur est inférieure. Pour qu'un échantillon de poudre soit conforme selon la norme XP E67-010, il faut que les courbes tracées se situent dans la zone rouge représentées sur chaque figure. Pour la poudre d'acier inoxydable, 316 L 45-90 μm, étudiée dans cette expérimentation, cette zone correspond à l'acceptation de 10 % de particules en dessous de 45 μm et 10 % de particules au dessus de 90 μm.

Selon cette méthode, on peut remarquer que l'ensemble des échantillons de poudres (poudre neuve, poudre tamisée 1 et poudre tamisée 2) seraient rejetés vis à vis de la variabilité des diamètres car aucune courbe ne se trouve dans la zone de tolérance. En ce qui concerne la variabilité sur les hauteurs des particules issus du tamisage de type 1, on remarque de la distribution est proche - et conforme - à la distribution de la poudre neuve. L'échantillon de poudre de type 2 n'est pas conforme et doit être rejeté.

La figure 4.30 représente l'étude de la sphéricité des particules de poudre. Les variations de la sphéricité pour les particules de poudre issues de la poudre neuve et du tamisage de type 1 peuvent être modélisées par des courbes gaussiennes centrées sur la moyenne de l'échantillon. L'écart type de ces deux populations est très faible comparé à celui de la population issue du tamisage de type 2. En ce qui concerne les particules de poudres issues de ce tamisage, on observe une forte variabilité sur la sphéricité. En effet, ce mode de tamisage a tendance à forcer le passage des particules que l'on qualifiera de "longue" du fait qu'une des dimensions de la particule de poudre soit plus importante que les autres. Les particules ne sont plus sphériques mais représentées par des ellipsoïdes.

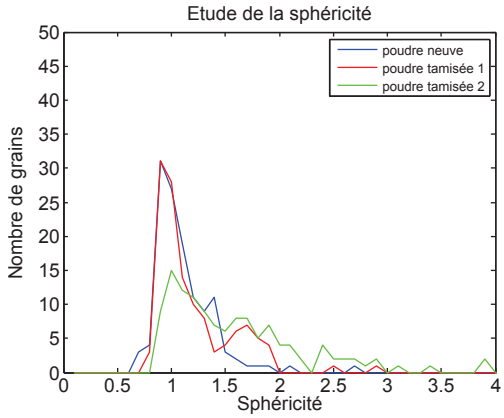


Figure 4.30 – Étude de la sphéricité des particules de poudres recyclées en fonction du mode de tamisage

Les résultats moyens de cette expérimentation sont présentés dans le tableau 4.4. Pour la suite de l'étude nous utiliserons uniquement de la poudre issue du mode de tamisage 1. Certes le rendement de ce mode de tamisage est plus faible (64 %) mais la poudre obtenue respecte mieux

les caractéristiques géométriques souhaitées. Les caractéristiques géométriques de la poudre obtenue par le mode de tamisage 2 sont trop éloignées de la poudre neuve.

	Poudre neuve	**Poudre tamisée 1**	**Poudre tamisée 2**
Diamètre moyen (μm)	81,81	94,28	130,28
Défaut de diamètre (%)	36	44	58
Hauteur moyenne (μm)	69,83	83,74	75,49
Défaut de hauteur (%)	5	11	21
Sphéricité moyenne	1,17	1,27	1,67

Tableau 4.4 – Analyse géométrique des poudres en fonction du mode de tamisage

4.1.3 Séchage de la poudre et essai de coulabilité

Afin d'assurer la coulabilité de notre poudre recyclée, nous l'avons caractérisée suivant la norme NF EN ISO-4490 [ISO2008]. En effet, la coulabilité est un paramètre essentiel en fabrication additive par projection de poudres car les caractéristiques mécaniques de la pièce fabriquée en dépendent. L'expérimentation permettant de caractériser la coulabilité de poudres est réalisée au moyen d'un entonnoir de Hall conforme à cette même norme. La figure 4.31 illustre l'expérimentation.

(a) Schématisation de l'entonnoir de Hall (b) Entonnoir de Hall

Figure 4.31 – Entonnoir de Hall

Cette expérimentation consiste à mesurer le temps nécessaire à l'écoulement de 50 grammes de poudres métalliques à travers l'orifice de l'entonnoir calibré de Hall.

Échantillon	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**
durée (secondes)	20,1	NA	NA	NA	NA
durée (secondes)	19,5	NA	NA	NA	NA
durée (secondes)	19	NA	NA	NA	NA

Tableau 4.5 – Résultat de coulabilité après séchage à 100°C

Nous avons réalisé dans un premier temps, des essais de coulabilité sans sécher préalablement la poudre. Ces essais n'étant pas concluants, nous avons mis en place une étape de séchage de la poudre afin d'en éliminer toute trace d'humidité. Nous avons donc séché la poudre dans un four "semi-industriel" à 100°C pendant 24 heures. Ces valeurs permettent d'éliminer, par vaporisation, toute trace d'eau présente entre les grains de poudre. À partir de cette poudre séchée nous avons réalisé une seconde série d'essais de coulabilité. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.5. Ces résultats montrent que cette étape de séchage à 100°C n'est pas suffisante pour obtenir une poudre de bonne qualité. En effet, la poudre ne s'écoule pas dans l'entonnoir de Hall. Pour finir, nous avons augmenté la température du four afin de réaliser une étape de séchage à 200°C pendant 24 heures afin de supprimer toute trace d'humidité.

Échantillon	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**
durée (secondes)	19,5	17	16,75	16,75	16,6

Tableau 4.6 – Résultat de coulabilité après séchage à 200°C

Le tableau 4.6 ainsi que la figure 4.32 présentent les résultats des essais de coulabilité en fonction du taux de recyclage après une étape de séchage à 200°C pendant 24 heures. Ces paramètres sont issus d'essais réalisés dans le but d'obtenir une poudre pour laquelle on puisse mesurer une coulabilité. On peut remarquer sur ces figures, que la poudre s'écoule correctement dans le dispositif expérimental. De plus, la coulabilité a tendance à être améliorée dans le cadre de poudres recyclées.

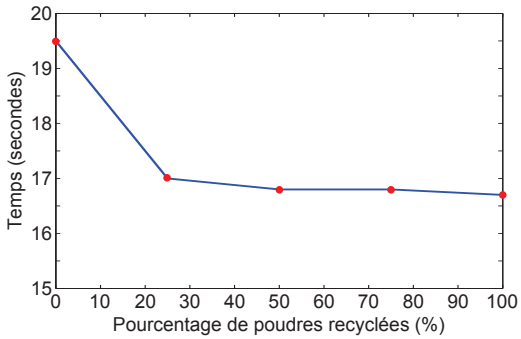


Figure 4.32 – Coulabilité en fonction du taux de poudres recyclées

Nous avons pu remarquer que cette étape de séchage de la poudre est une étape nécessaire afin d'assurer la bonne coulabilité de cette dernière. Cette étape constituera par la suite la première étape de notre méthodologie permettant d'obtenir de la poudre recyclée de bonne qualité. Il serait nécessaire de réaliser une observation micrographique ainsi qu'une diffraction par rayon X des particules de poudre afin d'observer une possible oxydation satellite ayant une influence sur la coulabilité.

4.2 Caractérisation mécanique d'éprouvettes fabriquées à partir de poudres recyclées

Suite à l'étude géométrique menée précédemment, nous avons réalisé des éprouvettes (Figure 4.33) de traction afin de déterminer l'influence du taux de poudres recyclées dans une éprouvette sur les caractéristiques mécaniques de cette dernière. Cette étude peut être comparée à l'étude menée par Dotchev et al. [Dotchev2009] qui met en place une méthodologie permettant d'évaluer la quantité maximale de poudres recyclées admissibles dans le procédé de fusion selective de poudres plastiques. Ils étudient aussi l'influence du nombre de recyclages possibles avant l'apparition d'effet peau d'orange sur les pièces fabriquées.

Cependant, les caractéristiques mécaniques de poudres métalliques ne sont pas aussi sensibles que les poudres polymères. En effet, ces dernières sont très sensibles à l'exposition laser ainsi qu'à la variation de température et leurs caractéristiques mécaniques s'effondrent à la suite d'expositions répetées.

En reprenant la dénomination définie dans le tableau 4.2, nous avons réalisé quatre éprouvettes par échantillon de poudre - cinq échantillons au total - afin de caractériser la limite d'élasticité, l'allongement à la rupture, la résistance à la traction ainsi que le module d'élasticité de chaque échantillon.

Données de fabrication	
Type de buse	MacroCLAD
Matériau	Acier 316L
Puissance laser	3200 W
Débit de matière	25 g/min
Vitesse d'avance de la tête de projection	1000 mm/min
Orientation de fabrication	Cordons déposés suivant l'axe X

Tableau 4.7 – Données de fabrication pour les éprouvettes de traction

L'obtention de ces éprouvettes nécessite deux étapes de fabrication. Dans un premier temps, le brut est fabriqué à partir du procédé par projection de poudres (Figure 4.33b). Pour cette étude, nous avons utilisé la buse permettant de déposer des cordons de matières de 4 mm de

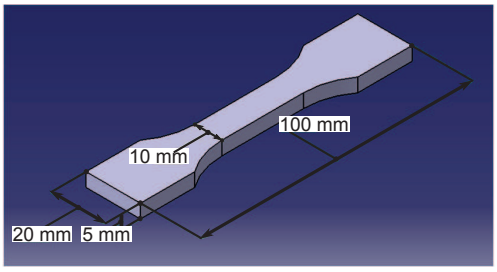
largeur (MacroCLAD). Les données de fabrication sont données dans le tableau 4.7. Une étape de finition, réalisée par usinage, permet d'obtenir des éprouvettes de traction aux dimensions normalisées, suivant la norme ISO 6892-1 [ISO2009], (Figure 4.33c). Cette finition permet aussi de supprimer les micro-fissures issues du procédé primaire qui pourraient être préjudiciables pour les essais.

4.2.1 Essais de traction

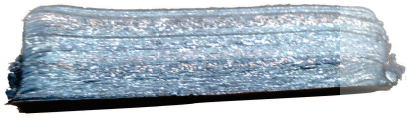
Le tableau 4.8 présente les résultats obtenus suite aux essais de traction réalisés. Pour chaque échantillon de poudre, nous avons réalisé au minimum 4 éprouvettes. Dans ce tableau, on retrouve les valeurs moyennes et l'écart type des principales caractéristiques mécaniques pour chacun de nos échantillons ainsi que les caractéristiques mécaniques d'une éprouvette réalisée à partir de brut d'acier inoxydable 316 L obtenu par laminage et dont la géométrie finale a été obtenue par usinage. Les caractéristiques mécaniques mesurées sont les suivantes :

- la limite d'élasticité, notée Re, exprimée en MPa ;
- la résistance à la traction, notée Rm, exprimée en MPa ;
- l'allongement à la rupture, noté A, exprimé en %.

Dans un premier temps, on peut remarquer, dans les conditions de fabrication évoquées et pour ce type d'éprouvettes, que la limite d'élasticité des éprouvettes obtenues par projection de poudres est comparable à celle des bruts obtenus par laminage. En ce qui concerne la résistance à la traction, on observe un écart de plus de 50 % entre les éprouvettes obtenues par projection



(a) CAO de l'éprouvette



(b) Éprouvette brute (CLADDée)

(c) Éprouvette finale (Usinée)

Figure 4.33 – Géométrie de éprouvettes de traction réalisée par projection de poudres puis usinage

Échantillon	**Re** (MPa)	*σ_{Re} (MPa)	**Rm** (MPa)	*σ_{Rm} (MPa)	**A** (%)	*σ_A (%)
Poudre A	297	20	473	10	39	3
Poudre B	289	25	421	30	11	3
Poudre C	303	16	474	11	19	2
Poudre D	302	15	484	14	18	2
Poudre E	286	12	415	44	12	4
316L : Laminé	392	2.1	1022	3.5	69	0.1

* σ_i représente l'écart type de la valeur considérée i pour chaque échantillon

Tableau 4.8 – Résultats moyens des essais de traction sur l'ensemble des échantillons

de poudres et les éprouvettes laminées. De même pour l'allongement à la rupture, on observe une forte variabilité sur nos mesures et un écart important par rapport à l'échantillon de contrôle.

La figure 4.34 représente l'ensemble des essais de traction réalisés. On retrouve la valeur moyenne des essais en trait continu. Ces courbes sont complétées par une analyse de la variation de la résistance maximale à la rupture représentée par les cercles sur chaque courbe. On peut remarquer sur ces courbes que la variation de valeur de la résistance maximale est importante pour l'échantillon issu de poudre 100 % recyclée (en violet). L'ensemble des résultats des essais de traction sont donnés en annexe 2.

Suite à ces essais plusieurs points peuvent être soulevés. On peut remarquer, dans un premier temps, que le taux de poudre recyclée a très peu d'influence sur la limite d'élasticité de l'éprouvette. De plus, on ne remarque que très peu de différence sur la résistance maximale à la rupture. Cependant, on peut remarquer que la moindre quantité de poudres recyclées présente dans l'éprouvette a des influences sur l'allongement à la rupture. Enfin, il semble difficile d'établir une relation linéaire entre le taux de poudres recyclées présent dans l'éprouvette et les caractéristiques mécaniques de l'éprouvette.

Une des études menées par Pierre Muller [Muller2013] dans ses travaux de thèse permet de mettre en évidence les caractéristiques mécaniques d'une éprouvette de traction réalisée en fabrication additive. Les caractéristiques mécaniques issues de cette étude sont résumées dans le tableau 4.9. Il est important de noter que la buse utilisée dans cette étude est la buse de plus petit diamètre, qui permet de fabriquer des cordons de 0.8 mm de largeur, tandis que nous avons utilisé la buse de plus gros diamètre (4 mm d'épaisseur par cordon).

Pour finir, nous avons remarqué un décollement des couches les unes par rapport aux autres suite aux essais réalisés. La figure 4.35 illustre ce phénomène. Ce décollement des couches peut être une des sources de la dégradation des caractéristiques mécaniques observées précédemment.

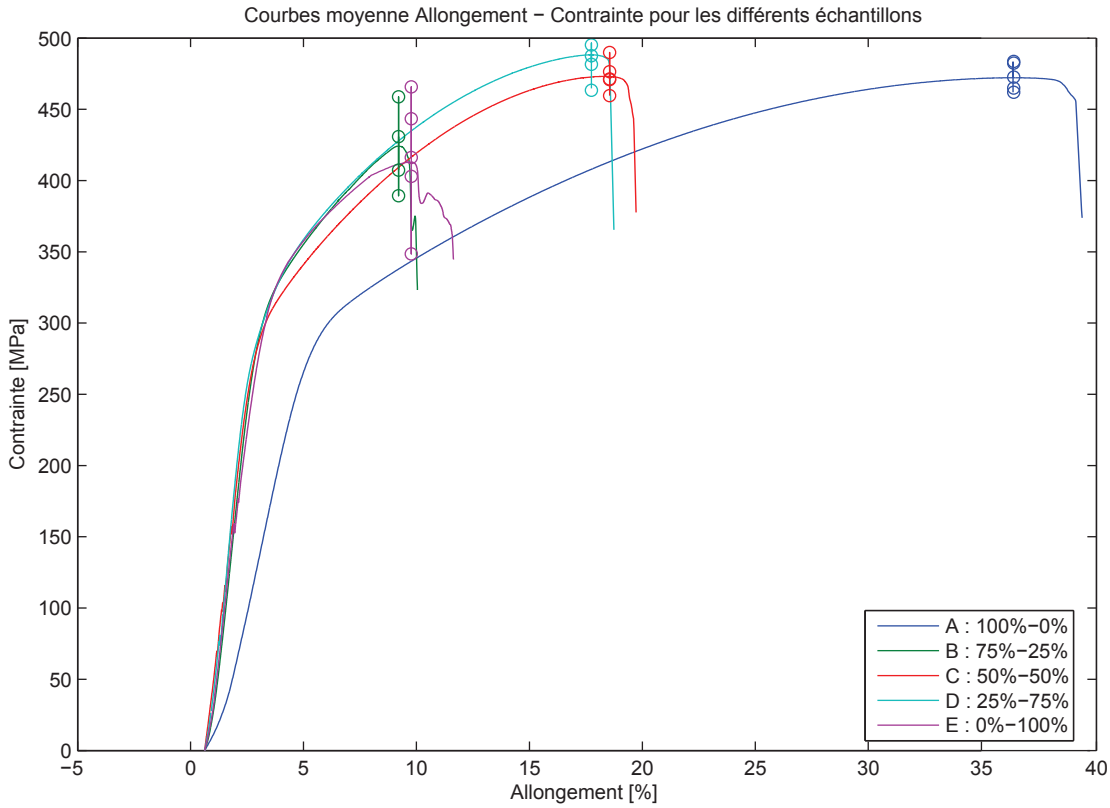


Figure 4.34 – Résultats des essais de traction de l'ensemble des échantillons

Échantillon	**E** (GPa)	**Re** (MPa)	**Rm** (MPa)	**A** (%)
316L : fabrication additive	150 / 175	401 / 403	796 / 771	43.5 / 33.1

Tableau 4.9 – Résultats des essais de traction réalisés sur une éprouvette obtenue par projection de poudres avec la buse MesoCLAD [Muller2013]

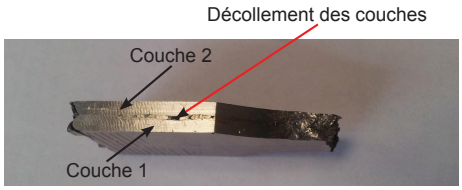


Figure 4.35 – Illustration du décollement de couche sur une éprouvette soumise à de la traction

4.3 Synthèse de l'étude sur la valorisation de poudres métalliques

Dans cette section nous avons proposé un protocole permettant de recycler la poudre non fusionnée lors de la fabrication par projection de poudres. En effet, afin de minimiser l'impact environnemental dû à la production de déchets sous forme de poudres métalliques il est im-

portant de proposer une telle méthodologie. Dans cette méthodologie nous avons pu mettre en évidence la nécessité de réaliser une étape de séchage afin que les grains de poudres puissent s'écouler correctement. De plus, les paramètres de tamisage proposés permettent d'obtenir des poudres recyclées de mêmes caractéristiques géométriques que la poudre neuve. Enfin, la poudre issue de ce recyclage a été caractérisée afin de déterminer si elle avait une influence sur les caractéristiques mécaniques d'une pièce qui contiendrait de la poudre recyclée. Les essais menés ne permettent pas de définir une loi de comportement linéaire liant le taux de poudres recyclées avec ces caractéristiques mécaniques. Néanmoins, on peut remarquer qu'il n'y a pas de dégradation de la résistance à la rupture ainsi que de la limite d'élasticité. Les valeurs de ces caractéristiques sur les éprouvettes testées sont quasiment identiques aux valeurs issues d'éprouvettes ne contenant pas de poudres recyclées. Dans le cadre de l'analyse de cycle de vie, le recyclage de la poudre nécessite un certain nombres d'étapes dont il est nécessaire de quantifier l'impact environnemental. L'impact environnemental sera caractérisé par une mesure de la consommation électrique de l'ensemble du processus de recyclage ainsi que du rendement de certaines de ces opérations. De plus, nous pouvons définir un rendement global à cette étape de recyclage qui est de 64%.

Afin de s'assurer d'une bonne homogénéité de la poudre recyclée par rapport à la poudre neuve, il serait intéressant de réaliser des essais de caractérisation microscopique afin de vérifier si la poudre recyclée n'a pas changé d'état structurel.

5 Synthèse

La méthodologie d'évaluation des impacts environnementaux en phase de fabrication d'un produit proposée considère l'ensemble des phases de fabrication de ce dernier. En effet, il est important de garder une vision globale sur le processus de fabrication (mise en forme des bruts, fabrication des pièces, recyclage des déchets) dans le cadre d'une analyse environnementale. Ceci est illustré par la figure 4.36. Cette vision globale permet d'éviter tout transfert d'impacts en phase de fabrication. Dans cette section, nous avons appliqué cette méthodologie au procédé de fabrication par projection de poudres métalliques. Afin de respecter la méthodologie proposée, nous avons évalué l'impact environnemental de la phase de production de poudres, de fabrication de la pièce et de recyclage de la poudre.

Dans le but d'évaluer l'impact environnemental de la phase de fabrication nous avons développé des modèles locaux permettant d'estimer les consommations de chaque source contributrice à l'impact environnemental global. Ces modèles, appuyés sur des expérimentations, permettent d'évaluer la consommation énergétique de l'ensemble des entités constituant la machine de fabrication ainsi que la consommation énergétique durant la phase de production de poudres et de recyclage. De plus, nous avons développé des modèles locaux permettant d'évaluer la consommation de fluides et de matières. En effet, comme nous avons pu le souligner, 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. L'étude de la consommation énergétique seule ne suffit pas.

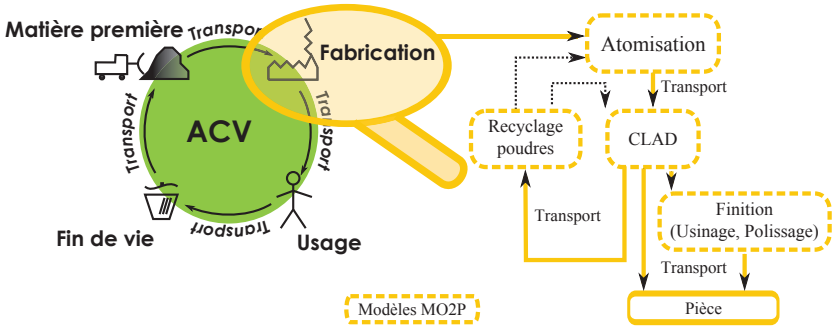


Figure 4.36 – Focus sur l'étape de fabrication lors d'une analyse de cycle de vie

La connaissance du procédé est une donnée primordiale afin de pouvoir proposer des modèles d'évaluation précis. La proposition de modèles trop généraux que l'on retrouve dans certaines bases de données peut conduire à des erreurs importantes dans l'estimation de l'impact environnemental global. Avram a montré durant ses travaux de thèse [Avram2010] que des erreurs de près de 100 % peuvent être commises dans les bases de données lors de l'évaluation de la consommation énergétique des procédés d'usinages.

Les outils de modélisation développés permettent de quantifier l'impact environnemental à partir de la traduction du modèle numérique de la pièce en code de pilotage machine (code G). Ils peuvent donc être utilisés dès l'étape de conception afin d'accompagner le concepteur dans son choix de procédés, de formes ou de paramètres de fabrication afin de minimiser l'impact environnemental de sa pièce en phase de fabrication.

Pour finir, nous avons mis en place une méthodologie permettant de valoriser la matière non-fusionnée lors de l'étape de fabrication par projection de poudres. Nous avons montré en caractérisant géométriquement la poudre valorisée, qu'en suivant un protocole de recyclage, 64 % de la poudre non-fusionnée peut être de nouveau utilisée. Néanmoins, certaines caractéristiques mécaniques de la poudre valorisée sont légèrement dégradées.

5

Démonstrateur informatique et validation du modèle

Sommaire

1 **Présentation du démonstrateur développé** 124
2 **Validation du modèle par rapport à la fabrication d'une pièce réelle** . . . 131
3 **Synthèse** 135

Le cinquième chapitre de ce manuscrit vise à présenter le **démonstrateur informatique** qui a été développé en relation avec la méthodologie présentée. Cet outil informatique a pour objectif d'être utilisé par les concepteurs de pièces mécaniques ou par les fabricants afin de déterminer, en phase pré-process, une géométrie ou des conditions de fabrication minimisant l'impact environnemental lors de la phase de fabrication. Pour présenter ce démonstrateur, nous nous appuierons sur une pièce exemple réalisée sur la machine de projection de poudres dont nous disposons au sein de l'Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes.

Dans une première section, nous présenterons les **possibilités du démonstrateur** développé ainsi que ses principales caractéristiques. Nous utiliserons le procédé de fabrication par projection de poudres afin de présenter cet outil.

Cet outil informatique utilise les modèles numériques que nous avons développé dans les chapitres précédents. Afin d'évaluer les écarts entre nos modèles et la réalité, il est nécessaire de procéder à une étape de validation de ces modèles. Pour cela, nous utiliserons dans une deuxième partie le démonstrateur pour **prédire l'impact environnemental d'une pièce** que nous fabriquerons par la suite. Lors de la fabrication, nous enregistrerons les données de consommation électrique permettant la comparaison entre le modèle développé et la réalité.

Pour finir, nous **synthétiserons** sur les apports d'un tel outil.

1 Présentation du démonstrateur développé

1.1 Présentation

Le démonstrateur que nous avons développé et qui est présenté dans ce chapitre a été créé en lien avec la méthodologie que nous avons présenté dans les chapitres précédents. Il permet, en outre, au concepteur de pouvoir prédire l'impact environnemental lié à la fabrication du produit qu'il conçoit. Ce démonstrateur a été développé sous le logiciel de calcul numérique Matlab® (2011b, The MathWorks, Rennes, France).

Ce démonstrateur informatique est décomposé en trois étapes (ou trois modules).

Le premier module de ce démonstrateur, de lecture et d'extraction des paramètres de fabrication, permet d'extraire du fichier contenant l'ensemble des commandes numériques, les informations nécessaires à l'évaluation.

À partir de ces informations, le deuxième module, de calcul numérique de l'impact environnemental, permet d'évaluer l'ensemble des consommations du couple pièce-procédé.

Enfin, le dernier module de cet outil, d'affichage des résultats, propose à l'utilisateur une image de l'impact environnemental de son produit associé à la phase de fabrication.

1.2 Étape 1 : lecture et extraction des données

Dans le chapitre 3, nous avons précisé que la génération du modèle numérique et la génération du programme à commande numérique pouvaient être faites automatiquement. De ce fait, l'outil informatique présenté se place en aval de ces deux premiers points et utilise le fichier de commande numérique comme point d'entrée.

Dans une première étape, l'utilisateur va alors définir les conditions de fabrication. Cette première étape est illustrée par la figure 5.1. On peut remarquer sur cette figure que l'interface est décomposée en trois parties.

i. Choix de la machine de fabrication. La première partie permet de sélectionner la machine (et donc le type de procédé) pour lequel l'étude est souhaitée. Il est possible dans cette partie de sélectionner soit la machine CLAD, qui a été étudié plus précisément dans le chapitre 4, soit un centre d'usinage ou des machines d'impression 3D par dépôt de fil.

ii. Conditions de fabrication. À partir de la machine de fabrication sélectionnée, la deuxième partie permet de renseigner les paramètres additionnels liés à ce procédé. Dans le cas de l'utilisation de la machine CLAD, il est alors possible de renseigner le type de tête de projection utilisée ainsi que le nombre de modules d'électronique de puissance nécessaires au fonctionnement du laser. Ces renseignements sont essentiellement destinés à un utilisateur expert en fabrication. Pour un concepteur, cette partie doit être transparente.

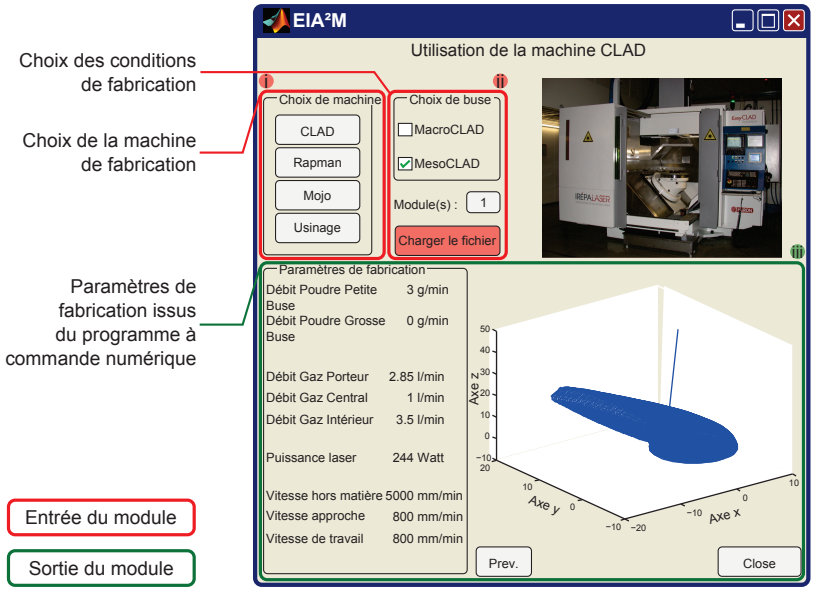


Figure 5.1 – Interface utilisateur du démonstrateur informatique, lecture et extraction des données

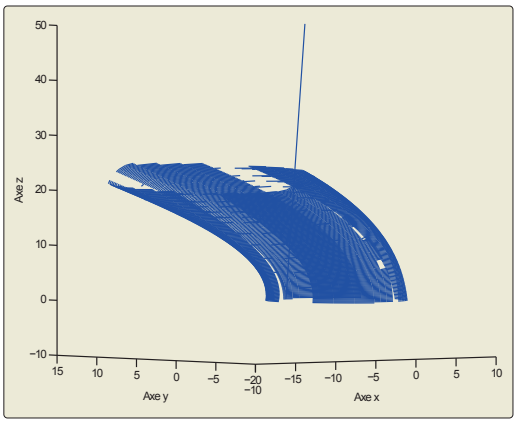


Figure 5.2 – Zoom sur la pièce

Une fois ces informations renseignées par l'utilisateur, ce dernier peut alors charger le fichier de commande numérique qui est associé à la pièce à fabriquer. Ce fichier contient toutes les informations nécessaires à la suite de l'étude.

À ce stade, il important de rappeler que la méthodologie que nous avons développée vise à évaluer l'impact environnemental, lié à la fabrication, du couple pièce-procédé. Le deux points cités ci-dessus (i et ii) mettent en avant cet aspect. En effet, du point de vue de l'utilisateur, ce dernier renseigne la partie **pièce** via le programme à commande numérique (ou la CAO de la pièce) et la partie **procédé** via la choix de la machine.

iii. Paramètres de fabrication. Toutes les informations (vitesses de déplacement des axes, trajectoires, puissance laser, débit de poudre et de gaz) contenues dans le fichier de pilotage sont alors extraites et présentées à l'utilisateur. On retrouve à la fois les données pilotant le procédé mais également une représentation des trajectoires de la pièce à fabriquer. La figure 5.2 est extraite de l'interface précédente.

Afin de respecter notre méthodologie et d'évaluer l'impact environnemental de la pièce selon les différentes sources d'impact que nous avons précisé dans les chapitres précédents, il est important que toutes les données liant les sources d'impact environnemental aux paramètres de fabrication soient extraites. Dans le cas de la projection de poudres, ces données concernent la consommation de gaz, de matières et d'énergie électrique. Pour d'autres procédés de fabrication tel que l'usinage, ces données concernent la consommation de matière brute, il est donc nécessaire de définir le volume de ce brut initial, la consommation de lubrifiant de coupe et d'énergie électrique.

1.3 Étape 2 : Calcul de l'impact environnemental

Dans un second temps, après avoir extrait toutes les données nécessaires du programme à commande numérique, l'outil informatique va permettre d'évaluer l'impact environnemental du couple pièce-procédé. Pour cela on va calculer, en utilisant les équations que nous avons développées précédemment (Chapitre 4), l'ensemble des consommations dues au procédé de fabrication.

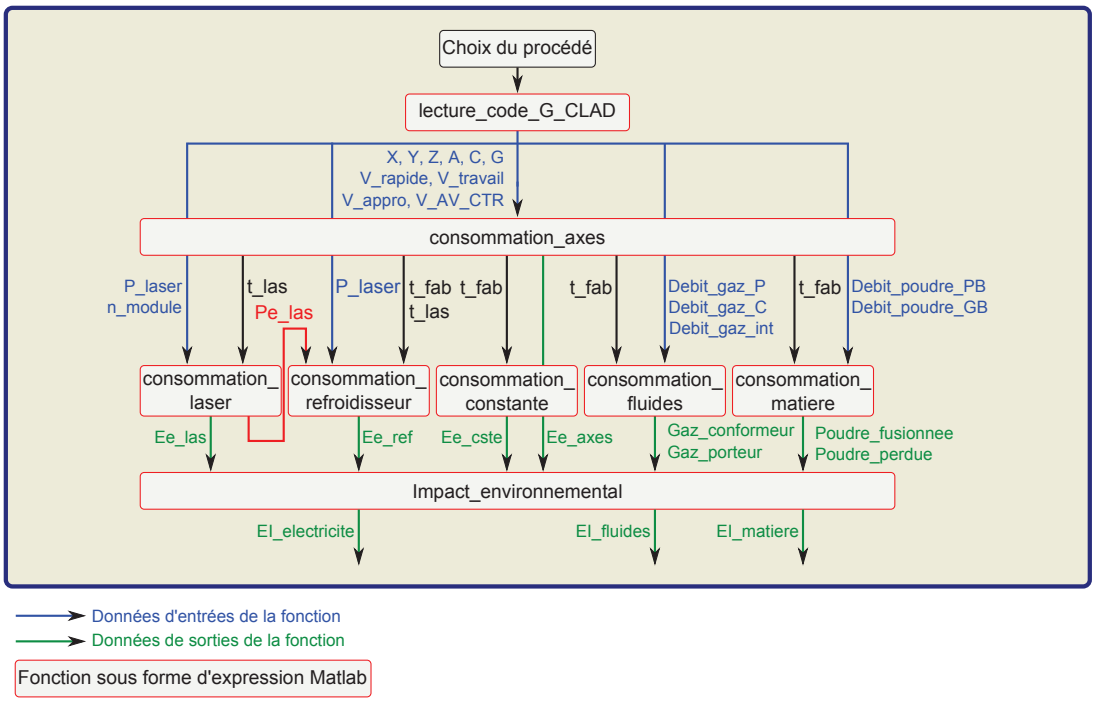


Figure 5.3 – Organisation du programme informatique

La figure 5.3 représente la structure générale du programme informatique utilisé pour l'évaluation de l'impact environnemental. Pour chaque source d'impact environnemental, nous avons associé une fonction (Figure 5.4) qui fera le lien entre les paramètres pilotant cette entité en entrée et la consommation de cette dernière en sortie. Nous définissons ainsi une fonction pour la consommation de fluide, une fonction pour la consommation de matière ainsi qu'une fonction pour chacune des entités de la machine consommant de l'énergie électrique.

```
function [Poudre_fusionnee, Poudre_perdue] = consommation_matieres(Debit_poudre_GB,Debit_poudre_PB,t_fab)
function [Gaz_conformeur, Gaz_porteur] = consommation_fluides(Debit_gaz_P, Debit_gaz_C, Debit_gaz_int, t_fab)
...
```

Figure 5.4 – Exemple de fonctions définissant la consommation de chaque source d'impact

Par exemple, pour déterminer les consommations de matières et de fluides, on utilise à la fois la valeur des paramètres de débit (de poudres et de gaz) contenus dans le fichier de commande numérique que nous avons analysé précédemment ainsi que la durée de fabrication.

On peut remarquer sur la figure 5.3, qu'il est nécessaire dans un premier temps d'évaluer la consommation électrique des axes. En effet, la connaissance du comportement des axes de la machine est indispensable pour pouvoir évaluer le reste des sources d'impacts. La fonction qui est associée à la consommation des axes permet de connaître le temps de fabrication et l'état de la machine à tout instant.

1.3.1 Fonction définissant la consommation des axes

Cette fonction permet de connaître à partir du déplacement souhaité, de la vitesse commandée ainsi que des paramètres d'accélération maximum et de jerk commandé la réponse de l'axe.

Une des hypothèses importantes faites dans le modèle proposé est que nous considérons que chaque point de passage désiré est atteint. Pour cela, nous n'acceptons pas d'erreur de corde comme cela peut être le cas pour d'autres procédés tel que l'usinage.

La figure 5.5 illustre ces propos. Sur cette figure, la trajectoire en rouge représente la trajectoire qui est utilisée dans notre modèle. La trajectoire en pointillée représente la trajectoire couramment utilisée en usinage. Pour cette dernière, on définit alors une erreur de corde admissible (ou tolérance), représentée par une zone (grisée sur notre figure) dans laquelle on accepte que notre outil se déplace. Pour ce type de trajectoire, il est difficile de connaître précisément la vitesse de l'outil à tout instant. De ce fait nous avons choisi d'utiliser la trajectoire, plus précise, n'acceptant pas d'erreur de corde et passant par l'ensemble des points de passage.

Néanmoins, l'inconvénient de ce type de trajectoire est que pour atteindre chaque point, l'axe de la machine commence à vitesse nulle et une fois le point atteint la vitesse est de nouveau nulle. Dans le cas de trajectoires complexes continues ou en ligne droite avec plusieurs points

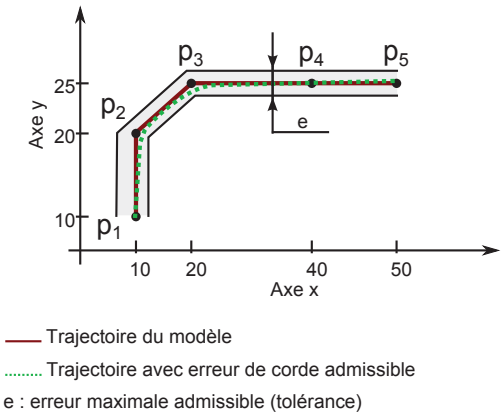
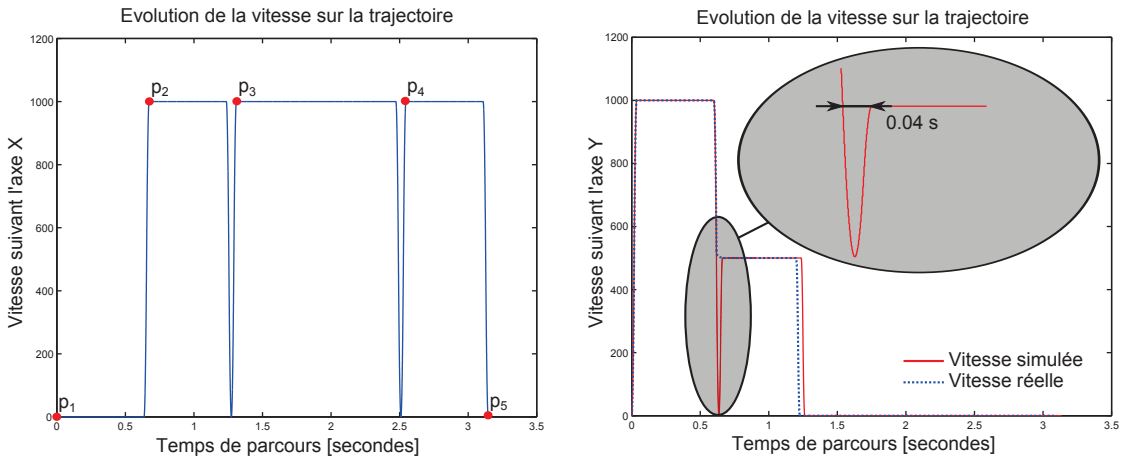


Figure 5.5 – Trajectoire modélisée

de passage, la vitesse étant nulle à chaque point de passage, on peut alors cumuler une erreur sur la durée de fabrication. La figure 5.6 illustre ce phénomène. Cette figure illustre la variation de vitesse des axes X et Y pour la trajectoire présentée sur la figure 5.5. Pour cette trajectoire, la durée de parcours simulée est de 3.15 secondes.

Sur la figure 5.6b on peut observer que pour se déplacer du point p_1 au point p_2 puis au point p_3, la vitesse simulée suivant l'axe Y (en rouge) passe de la vitesse maximale à la vitesse nulle puis à la vitesse de 500 $mm.min^{-1}$. En pratique, la vitesse réelle suivant l'axe Y (en bleue) ne passe pas par une vitesse nulle mais passe continument de la vitesse maximale à la vitesse de 500 $mm.min^{-1}$. On observe alors un décalage temporel de 0.04 seconde. C'est cette erreur que nous devons minimiser afin d'éviter l'accumulation d'erreur sur la trajectoire complète.



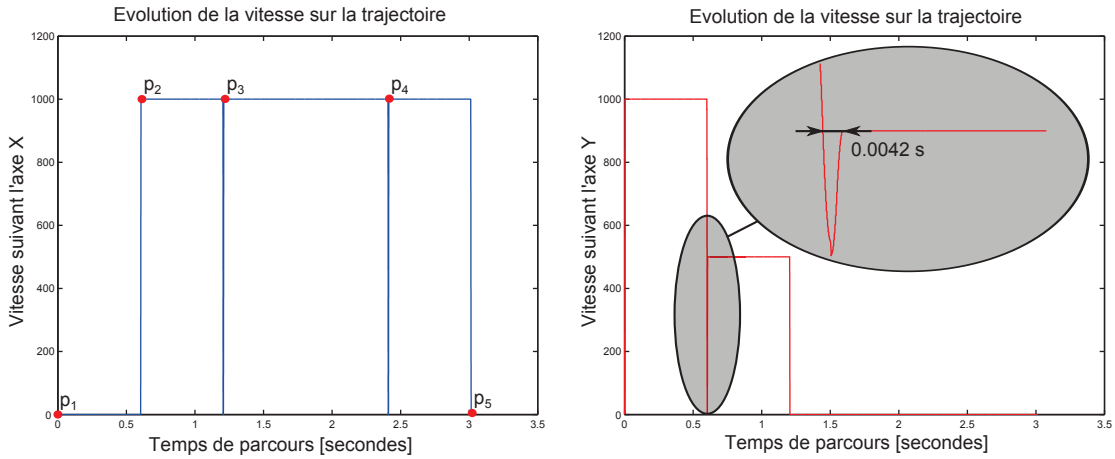
(a) Variation de la vitesse suivant X

(b) Variation de la vitesse suivant Y

Figure 5.6 – Variation de la vitesse pour la trajectoire proposée

Dans le cas de trajectoires simples de type balayage zigzig ou zigzag, cette modélisation n'engendrera pas d'erreur importante. Néanmoins, pour des trajectoires plus complexes nécessitant que les axes soient pilotés en continu sans interruption, c'est le cas, par exemple, pour les trajectoires définies en B-Spline pour lesquelles on précise des points de contrôles, l'erreur peut être importante si l'on s'arrête à chaque point de contrôle.

Il est important de noter que l'équipe MO2P dans laquelle ces travaux de thèse ont été développés travaille en parallèle et depuis plusieurs années sur le développement de simulateur de trajectoires d'outils en phase de fabrication [Dugas2002, Dugas2003]. La connaissance exacte des positions et des vitesses de fabrication pourraient être connues grâce à ce simulateur qui a été développé dans de précédents travaux. Néanmoins, pour ne pas alourdir le temps de calcul, nous avons, dans le cadre de cette thèse, décidé de ne pas intégrer ces résultats.



(a) Variation de la vitesse suivant X

(b) Variation de la vitesse suivant Y

Figure 5.7 – Variations de la vitesse avec les valeurs de jerk et d'accélération maximale quasi-infinies pour la trajectoire proposée

Pour résoudre ce problème d'un point de vue calcul numérique, il suffit alors dans la commande des axes, de simuler une accélération quasi-infinie afin que l'état transitoire nécessaire pour que l'axe se mette en mouvement soit quasi nul. Dans ce cas, la vitesse sera constante tout au long de la trajectoire. Cette solution est présentée sur la figure 5.7. Pour cette simulation, la durée de fabrication simulée est de 3.01 secondes et la durée d'accélération de l'axe est très faible, 0.004 seconde soit 10 fois plus rapide que la solution précédente.

Lorsque l'utilisateur indiquera que la fabrication de la pièce s'effectue en cinq axes continus, d'un point de vue informatique la valeur de consigne du jerk sera quasi infinie (5000 $m.s^{-3}$) et la valeur d'accélération maximum sera quasi infinie (1000 $m.s^{-2}$). Ces valeurs ne sont pas représentatives des valeurs réelles utilisées dans la machine mais elles permettent, **d'un point**

de vue informatique, de contourner le problème. En réalité, le jerk peut atteindre 50 $m.s^{-3}$ et l'accélération maximale 1 $m.s^{-2}$.

1.3.2 Fonction définissant les autres consommations

Comme nous l'avons précisé dans la section 1.3, les fonctions permettant d'évaluer la consommation énergétique, la consommation de matière et la consommation de fluides sont dépendantes à la fois des paramètres issus du programme à commande numérique et des sorties de la fonction permettant de calculer la consommation d'énergie électrique des axes.

Une fois les paramètres d'entrées connus, le lien entre ces paramètres et la sortie de la fonction qui peut être la consommation énergétique du laser ou la consommation de gaz se fait au moyen d'une courbe de réponse issue des données du procédé. Ces données sont récoltées à partir du protocole de caractérisation que nous avons présenté dans le chapitre 3.

Pour la fonction permettant de calculer la consommation énergétique du refroidisseur, on utilise à la fois la sortie de la fonction permettant de définir la consommation énergétique des axes mais aussi la sortie de la fonction permettant de calculer la consommation énergétique du laser. En effet, comme nous l'avons précisé dans le chapitre 4, le déclenchement de l'unité de régulation du laser dépend de l'échauffement dû à la perte, sous forme de chaleur, de l'unité laser.

1.3.3 Fonction traduisant les consommations en impact environnemental

Une fois l'ensemble des consommations estimées par l'outil informatique, une dernière fonction permet de traduire ces consommations en impact environnemental. L'utilisateur peut alors visualiser l'impact environnemental global de la pièce dû aux différentes sources d'impact mais aussi l'impact environnemental, dit local, associé à chacune des sources d'impact. Pour cela, on utilise alors les facteurs de caractérisation issus de la base de données EcoInvent qui permettent de traduire l'ensemble de ces consommations en une même unité exprimée en millipoints.

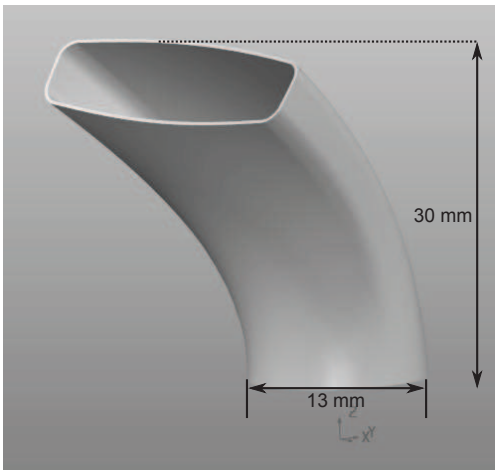
1.4 Étape 3 : Affichage de l'impact environnemental associé à la pièce produite

Le dernier module de notre outil informatique permet de rendre compte à l'utilisateur de l'ensemble des consommations estimées, ainsi que les impacts environnementaux associés, générés lors de la fabrication de la pièce. L'utilisateur est en mesure d'analyser les sources de consommations prédominantes.

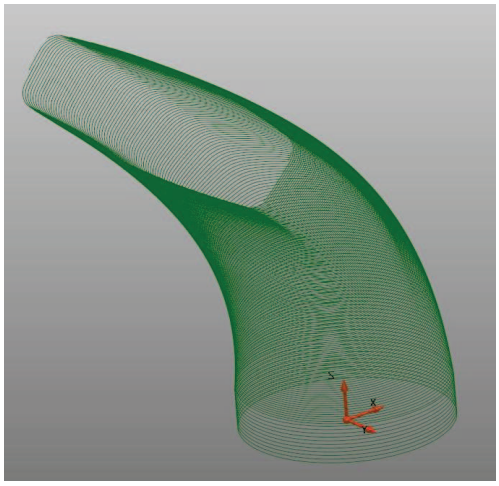
2 Validation du modèle par rapport à la fabrication d'une pièce réelle

2.1 Présentation de la pièce d'étude

La pièce que nous allons étudier est une pièce aéronautique, appelée Airduck. Cette pièce dont la forme ressemble à une tuyère permet l'échange d'air chaud. Actuellement, cette pièce est réalisée en partie en chaudronnerie et nécessite un certain nombre d'étapes de fabrication (et de ce fait une durée de fabrication non négligeable). L'utilisation de la fabrication par projection de poudres pour cette géométrie aux parois minces s'avère particulièrement intéressante. La figure 5.8a représente le modèle numérique de cette pièce. La figure 5.8b représente les trajectoires, issues du programme de génération de trajectoires, qui seront utilisées lors de la phase de fabrication.



(a) Modèle numérique de la pièce d'étude



(b) Trajectoires de fabrication de la pièce étudiée

Figure 5.8 – Présentation de la pièce d'étude

À partir du programme à commande numérique issu du logiciel de fabrication assistée par ordinateur, on est en mesure d'extraire toutes les données nécessaires à la fabrication de la pièce. Ces données sont illustrées sur la figure 5.1.

On y retrouve à la fois les données liées à la consommation de matière (débit de poudres de 3 g/min), les données liées à la consommation de fluides (débit de gaz porteur de 2.85 l/min, débit de gaz conformeur intérieur de 3.5 l/min et débit de gaz conformeur central de 1 l/min), les données liées à la consommation de l'unité laser (puissance laser commandée de 213 Watts). Enfin, le programme a pu extraire les données liées à la vitesse maximale de déplacement des axes à la fois en phase de travail (V = 800 mm/min), en phase d'approche (V = 800 mm/min) et en phase hors matière ou phase de non lasage (V = 5000 mm/min) ainsi que les positions des points de passages illustrés par la figure 5.2. On parle ici de vitesse maximale car la vitesse des

axes peut varier sur la trajectoire considérée. Dans ce cas, le programme informatique détermine la vitesse de l'axe, ou des axes si plusieurs axes sont sollicités en même temps, en fonction du déplacement à effectuer.

2.2 Résultats de consommations issus du modèle numérique

Une fois tous ces paramètres de fabrication connus, il est possible de lancer le calcul numérique de l'ensemble des consommations. Une fois le calcul effectué, le démonstrateur affiche les résultats attendus sous la forme qui est illustrée par la figure 5.9. Sur cette figure on retrouve alors l'ensemble des consommations estimées ainsi que la traduction en impact environnemental exprimé en millipoints.

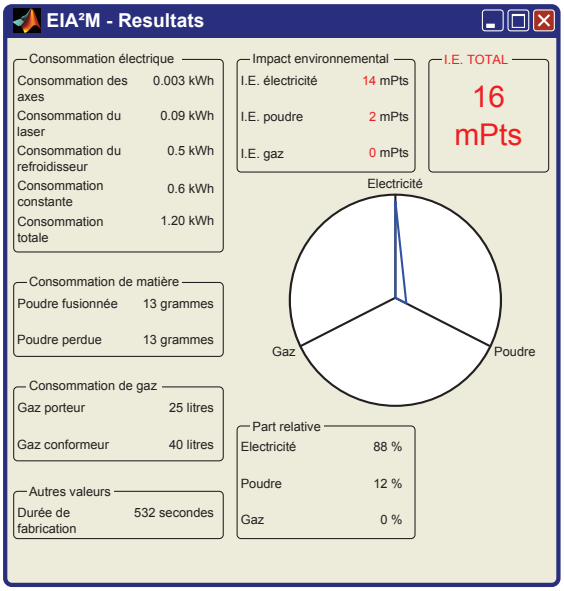


Figure 5.9 – Résultat de l'évaluation de la consommation en phase de fabrication de la pièce étudiée

L'affichage utilisé permet de rendre compte de l'importance relative des sources de consommation sur l'impact environnemental global. Les résultats donnés par l'outil informatique sont ensuite stockés dans une base de données dans le but de comparer les procédés entre eux. En effet, comme on peut le voir sur la figure 5.1, il est possible de sélectionner dans l'interface utilisateur soit le procédé de fabrication par ajout de matière soit le procédé par enlèvement de matière afin d'en évaluer la performance environnementale. Une fois le calcul effectué il est donc possible de comparer pour ces deux procédés de fabrication leurs impacts environnementaux générés lors de la fabrication.

2.3 Résultats des consommations dues à la pièce fabriquée

Avant d'analyser la consommations des différentes sources d'impacts environnementaux, on peut remarquer que la durée de fabrication, où le laser est en fonctionnement, estimée (532 secondes) est proche de la durée de fabrication réelle, où le laser est aussi en fonctionnement, qui est de 570 secondes. L'erreur estimée est de l'ordre de 6 % dans ce cas. Il faut noter que la durée estimée par le l'outil informatique ne prend pas en compte les phases de préparation de la machine.

2.3.1 Consommation d'énergie électrique

Pour pouvoir comparer la consommation d'énergie électrique due à la fabrication de notre pièce, nous avons réalisé un enregistrement de la puissance absorbée par l'ensemble des entités sur le réseau électrique. Nous avons distingué trois entités qui sont l'unité laser, l'unité de régulation de la température et la machine comportant l'ensemble variateur, moteurs, armoire, extracteur de gaz, etc. Nous avons ensuite enregistré, avec un pas de temps d'acquisition de 0,2 ms, le courant absorbé par chacune des phases des entités de notre machine. À partir de cette valeur instantanée, on peut déterminer le courant moyen absorbé par chacune des phases en calculant la moyenne sur cent points. Une telle moyenne permet d'obtenir la variation de courant efficace par phase sur une période de temps équivalente à celle du réseau électrique (20 ms ou 50 Hz). La valeur de la tension étant quasi-constante (230 Volts entre une phase et le neutre), on peut ainsi déterminer la puissance absorbée, puis l'énergie consommée par intégration, de chaque entité de la machine. Les résultats enregistrés sont donnés sur la figure 5.10.

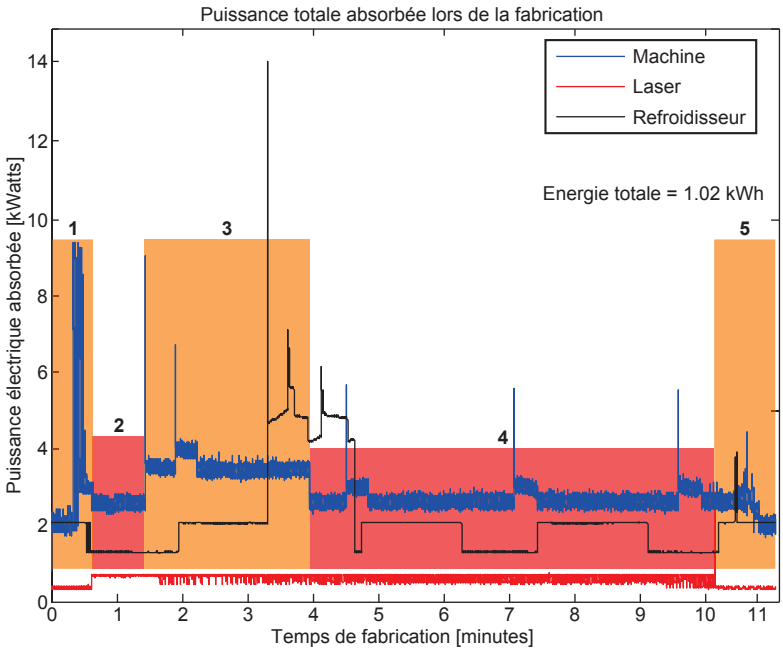


Figure 5.10 – Consommation d'énergie électrique de la fabrication de l'Airduck

Sur cette figure on représente la puissance absorbée par nos trois entités (la machine en bleue, le laser en rouge et le refroidisseur en noir). La courbe en bleue permet de distinguer les différents états de la machine, dans notre cas, on peut distinguer cinq états. Le premier (État 1) représente la mise en route de la machine, cette étape correspond à la mise en position des axes de la machine, la mise en route du distributeur de poudre et de l'extracteur de particules. À cet instant, le laser n'est donc pas en fonctionnement.

La seconde partie (État 2) représente le début de la fabrication de pièce où seul les axes X, Y et Z sont mis en mouvements. Le laser quant à lui se met en fonctionnement et transmet une puissance laser quasi constante.

Dans la troisième partie (État 3), la machine continue la fabrication de la pièce mais contrairement à l'état précédent, les axes A et C sont mis en mouvements. Cela se répercute d'une part, par une consommation électrique de la machine plus importante d'autre part, par une discontinuité de la puissance laser. On peut s'apercevoir dans cette partie que la puissance laser varie entre la puissance commandée et un seuil bas. Ceci s'explique par le fait que l'on atteint des points singuliers lors du déplacement des axes A et C. De ce fait, l'amplitude des déplacements des axes est important (quasiment 180°). La puissance laser étant asservie sur la vitesse des axes, à ces points de discontinuités la vitesse devient nulle ou quasi-nulle et le laser sature à un seuil bas.

Dans la quatrième partie (État 4), les axes A et C ne sont plus soumis à de fortes variations de leurs amplitude de commande dues aux points singuliers. On pourrait caractériser cet état de "stationnaire". On observe encore des variations de puissance laser correspondants aux discontinuités évoquées précédemment. À la fin de cette partie, on remarque que laser s'arrête régulièrement. Ceci correspond aux trajectoires de fabrication définies par des B-Spline discontinues. Dans ce cas, pour passer d'une B-Spline à une autre, le laser se coupe le temps du déplacement rapide.

La cinquième et dernière partie (État 5) correspond à l'arrêt du laser et à la fin de la fabrication de la pièce.

Tout au long de la fabrication, on remarque que le refroidisseur s'allume puis s'éteint à intervalle de temps régulier (allumage toutes les minutes pendant 90 secondes). Un point que nous n'avions pas remarqué précédemment, c'est le troisième état du refroidisseur où la puissance absorbée est proche de 5 kW. Cet état correspond à l'allumage du ventilateur pour accélérer le refroidissement.

La consommation d'énergie électrique totale est de 1.02 kWh pour la fabrication de l'Airduck. Le tableau 5.1 résume la consommation de chacune des entités enregistrées. La consommation d'énergie électrique estimée par notre modèle est de 1.20 kWh soit une erreur de 15% par rapport à la consommation réelle.

	Mesurée	Estimée
Laser	0.11 kWh	0.09 kWh
Refroidisseur	0.39 kWh	0.5 kWh
Machine	0.52 kWh	0.6 kWh

Tableau 5.1 – Consommation d'énergie électrique par entité

Cet enregistrement nous permet de constater qu'il est assez difficile de prédire le comportement de l'ensemble du procédé. En effet, les problèmes liés, par exemple, à la saturation basse du laser ne peuvent être prédits.

2.3.2 Consommation de matière

Afin de déterminer la consommation de poudres métalliques lors de la fabrication de la pièce, il suffit de peser la pièce finale afin de déterminer la masse de poudres fusionnées. La masse de la pièce finale est de 12 grammes. L'écart avec la valeur de la masse de poudres fusionnées estimée est de 8%. Le rendement de la buse utilisée (MesoCLAD) étant de 50%, la masse de poudre finale perdue estimée est également de 12 grammes.

La figure 5.11 représente la pièce finale fabriquée lors de ces essais. L'état de surface étant lié aux cordons de matière déposés, il pourrait être nécessaire de réaliser une étape de finition par polissage laser afin d'améliorer son état de surface finale. Dans ce cas l'outil informatique peut être utilisé pour prédire la consommation d'énergie électrique lors de cette opération.

Figure 5.11 – Pièce finale réalisée en fabrication additive par projection de poudres métallique

3 Synthèse

Le démonstrateur informatique que nous avons développé en accord avec la méthodologie présentée dans les chapitres précédents permet de prédire la consommation d'électricité, de ma-

tière et de fluide lors de la phase de fabrication. Cet outil informatique s'appuie sur le fichier à commande numérique afin de prédire l'ensemble de ces consommations.

L'exemple que nous avons traité afin d'évaluer la justesse de nos modèles nous a permis de mettre en avant plusieurs points importants. Dans un premier temps, on peut remarquer que l'estimation de la durée de fabrication est très proche de la réalité avec une erreur de moins de 6%. Cette précision est due à la méthode employée pour la modélisation du comportement des axes. En effet, dans cette modélisation, nous n'utilisons pas uniquement une valeur moyenne de la vitesse pour déterminer le comportement de chaque axe mais nous prenons en compte l'ensemble des phases d'accélération et de décélération. Comme nous l'avons précisé dans le chapitre 3, la connaissance de la durée de fabrication est une donnée essentielle afin d'évaluer la consommation d'énergie d'un procédé de fabrication. Dans un second temps, on peut remarquer que l'évaluation de la consommation de poudre métallique est tout aussi précise.

Néanmoins, une donnée reste à affiner. En effet, on peut remarquer que l'écart entre l'estimation de la consommation d'énergie électrique et la consommation réelle d'énergie est proche de 15%. Cet écart, peut être expliqué, à la fois, par un certain manque d'informations quant à l'état de la machine. En effet, sur la figure 5.10, on peut remarquer lors du démarrage de la fabrication, cinq pics de puissance électrique importants. Or ces derniers représentent une consommation d'énergie électrique de 0.03 kWh soit près de 6% de la consommation de la machine. Certains d'entre eux, pris en compte dans le modèle numérique, sont dus à la mise en position, à vitesse rapide, des axes de la machine. Les autres pics, sont dus à la mise en route de certains éléments de la machine tel que l'extracteur de gaz. Les pics de puissances associés à ces éléments ne sont pas pris en compte dans le modèle numérique. Néanmoins, lors de la fabrication d'une pièce, on observera toujours ces pics de consommation. On peut alors associer une consommation d'énergie électrique constante dite "de démarrage", correspondant à la mise en route de la fabrication. De plus, si l'on utilise cet outil informatique dans le but de réaliser une étude comparative (quantitative ou qualitative) de différentes stratégies de fabrication par ajout de matière, cet écart sera reporté dans les deux estimations de consommation mais l'étude comparative sera toujours valable. Cet écart s'explique aussi par une erreur dans de la modélisation du refroidisseur. En effet, nous n'avons pas pris en compte l'état où les ventilateurs se mettent en route et pour lequel la puissance électrique absorbée atteint près de 5 kW ce qui n'est pas négligeable vis à vis des puissances électriques mis en jeu.

L'outil informatique développé peut être utilisé dans le but de pouvoir comparer les procédés de fabrication par ajout de matière et de fabrication par usinage. Pour la fabrication d'une pièce aux fonctions techniques identiques et à partir des fichiers de commande des deux procédés, on peut réaliser une analyse des impacts environnementaux générés en phase de fabrication pour ces deux procédés afin de les comparer. L'utilisateur peut alors faire une choix soit de procédé en comparant les impacts environnementaux générés par chacun, soit un choix de conditions de fabrication en analysant l'influence des paramètres de fabrication (choix de buse par exemple) sur les impacts environnementaux générés. De plus, l'interface de retour mis en place permet à l'utilisateur d'avoir une image claire des impacts environnementaux exprimés en mPts et représentés

sur le diagramme radar qui permet de voir rapidement sur quels points de la consommation il est possible de jouer pour minimiser ces impacts.

6 Conclusion et perspectives

Sommaire

1 **Synthèse sur les travaux menés** **140**
2 **Apports des travaux menés** **142**
3 **Perspectives et voies de recherches** **143**

Dans ce dernier chapitre, nous allons synthétiser l'ensemble des études que nous avons pu mener au cours de ces travaux de thèse. En effet, après avoir recontextualisé nos travaux dans un cadre général et dégagé à partir de l'état de l'art des problématiques scientifiques, nous avions pour objectif de développer une méthodologie permettant d'évaluer la performance environnementale des procédés de fabrication. Nous verrons dans quelle mesure nous avons pu répondre aux problématiques évoquées.

Pour cela, dans une première partie, nous **synthétiserons les travaux** que nous avons présentés tout au long de ce manuscrit.

Dans une deuxième partie, nous exposerons les **apports** des travaux que nous avons menés.

Enfin, dans la troisième et dernière partie de ce chapitre, nous proposerons des **perspectives d'études** et des **voies de recherches** découlant des travaux que nous avons menés.

1 Synthèse sur les travaux menés

Comme nous avons pu le voir dans le premier chapitre s'intéressant au contexte général de l'étude, la maturité technique et technologique des procédés de fabrication par ajout de matière n'est plus à démontrer. Certes, certaines technologies telles que l'impression 3D et la fusion sélective laser semblent plus avancées que d'autres d'un point de vue technologique mais toutes permettent aujourd'hui de produire des pièces fonctionnelles. Dans le rapport annuel de Terry Wohlers on peut s'apercevoir que le nombre de ventes de machines de fabrication additive évolue exponentiellement. Ceci est sans doute dû au fait que ce procédé de fabrication permet la fabrication de pièces dont les formes géométriques étaient difficilement envisageable auparavant.

Les évolutions techniques sont nécessaires au développement d'une technologie de fabrication mais son acceptation sera encore meilleure si cette technologie a un moindre impact sur l'environnement. La fabrication additive doit alors répondre à deux points essentiels qui sont les suivants :

- La production de pièces par ces nouvelles technologies de fabrication et l'explosion récente des ventes d'imprimantes 3D ne vont-elles pas contribuer à l'augmentation de notre empreinte sur l'environnement ?
- Dans quelles mesures les procédés additifs, par les possibilités de liberté de conception qu'ils offrent, peuvent-ils aider à diminuer l'impact environnemental d'un produit sur l'ensemble de son cycle de vie ?

De ce fait, dans le chapitre 2, nous nous sommes intéressés aux moyens et méthodes disponibles actuellement afin d'évaluer l'impact environnemental des procédés de fabrication et plus précisément aux procédés par enlèvement de matière. En effet, le recul scientifique sur ces procédés de fabrication est important et ils ont fait l'objet d'un grand nombre d'études. À partir de ces études, il est possible d'examiner les méthodes mise en place pour évaluer et diminuer l'impact environnemental de ces procédés. Par la suite les recherches bibliographiques se sont élargies aux méthodes permettant d'évaluer l'impact environnemental des procédés de fabrication par ajout de matière.

On peut constater que les méthodes et outils disponibles permettant d'évaluer l'impact environnemental, en phase de fabrication, ne s'intéressent généralement qu'à la consommation d'énergie électrique. De plus, ces méthodes lient rarement la pièce a réaliser avec le moyen de production. Or, il est important de voir que les conditions de fabrications, associées au moyen de production, ainsi que la géométrie de la pièce à fabriquer jouent des rôles couplés dans l'impact environnemental que génèrera la phase de fabrication.

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 aborde le problème de l'évaluation environnementale à la fois d'un point de vue global mais aussi d'un point de vue local, centré sur le process. La méthodologie développée s'appuie sur le

fichier à commande numérique lié à la pièce à fabriquer afin d'évaluer l'impact environnemental qui est lié au couple pièce-procédé.

Dans un premier temps, nous nous sommes attachés à garder une vision globale sur la phase de fabrication d'un produit. Pour cela, la méthodologie développée considère l'ensemble des étapes nécessaires à la fabrication d'un produit (de la fabrication de la matière brute à la finition de la pièce). Cette vision globale est issue du concept d'analyse de cycle de vie où il est important de conserver ce point de vue pour éviter tout transfert d'impact environnemental d'une phase de vie à une autre. Dans le cas de la fabrication de produit, cette vision permet d'éviter tout transfert d'impact d'une phase de production de la pièce à une autre.

Une seconde partie de la méthodologie s'appuie sur l'expertise acquise sur les procédés de fabrication. Cette expertise permet, à partir de la connaissance du fichier de commande numérique, d'estimer la consommation de chacune des entités composants la machine. La connaissance fine du comportement des procédés de fabrication est nécessaire afin d'appréhender les consignes ou commandes qui auront un impact sur la consommation globale du process. Cette connaissance permet ainsi de définir soit des stratégies soit des géométries qui auront un moindre impact sur l'environnement.

La méthodologie développée a été appliquée sur le procédé de fabrication par projection de poudres. Cette application est présentée dans le chapitre 4. Pour respecter cette méthodologie, des expérimentations ont été réalisées afin de caractériser chaque étape de fabrication d'une pièce par projection de poudres.

Pour cela, dans un premier temps, les consommations de gaz, d'eau et d'électricité ont été analysées et permettent de définir un rendement du procédé de fabrication de poudres métalliques par atomisation. L'ensemble de ces expérimentations alimentent les modèles mathématiques de prédictions de consommation.

Dans un second temps, un ensemble d'expérimentations (dont le protocole est développé dans ce même chapitre) ont été réalisées afin de caractériser le comportement du procédé de fabrication par projection de poudres disponible au sein de l'Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes. Des modèles décrivant les comportements électriques des axes machines, du laser, du refroidisseur et de l'ensemble des autres entités de la machine ont été développés. De plus, des modèles permettant d'estimer la consommation de gaz et de poudres en fonction des paramètres de fabrication ont été définis. Les expérimentations menées permettent alors d'alimenter les modèles construits autour de la machine.

Au vu du rendement des têtes de projection de poudres, il a été nécessaire de définir un protocole permettant de recycler la poudre projetée mais qui n'est pas fusionnée par le laser. Ce protocole est développé dans la dernière partie de ce chapitre et des essais de résistance mécanique ont été menés afin de rendre compte d'une dégradation de ces caractéristiques en fonction du taux de la quantité de poudres recyclées réintroduites dans le système.

Lors de cette application, nous avons donc développé des modèles d'évaluations fins de l'ensemble des étapes de fabrication. En s'intéressant à l'ensemble de ces étapes, cela nous permet de garder une vision globale sur la fabrication de la pièce.

Pour finir, le chapitre 5 présente l'outil informatique développé durant ces travaux de thèse. Ce démonstrateur reprend l'ensemble des modèles développés dans les chapitres précédents afin de proposer à l'utilisateur un outil simple lui permettant d'évaluer à partir de la connaissance du procédé de fabrication utilisé et du fichier de commande numérique définissant la pièce à fabriquer l'impact environnemental en phase de fabrication de son produit.

2 Apports des travaux menés

L'ensemble des travaux menés dans les chapitres précédents permettent de montrer l'importance de proposer aux concepteurs de produits manufacturés des outils évaluant l'impact environnemental de leur produit en phase de conception. La synthèse présentée précédemment sur les travaux menés nous amène maintenant à analyser les apports de ces travaux.

- **Méthodologie d'évaluation du couple pièce-procédé**. Nous avons pu montrer à travers l'état de l'art et à travers les travaux menés que l'évaluation environnementale d'un procédé de fabrication ne peut se faire sans tenir compte de la pièce à produire. En effet, le pilotage du procédé pour produire la pièce et la géométrie même de la pièce à produire influent sur l'impact environnemental lié à la phase de fabrication. Pour une même géométrie de pièce mais avec des paramètres de fabrication différents les variations peuvent être significatives. C'est pour cela que la méthodologie développée est centrée sur ce couple pièce-procédé. La pièce étant définie par le fichier de commande numérique (ou le fichier CAO) et la machine par une base de données définissant son comportement.

- **Méthodologie d'évaluation pré-process**. Lors du développement de ces travaux, on a pu se rendre compte que les méthodes employées pour définir l'impact environnemental d'un procédé de fabrication se faisaient généralement post-fabrication. Or il est nécessaire afin de comparer différentes stratégies de fabrication ou différentes géométries de pièce, de disposer d'une méthode d'évaluation pré-process. On ne peut pas imaginer, d'un point de vue temps opératoire, réaliser de multiples essais afin de définir les meilleurs conditions de fabrication minimisant l'impact environnemental. Nous avons donc proposé une méthodologie d'évaluation quantitative pré-process basée sur une modélisation du comportement du procédé de fabrication.

- **Méthodologie d'évaluation environnementale multi-critères des procédés de fabrication par ajout de matière**. 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. Afin de comparer ces différentes consommations, la méthode Eco-Indicator 99 a été utilisée afin traduire ces consommations en impact environnemental. Dans la méthodologie développée appliquée à la fabrication additive, nous avons montré l'importance de prendre en compte l'ensemble de ces flux de matières et d'énergie. La méthodologie développée se veut générique et applicable à tous les procédés de fabrication et cette vision multi-critère doit être appliquée sur chaque procédé de fabrication.

- **Approche globale des étapes de fabrication d'un produit**. Les échanges menés avec différentes communautés scientifiques nous ont conduit à élargir la méthode d'évaluation d'un procédé de fabrication. En effet, il est indispensable de prendre en compte l'ensemble des étapes du cycle de vie d'un produit afin d'en déterminer son impact sur l'environnement et cela afin d'éviter tout transfert d'impact d'une phase de vie du produit à une autre. Il en est de même lorsque l'on s'intéresse à la phase de fabrication des produits. Il est important de considérer celle-ci comme un ensemble d'étapes permettant d'obtenir le produit final (extraction de la matière première, production des bruts de production, fabrication du ou des composant(s), assemblage des composants si besoin). La vision globale développée dans la méthodologie permet de prendre en compte ces aspects.

- **Caractérisation locale des étapes de fabrication**. Cette caractérisation, conduisant à une modélisation de l'ensemble des entités de chacune des étapes de fabrication, est importante afin de développer une vision fine des étapes de fabrication. Les modèles développés ont été de plus validés lors d'expérimentations.

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.

3 Perspectives et voies de recherches

L'un des premiers prolongement qu'il serait intéressant de développer est le concept de **DFSAM (Design For Sustainable Additive Manufacturing)**, que nous pourrions traduire par une conception durable pour la fabrication additive. En effet, il est nécessaire de profiter des opportunités offertes par ce procédé de fabrication. D'un point de vue cycle de vie, la possibilité de minimisation de masse, d'intégration de fonctions multiples dans une même pièce, permet de minimiser globalement les impacts environnementaux générés en phase d'utilisation. Les pièces réalisées en fabrication additive étant généralement embarquées dans des véhicules (avion par exemple), la minimisation de leur masse permet une diminution notable de leur consommation. Ces études pourraient être menées en lien avec les travaux sur la conception adaptée à la fabrication additive menés au sein de l'équipe MO2P par Rémi Ponche [Ponche2013].

La définition et l'intégration d'un **indice environnemental** dans la chaîne numérique complète du procédé de fabrication. Pour la fabrication additive, cet indice environnemental pourrait être créé en prenant en compte l'impact environnemental, généré à partir de l'ensemble des consommations d'énergie et de matière, par rapport à la quantité de matière déposée. Ce rapport ne pénaliserait pas les machines nécessitant de fortes puissances électriques pour produire des pièces. Il semble important de ramener l'impact environnemental à la quantité de matière déposée. Un tel indice permettrait la comparaison de procédés entre eux. Pour cela, l'utilisation de chaîne numérique bi-directionnelle tel que le modèle STEP-NC [Bonnard2010], permettrait de faire transférer des informations bas niveaux sur le comportement du procédé, d'un point de vue environnemental, vers la conception qui est d'un niveau plus haut.

On a pu remarquer que l'analyse des procédés de fabrication sur le plan de leur consommation énergétique se faisait de plus en plus régulièrement. Maintenant que nous avons des outils pour réaliser ces analyses, il est nécessaire de se demander que peut-on en faire ? Avec la connaissance acquise, il est sans doute envisageable de développer des machines hybrides permettant de coupler différents procédés de fabrication au sein de la même machine, pour pouvoir produire des pièces toujours plus complexes et dont l'impact environnemental serait globalement minimisé. On pourrait parler **d'hybridation de la fabrication**.

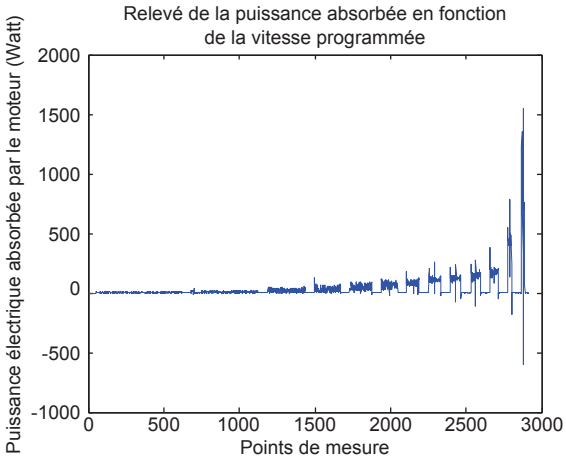
L'**outil informatique** que nous avons développé pourrait alors servir de support de simulation afin de trouver le bon compromis de procédés de fabrication minimisant l'impact environnemental de la pièce produite. Néanmoins, il serait alors nécessaire de continuer le développement de cet outil afin de pouvoir y intégrer un panel plus large de procédés de fabrication préalablement caractérisés. De plus, il serait judicieux d'y intégrer les travaux menés par l'équipe MO2P sur le simulateur de trajectoires. Ces travaux permettraient d'évaluer plus précisément les vitesses et la durée de fabrication. Cette dernière est, en effet, un paramètre important dans le calcul de l'énergie électrique consommée.

On a pu le remarquer lors de ces travaux de thèse, que ce soit pour les procédés d'usinage ou les procédés de fabrication par ajout de matière, une grande partie de l'énergie électrique consommée est due à l'état de veille de la machine. Cette consommation statique a augmenté considérablement ces dernières années, or cet état ne produit aucune pièce. Certes, il est nécessaire pour certains procédés de garder un état constant pour minimiser les fluctuations du fonctionnement du procédé lors de la fabrication (par exemple la température constante de la broche est nécessaire pour minimiser les écarts géométriques dus à la dilatation de la broche) mais certaines entités ne devraient pas (ou peu) consommer d'énergie. De plus, pour certaines technologies de fabrication additive, la machine étant développée sur la base de machines d'usinages, pour lesquels la structure rigide est liée à la dynamique de la machine, il est nécessaire de repenser **la configuration et la structure** de la machine.

Pour rebondir sur les travaux qui ont pu être menés au sein de l'équipe MO2P par Pierre Muller [Muller2013], il serait tout aussi intéressant d'analyser l'**impact environnemental de pièce multi-matériaux** produites par fabrication additive. Cette typologie de pièce apporte de réelles perspectives pour la fabrication additive, et permet une avancée majeure. Néanmoins, si ce concept venait à se développer d'un point de vue industriel il est nécessaire de penser à la fin de vie de ces produits. Plus généralement, il est nécessaire de mener des études sur la fin de vie et la tenue en fatigue des pièces produites par fabrication additive.

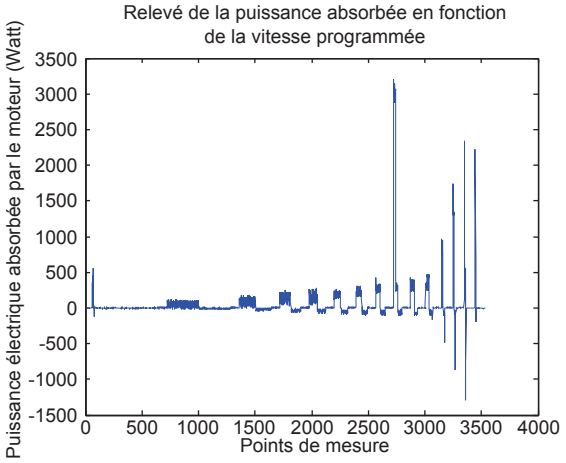
A

Mesure de la puissance électrique absorbée par les axes



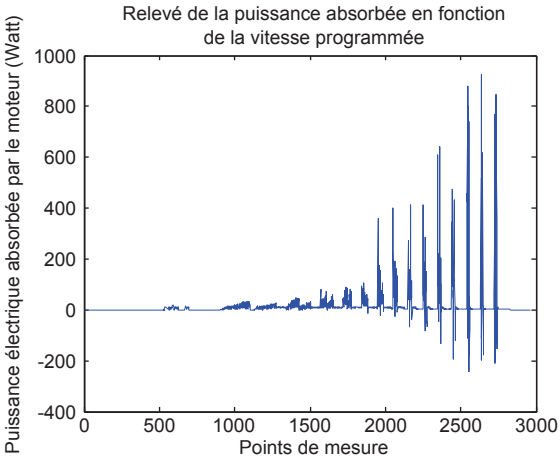
Vitesse programmée (mm/min)	Puissance absorbée (Watt)
500	4
1000	8
2000	21
3000	30
4000	50
5000	69
6000	83
7000	106
8000	125
9000	146
10000	175
20000	444
30000	746

Figure A.1 – Consommation électrique de l'axe y



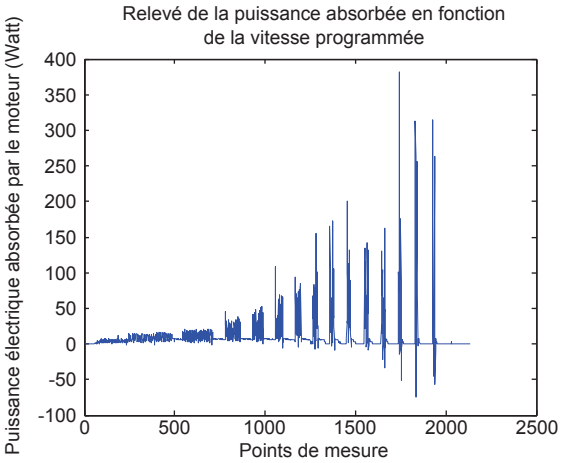
Vitesse programmée (mm/min)	Puissance absorbée (Watt)
500	64
1000	86
2000	141
3000	146
4000	178
5000	217
6000	275
7000	290
8000	335
9000	400
10000	806
20000	1329
30000	1963

Figure A.2 – Consommation électrique de l'axe z



Vitesse programmée (mm/min)	Puissance absorbée (Watt)
500	8
1000	13
2000	20
3000	30
4000	25
5000	40
6000	50
7000	70
8000	80
9000	100
10000	119
20000	167

Figure A.3 – Consommation électrique de l'axe A



Vitesse programmée (mm/min)	Puissance absorbée (Watt)
500	4
1000	10
2000	19
3000	25
4000	29
5000	44
6000	52
7000	63
8000	74
9000	100
10000	117

Figure A.4 – Consommation électrique de l'axe C

B

Essais de traction sur les éprouvettes à taux de poudre recyclé variable

Cette annexe présente l'ensemble des résultats issus des essais de traction que nous avons réalisé sur les éprouvettes fabriquées en fabrication par projection de poudres pour lesquelles, le taux de poudre recyclée varie.

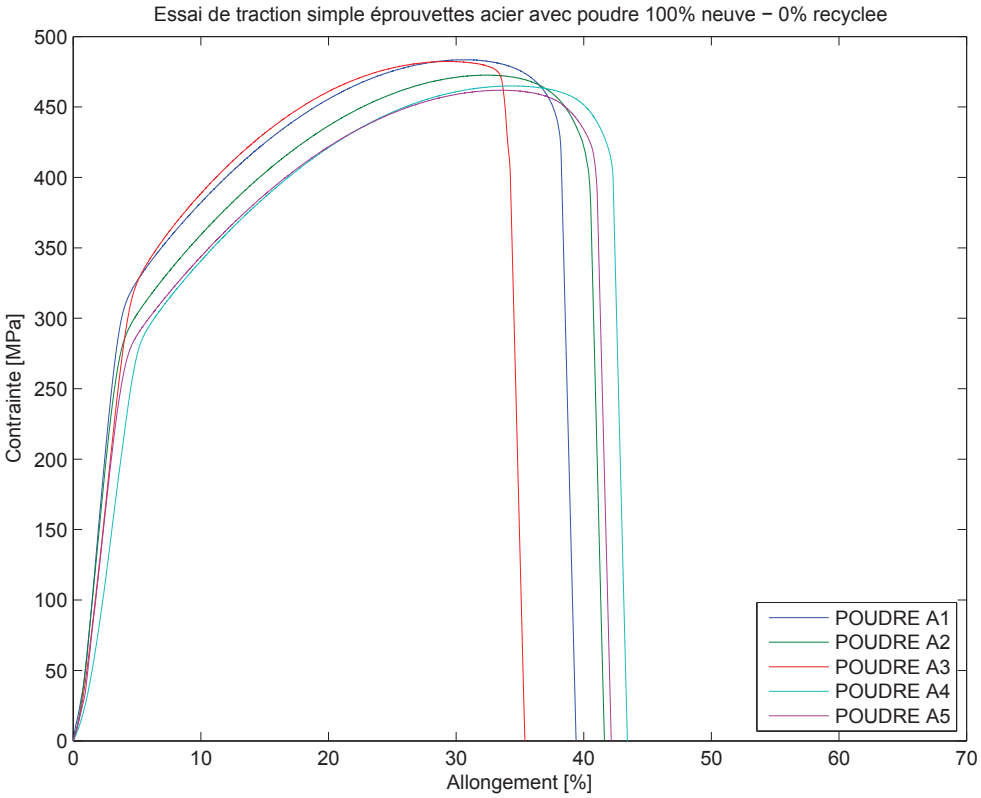


Figure B.1 – Résultats d'essais de traction simple sur l'échantillon A

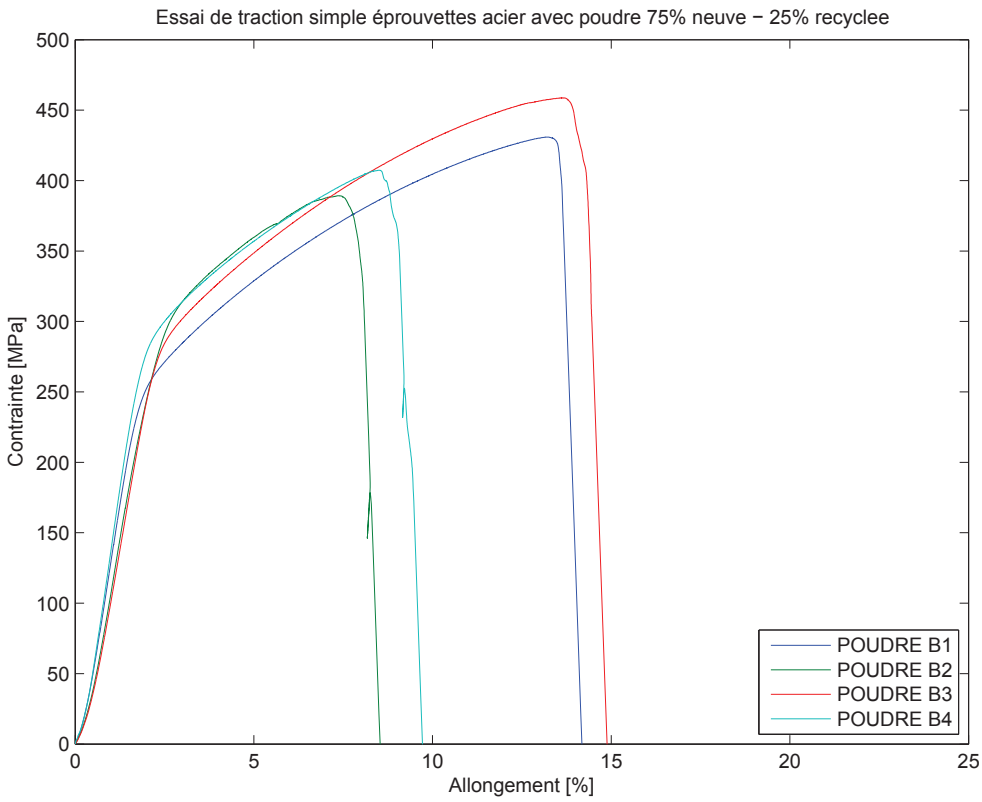


Figure B.2 – Résultats d'essais de traction simple sur l'échantillon B

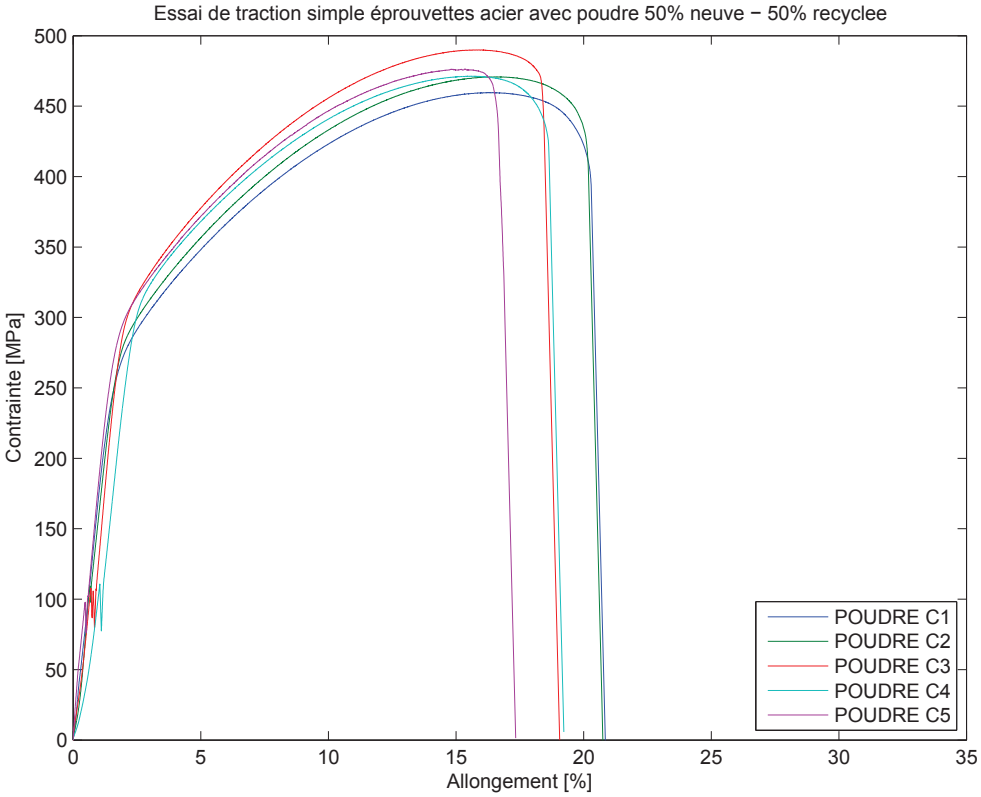


Figure B.3 – Résultats d'essais de traction simple sur l'échantillon C

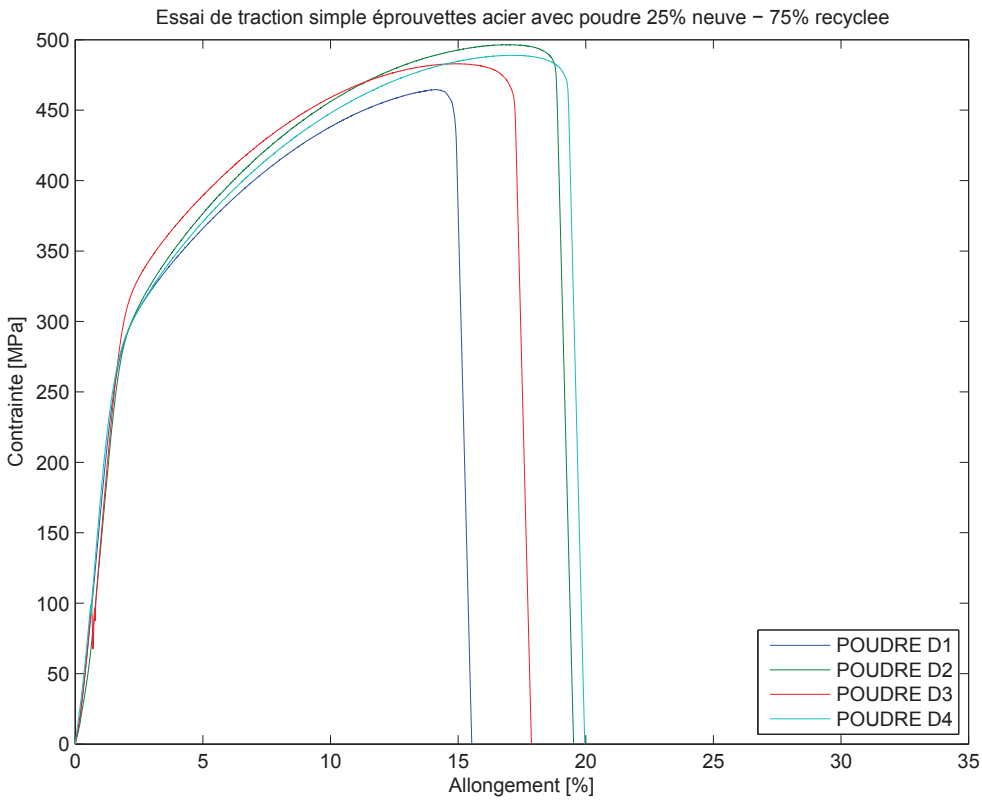


Figure B.4 – Résultats d'essais de traction simple sur l'échantillon D

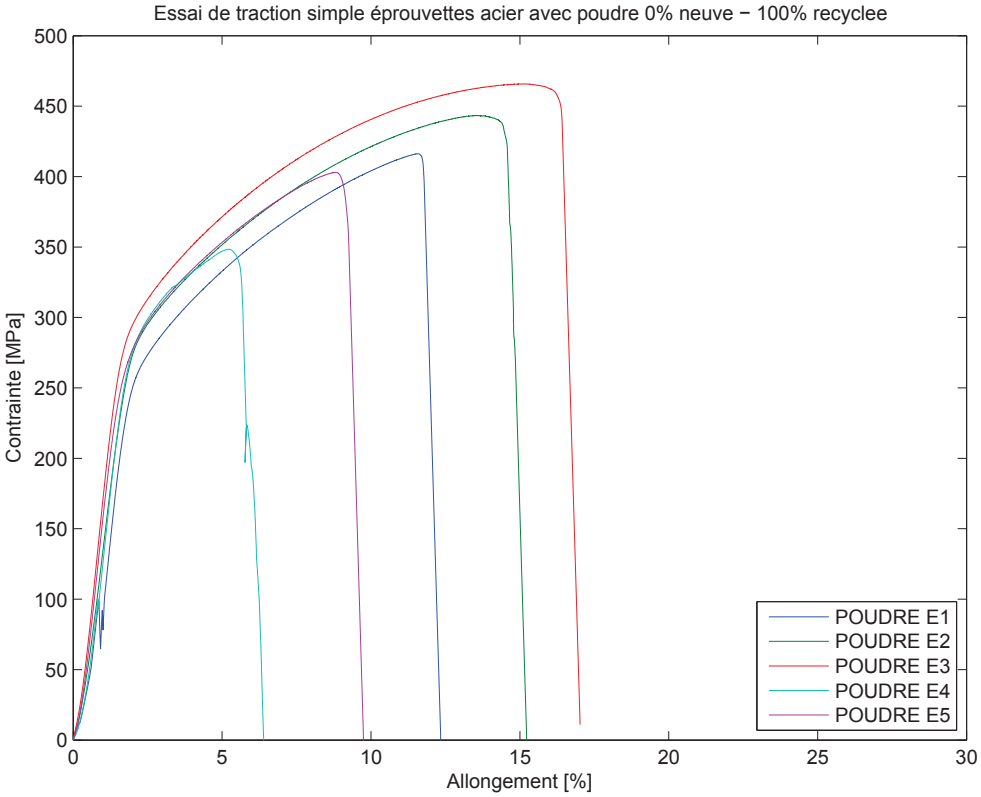


Figure B.5 – Résultats d'essais de traction simple sur l'échantillon E

Bibliographie

[FM22012] Maîtriser la consommation d'énergie dans les fonderies pour accroître la compétitivité. *Fonderie magazine n°24*, pp. 31–36, 2012.

[André1984] André Jean-Claude, Le Méhauté Alain, De Witte Olivier. Dispositif pour réaliser un modèle de pièce industrielle. FR 2567668, 1984.

[Atzeni2012] Atzeni Eleonora, Salmi Alessandro. Economics of additive manufacturing for end-useable metal parts. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1147–1155, 2012.

[Avram2010] Avram Ioan Olivier. *Machine tool use phase : Modeling and analysis with environmental considerations*. PhD thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2010.

[Avram2011] Avram Ioan Olivier, Xirouchakis Paul. Evaluating the use phase energy requirements of a machine tool system. *Journal of Cleaner Production*, 19(6-7):699–711, 2011.

[Ballet2004] Ballet Jérôme, Dubois Jean-luc, Mahieu François-Régis. A la recherche du développement socialement durable : concepts fondamentaux et principes de base. *Développement durable et territoires*, p. 11, 2004.

[Balogun2013] Balogun Vincent Aizebeoje, Mativenga Paul Tarisai. Modelling of direct energy requirements in mechanical machining processes. *Journal of Cleaner Production*, 41:179–186, 2013.

[Bare2006] Bare Jane, Gloria Thomas, Norris Gregory. Development of the Method and U.S. Normalization Database for Life Cycle Impact Assessment and Sustainability Metrics. *Environmental Science & Technology*, 40(16):5108–5115, 2006.

[Baumers2010] Baumers Martin, Tuck Chris, Hague Richard, Ashcroft Ian, Wildman Ricky. A comparative study of metallic additive manufacturing power consumption. In *Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 278–288, Austin, Texas (USA), 2010.

[Baumers2011] Baumers Martin, Tuck Chris, Wildman Ricky, Ashcroft Ian, Hague Richard. Energy inputs to additive manufacturing : Does capacity utilization matter ? In *Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 30–40, Austin, Texas (USA), 2011.

[Behrendt2012] Behrendt Thomas, Zein André, Min Sangkee. Development of an energy consumption monitoring procedure for machine tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61(1):43–46, 2012.

[Benatmane2010] Benatmane Joe. Econolyst - Atkins - Monitor Arm - Report, 2010.

[Blanther1892] Blanther Joseph E. Manufacture of contour relief-maps. US Patent 473901, 1892.

[Bonnard2010] Bonnard Renan. *Proposition de chaîne numérique pour la fabrication additive*. PhD thesis, École Centrale de Nantes, 2010.

[Bourell2009] Bourell David L., Leu Ming C., Rosen David W. Roadmap for Additive Manufacturing : Identifying the Future of Freeform Processing, 2009.

[Brecher2012] Brecher Christian, Baumler Stephan, Jasper David, Triebs Johannes. Energy efficiency cooling systems for machine tools. In *19th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, pp. 239–244, Berkeley, California (USA), 2012.

[Brundtland1987] Brundtland Gro Harlem. Brundtland Report, Our Common Future, 1987.

[Campbell2002] Campbell R.I., Martorelli M., Lee H.S. Surface roughness visualisation for rapid prototyping models. *Computer-Aided Design*, 34(10):717–725, 2002.

[Camposeco-Negrete2013] Camposeco-Negrete C. Optimization of cutting parameters using robust design for minimizing energy consumption in turning of AISI 1018 steel with constant material removal rate. In *11th Global Conference on Sustainable Manufacturing*, pp. 149–152, berlin, Germany, 2013.

[Carvalho2014] Carvalho Ana, Mimoso Ana Filipa, Mendes Acácio Nobre, Matos Henrique A. From a literature review to a framework for environmental process impact assessment index. *Journal of Cleaner Production*, 64:36–62, 2014.

[Chauvidon2013] Chauvidon Jérémy. *Une cité de la gastronomie francaise un nouvel espace culturel et métropolitain*. These de Master, École nationale supérieure d'architecture de Paris-Val de Seine, 2013.

[Choren2001] Choren J., Gervasi V., Herman T., Kamara S., Mitchell J. SLS powder life study. In *Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 39–45, Austin, Texas (USA), 2001.

[Dahmus2004] Dahmus Jeffrey.B, Gutowski Timothy.G. An Environmental Analysis of Machining. In *International Mechanical Engineering Congress and RD&D Expo*, pp. 1–10, Anaheim, California (USA), 2004.

[De Backer2005] De Backer Paul. Les indicateurs financiers du développement durable. p. 227, 2005.

[De Filippi1981] De Filippi A., Ippolito R., Micheletti G.F. NC Machine Tools as Electric Energy Users. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 30(1):323–326, 1981.

[Deckard1989] Deckard Carl R. Method and apparatus for producing parts by selective sintering. US Patent 4863538, 1989.

[Deviese2012] Deviese Guy. 3M minimise l'impact dans la continuité. *Le Journal de la Production n°111*, pp. 26–27, 2012.

[Devillez2011] Devillez A., Le Coz G., Dominiak S., Dudzinski D. Dry machining of Inconel 718, workpiece surface integrity. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(10):1590–1598, 2011.

[Diaz2009] Diaz Nancy, Helu Moneer, Jarvis Andrew, Tönissen Stefan, Dornfeld David, Schlosser Ralf. Strategies for minimum energy operation for precision machining. In *Machine Tool Technologies Research Foundation 2009 Annual Meeting*, Shanghai, China, 2009.

[Diaz2012] Diaz Nancy, Ninomiya Kevin, Noble Joanna, Dornfeld David. Environmental impact characterization of milling and implications for potential energy savings in industry. volume 1, pp. 518–523, Zurich, Switzerland, 2012.

[Diaz2011] Diaz Nancy, Redelsheimer Elena, Dornfeld David. Energy consumption characterization and redution strategies for milling machine tool use. In *18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, pp. 263–267, Berlin, Germany, 2011.

[Dietmair2009] Dietmair A, Verl A. Energy consumption forecasting and optimization for tool macchine. *Modern Machinery Science Journal*, pp. 63–67, 2009.

[Dotchev2009] Dotchev Krassimir, Yusoff Wan. Recycling of polyamide 12 based powders in the laser sintering process. *Rapid Prototyping Journal*, 15(3):192–203, 2009.

[Draganescu2003] Draganescu F, Gheorghe M, Doicin C V. Models of machine tool efficiency and specific consumed energy. *Journal of Materials Processing Technology*, 141(1):9–15, 2003.

[Drizo2006] Drizo Aleksandra, Pegna Joseph. Environmental impacts of rapid prototyping : an overview of research to date. *Rapid Prototyping Journal*, 12(2):64–71, 2006.

[Dubois2002] Dubois Jean-luc, Mahieu François-Régis. La dimension sociale du développement durable : Réduction de la pauvreté ou durabilité sociale, 2002.

[Dubourg2008] Dubourg L., Archambeault J. Technological and scientific landscape of laser cladding process in 2007. *Surface and Coatings Technology*, 202(24):5863–5869, 2008.

[Dudzinski2004] Dudzinski D, Devillez a, Moufki a, Larrouquère D, Zerrouki V, Vigneau J. A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(4):439–456, 2004.

[Duflou2011] Duflou J.R., Kellens K., Dewulf W. Unit process impact assessment for discrete part manufacturing : A state of the art. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 4(2):129–135, 2011.

[Duflou2012] Duflou Joost R, Sutherland John W, Dornfeld David, Herrmann Christoph, Jeswiet Jack, Kara Sami, Hauschild Michael, Kellens Karel. Towards energy and resource efficient manufacturing : A processes and systems approach. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61:587–609, 2012.

[Dugas2002] Dugas Arnaud, Lee Jung-Jae, Hascoet Jean-Yves. An enhanced machining simulator considering tool deflection. *International Journal of Manufacturing Systems*, pp. 1–23, 2002.

[Dugas2003] Dugas Arnaud, Lee Jung-Jae, Terrier M, Hascoet Jean-Yves. Development of a machining simulator considering machine behaviour. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Journal of Engineering Manufacture*, 217(9):1333–1339, 2003.

[Evans1991] Evans C, Member Active. Cryogenic Diamond Turning of Stainless Steel. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 40(1):571–575, 1991.

[Ghani2014] Ghani Jaharah A., Rizal Muhammad, Che Haron Che Hassan. Performance of green machining : A comparative study of turning ductile cast iron FCD700. *Journal of Cleaner Production*, (In Press, Corrected Proof,), 2014.

[Gibson2009a] Gibson Ian, Rosen David W., Stucker Brent. Development of Additive Manufacturing Technology. In *Additive Manufacturing Technologies : Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing2*, chapter 2, pp. 17–38, 2009.

[Gibson2009b] Gibson Ian, Rosen David W., Stucker Brent. Introduction and basic principles. In *Additive Manufacturing Technologies : Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, chapter 1, pp. 1–16, 2009.

[Goedkoop2013] Goedkoop Mark, Heijungs Reinout, Huijbregts Mark, De Schryver An, Struijs Jaap, Van Zelm Rosalie. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level - First edition (edition 1.08) - Report I : Characterisation, 2013.

[Goedkoop1999] Goedkoop Mark, Spriensma Renilde. The Eco-Indicator 99 Methodology, 1999.

[Gornet2002] Gornet T.J., Davis K.R., Starr T.L., Mulloy K.M. Characterization of selective laser sintering materials to determine process stability. In *Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 546–553, Austin, Texas (USA), 2002.

[Gutowski2006] Gutowski Timothy, Dahmus Jeffrey, Thiriez Alex. Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes. In *13 th CIRP International Conference of Life Cycle Engineering*, pp. 1–5, Lueven, Belgium, 2006.

[Hague2007] Hague Richard, Tuck Chris. ATKINS : Manufacturing a Low Carbon Footprint - Zero Emission Enterprise Feasibility Study, 2007.

[Hanafi2012] Hanafi Issam, Khamlichi Abdellatif, Cabrera Francisco Mata, Almansa Emiliano, Jabbouri Abdallah. Optimization of cutting conditions for sustainable machining of PEEK-CF30 using TiN tools. *Journal of Cleaner Production*, 33:1–9, 2012.

[Hao2010] Hao Liang, Raymond David, Strano Giovanni, Dadbakhsh Sasan. Enhancing the Sustainability of Additive Manufacturing. In *5th International Conference on Responsive Manufacturing - Green Manufacturing 2010*, pp. 390–395, Ningbo, China, 2010.

[Hascoet2013] Hascoet Jean-Yves, Carabin Gilles, Mognol Pascal. Procédé et dispositif d'usinage par addition de matiere et mise en forme combinées. FR 2983424, 2013.

[He2006] He Jiankang, Li Dichen, Lu Bingheng, Wang Zhen, Zhang Tao. Custom fabrication of a composite hemi-knee joint based on rapid prototyping. *Rapid Prototyping Journal*, 12(4): 198–205, 2006.

[He2012] He Yan, Liu Bo, Zhang Xiaodong, Gao Huai, Liu Xuehui. A modeling method of task-oriented energy consumption for machining manufacturing system. *Journal of Cleaner Production*, 23(1):167–174, 2012.

[He2005] He Yujue, Ye Ming, Wang Chengtao. A method in the design and fabrication of exact-fit customized implant based on sectional medical images and rapid prototyping technology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(5-6):504–508, 2005.

[Hopkinson2003] Hopkinson N, Dickens P. Analysis of rapid manufacturing - using layer manufacturing processes for production. *Journal of Mechanical Enginnering Science*, 217:31–39, 2003.

[Hopkinson2006] Hopkinson N, Gao Y, McAfee D J. Design for environment analyses applied to rapid manufacturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D : Journal of Automobile Engineering*, 220(10):1363–1372, 2006.

[Hu2012] Hu Shaohua, Liu Fei, He Yan, Hu Tong. An on-line approach for energy efficiency monitoring of machine tools. *Journal of Cleaner Production*, 27:133–140, 2012.

[Huang2012] Huang Samuel H., Liu Peng, Mokasdar Abhiram, Hou Liang. Additive manufacturing and its societal impact : a literature review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5-8):1191–1203, 2012.

[Hull1984] Hull Charles W. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. US Patent 4575330, 1984.

[ISO1980] ISO. 6983-1 : Systèmes d'automatisation industrielle et intégration - Commande numérique des machines - Format de programme et définitions des mots adresses - Partie 1 : format des données pour les systèmes de positionnement, de commande paraxiale de mouve, 1980.

[ISO1997] ISO. 14040 : Gestion environnementale - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre, 1997.

[ISO2006] ISO. ISO 14044 : Gestion environnementale - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices, 2006.

[ISO2008] ISO. NF EN ISO 4490 : Détermination du temps d'écoulement au moyen d'un entonnoir calibré (appareil de Hall), 2008.

[ISO2009] ISO. ISO 6892-1 : Matériaux métalliques - Essai de traction - Partie 1 : Méthode d'essai à température ambiante, 2009.

[ISO2011] ISO. NF E 67-001 : Fabrication additive - Vocabulaire, 2011.

[ISO2012a] ISO. 14955-1 : Machines-outils - Évaluation environnementale des machines-outils - Partie 1 : Méthode de conception de machines-outils économes en énergie, 2012.

[ISO2012b] ISO. XP E 67-010 : Fabrication additive - Poudres, spécifications techniques, 2012.

[Itsubo2003] Itsubo Norihiro, Inaba Atsushi. A new LCIA method : LIME has been completed. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(5):305–305, 2003.

[Jancovici2009] Jancovici Jean-Marc, ADEME. Bilan Carbone : Un outil devenu indispensable, 2009.

[Jolliet2003] Jolliet Olivier, Margni Manuele, Charles Raphaël, Humbert Sébastien, Payet Jérôme, Rebitzer Gerald, Rosenbaum Ralph. IMPACT 2002+ : A new life cycle impact assessment methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(6):324–330, 2003.

[Jolliet2004] Jolliet Olivier, Müller-wenk Ruedi, Bare Jane, Brent Alan, Goedkoop Mark, Heijungs Reinout, Itsubo Norihiro, Peña Claudia, Pennington David, Potting José, Rebitzer Gerald, Stewart Mary. The LCIA Midpoint-damage Framework of the UNEP / SETAC Life Cycle Initiative. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 9(6):394–404, 2004.

[Jovanovic2014] Jovanovic Vukica, Stevanov Branislav, Seslija Dragan, Dudic Slobodan, Tesic Zdravko. Energy Efficiency Optimization of Air Supply System in a Water Bottle Manufacturing System. *Journal of Cleaner Production*, (In Press, Corrected Proof), 2014.

[Kara2011] Kara S., Li W. Unit process energy consumption models for material removal processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60(1):37–40, 2011.

[Kaynak2014] Kaynak Yusuf. Evaluation of machining performance in cryogenic machining of Inconel 718 and comparison with dry and MQL machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 72(5-8):919–933, 2014.

[Kellens2013] Kellens Karel. *Energy and resource Efficient Manufacturing - Unit process analysis and optimisation*. PhD thesis, KU Leuven, 2013.

[Kellens2011a] Kellens Karel, Dewulf Wim, Overcash Michael, Hauschild Michael Z., Duflou Joost R. 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 : Methodology description. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(1):69–78, 2011.

[Kellens2010] Kellens Karel, Yasa Evren, Dewulf Wim, Duflou Joost R. Environmental assessment of selective laser melting and selective laser sintering. In *Going green - CARE Innovations*, Vienne, Autriche, 2010.

[Kellens2011b] Kellens Karel, Yasa Evren, Renaldi, Dewulf Wim, Kruth J.P, Duflou Joost.R. Energy And Resource Efficiency of SLS/SLM Processes. In *Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 1–16, Austin, Texas (USA), 2011.

[Kerbrat2011] Kerbrat Olivier, Mognol Pascal, Hascoet Jean-Yves. A new DFM approach to combine machining and additive manufacturing. *Computers in Industry*, 62(7):684–692, 2011.

[Kong2011] Kong Daeyoung, Choi Seungchoun, Yasui Yusuke, Pavanaskar Sushrut, Dornfeld David, Wright Paul. Software-based tool path evaluation for environmental sustainability. *Journal of Manufacturing Systems*, 30(4):241–247, 2011.

[Kroll2011] Kroll L., Blau P., Wabner M., FrießU., Eulitz J., Klärner M. Lightweight components for energy-efficient machine tools. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 4(2):148–160, 2011.

[Kruth1998] Kruth J, Leu M, Nakagawa T. Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping. In *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, volume 47, pp. 525–540, 1998.

[Lagutkin2004] Lagutkin Stanislav, Achelis Lydia, Sheikhaliev Sheikhali, Uhlenwinkel Volker, Srivastava Vikas. Atomization process for metal powder. *Materials Science and Engineering : A*, 383(1):1–6, 2004.

[Lathkar2000] Lathkar G.S., Bas U.S.K. Clean metal cutting process using solid lubricants. pp. 15–31, Madras, Chennai (India), 2000.

[Lawal2013] Lawal Sunday Albert, Choudhury Imtiaz Ahmed, Nukman Yusoff. A critical assessment of lubrication techniques in machining processes : a case for minimum quantity lubrication using vegetable oil-based lubricant. *Journal of Cleaner Production*, 41:210–221, 2013.

[Le2012] Le Cao Vinh, Pang Chee Khiang, Gan Oon Peen, Chee Xiang Min, Zhang Dan Hong, Luo Ming, Chan Hian Leng, Lewis Frank L. Classification of energy consumption patterns for energy audit and machine scheduling in industrial manufacturing systems. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 35(5):583–592, 2012.

[Le Bourhis2014] Le Bourhis Florent, Kerbrat Olivier, Dembinski Lucas, Hascoet Jean-Yves, Mognol Pascal. Predictive model for environmental assessment in additive manufacturing process. In *CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, pp. 1–6, 2014.

[Le Bourhis2012] Le Bourhis Florent, Kerbrat Olivier, Hascoët Jean-Yves, Mognol Pascal. Evaluation et modélisation des impacts environnementaux en fabrication directe, application à la projection de poudre. In *17th European Forum on Rapid Prototyping and Manufacturing (AEPR)*, number June, pp. 1 – 29, 2012.

[Le Bourhis2013] Le Bourhis Florent, Kerbrat Olivier, Hascoet Jean-Yves, Mognol Pascal. Sustainable manufacturing : evaluation and modeling of environmental impacts in additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(9):1927–1939, 2013.

[Le Braz2014] Le Braz Eric. On a retrouvé les vrais inventeurs de l'imprimante 3D. *Management*, pp. 70–71, 2014.

[Lewis1998] Lewis G.K., Milewski J.O., Cremers D.A., Nemec R.B., Barbe M.R. Laser production of articles from powders. US Patent 5837960, 1998.

[LJP2012] LJP. Produire propre ça rapporte ! *Le Journal de la Production n°111*, pp. 18–27, 2012.

[Luo1999a] Luo Yanchun, Ji Zhiming, Leu Ming C, Caudill Reggie. Environmental performance analysis of solid freeform fabrication processes. In *Proceedings of the 1999 International Conference on Electronics & the Environment*, pp. 1–6, Danvers, Massachusetts (USA), 1999.

[Luo1999b] Luo Yanchun, Leu Ming C, Ji Zhiming. Assessment of environmental performance of rapid prototyping and rapid tooling processes. In *Solid Freeform Fabrication*, pp. 783–792, Austin, Texas (USA), 1999.

[Machado1997] Machado A R, Wallbank J. The effect of extremely low lubricant volumes in machining. *Wear*, 210(1-2):76–82, 1997.

[Mandet2013] Mandet Thibaut. Optimisation dela consommation d'énergie des équipements périphériques. *Fonderie magazine n°31*, pp. 32–36, 2013.

[Mazurkiewicz1989] Mazurkiewicz M., Kubala Z., Chow J. Metal Machining With High - Pressure Water - Jet Cooling Assistance - A New Possibility. *Journal of Engineering for Industry*, 111(1):1–7, 1989.

[Mognol2006] Mognol Pascal, Lepicart Denis, Perry Nicolas. Rapid prototyping : energy and environment in the spotlight. *Rapid Prototyping Journal*, 12(1):26–34, 2006.

[Mognol2005] Mognol Pascal, Perry Nicolas, Lepicart Denis. Environment aspect of rapid prototyping : process energy consumption. In *12th CIRP Life Cycle Engineering*, pp. 1–5, 2005.

[Mori2011] Mori M., Fujishima M., Inamasu Y., Oda Y. A study on energy efficiency improvement for machine tools. In *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, volume 60, pp. 145–148, 2011.

[Morrow2007] Morrow W, Qi H, Kim I, Mazumder J, Skerlos S. Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 15(10):932–943, 2007.

[MP2013] MP. La lubrificatin au coeur du sujet. *Machines production n°968*, pp. 17–65, 2013.

[Muller2013] Muller Pierre. *Fabrication additive de pièces multimatérieux*. PhD thesis, École Centrale de Nantes, 2013.

[Munoz1995] Munoz A A, Sheng P. An analytical approach for determining the environmental impact of machining processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 53:736–758, 1995.

[Newman2012] Newman S. T, Nassehi A, Dhokia V. Energy efficient process planning for CNC machining. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 5:127–136, 2012.

[Nguyen2013] Nguyen Thi Ai Lanh, Museau Matthieu, Paris Henri. Méthodologie de (re)conception de l'outil de production pour minimiser sa consommation d'énergie. In *21ème Congrès Français de Mécanique*, Bordeaux, France, 2013.

[Oda2012] Oda Yohei, Kawamura Yoshikazu, Fujishima Makoto. Energy Consumption Reduction by Machining Process Improvement. In *3rd CIRP Conference on Process Machine Interactions*, volume 4, pp. 120–124, 2012.

[Pham2008] Pham D T, Dotchev K D, Yusoff W A Y. Deterioration of polyamide powder properties in the laser sintering process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C : Journal of Mechanical Engineering Science*, 222(11):2163–2176, 2008.

[Ponche2013] Ponche Rémi. *Méthodologie de conception pour la fabrication additive, application à la projection de poudres*. PhD thesis, École Centrale de Nantes, 2013.

[Popov2009] Popov I, Onuh S O. Reverse engineering of pelvic bone for hip joint replacement. *Journal of medical engineering & technology*, 33(6):454–9, 2009.

[Pusavec2011] Pusavec F., Hamdi H., Kopac J., Jawahir I.S. Surface integrity in cryogenic machining of nickel based alloy - Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(4):773–783, 2011.

[Pusavec2010a] Pusavec Franci, Krajnik Peter, Kopac Janez. Transitioning to sustainable production - Part I : application on machining technologies. *Journal of Cleaner Production*, 18(2):174–184, 2010.

[Pusavec2010b] Pusavec Franci, Kramar Davorin, Krajnik Peter, Kopac Janez. Transitioning to sustainable production - Part II : evaluation of sustainable machining technologies. *Journal of Cleaner Production*, 18(12):1211–1221, 2010.

[Quaker2012] Quaker. Eco-efficacité des fluides de coupe sans bore. *Machines production n°939*, pp. 15–16, 2012.

[Rajemi2010] Rajemi M.F., Mativenga P.T., Aramcharoen A. Sustainable machining : selection of optimum turning conditions based on minimum energy considerations. *Journal of Cleaner Production*, 18(10):1059–1065, 2010.

[Reeves2008a] Reeves Phil. How rapid manufacturing could transform supply chain. *CSCMP's Supply Chain Quarterly*, 2(4):32–36, 2008.

[Reeves2009] Reeves Philip. Additive manufacturing - A supply chain wide response to economic uncertainty and environmental sustainability. In *7th International Conference on Industrial Tools and Material Processing Technologies*, Ljubjana, Slovenia, 2009.

[Reeves2014] Reeves Phil, 2014. Econolyst Ltd.

[Reeves2008b] Reeves Phil, Tuck Chris, Hague Richard. Rapid manufacturing a low carbon footprint. *TCT Magazine*, 16(4):45–50, 2008.

[Rosa2014] Rosa Benoit, Hascoet Jean-Yves, Mognol Pascal. Topography modeling of laser polishing on AISI 316L milled surfaces. *Mechanics & Industry*, 15(1):51–61, 2014.

[Rotella2013] Rotella G., Dillon O. W., Umbrello D., Settineri L., Jawahir I. S. The effects of cooling conditions on surface integrity in machining of Ti6Al4V alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(1-4):47–55, 2013.

[Ruffo2006a] Ruffo M, Tuck C, Hague R. Cost estimation for rapid manufacturing - laser sintering production for low to medium volumes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Journal of Engineering Manufacture*, 220(9):1417–1427, 2006.

[Ruffo2006b] Ruffo Max, Tuck Chris, Hague Richard. Empirical laser sintering time estimator for Duraform PA. *International Journal of Production Research*, 44(23):5131–5146, 2006.

[Saaty1988] Saaty Thomas L., 1988. *What is the Analytic Hierarchy Process ?*

[Sarikaya2014] Sarikaya Murat, Gullu Abdulkadir. Taguchi design and response surface methodology based analysis of machining parameters in CNC turning under MQL. *Journal of Cleaner Production*, 65:604–616, 2014.

[Serres2011] Serres Nicolas, Tidu Dorian, Sankare Simon, Hlawka Françoise. Environmental comparison of MESO-CLAD® process and conventional machining implementing life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 19(9-10):1117–1124, 2011.

[Singare2004] Singare Sekou, Dichen Li, Bingheng Lu, Yanpu Liu, Zhenyu Gong, Yaxiong Liu. Design and fabrication of custom mandible titanium tray based on rapid prototyping. *Medical engineering & physics*, 26(8):671–6, 2004.

[Sreenivasan2009] Sreenivasan Rameshwar, Bourell David L. Sustainability study in selective laser sintering - An energy perspective. In *Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 257–265, Austin, Texas (USA), 2009.

[Sreenivasan2010] Sreenivasan R., Goel a., Bourell D.L. Sustainability issues in laser-based additive manufacturing. *Physics Procedia*, 5:81–90, 2010.

[Strano2010] Strano Giovanni, Hao Liang, Evans K.E, Everson R.M. Optimization of Quality and Energy Consumption for Additive Layer Manufacturing Process. In *5th International Conference on Responsive Manufacturing - Green Manufacturing 2010*, number 0, pp. 364–369, Ningbo, China, 2010.

[Strano2013] Strano Giovanni, Hao Liang, Everson Richard M., Evans Kenneth E. Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(4):589–597, 2013.

[Sudarmadji2011] Sudarmadji N, Tan J Y, Leong K F, Chua C K, Loh Y T. Investigation of the mechanical properties and porosity relationships in selective laser-sintered polyhedral for functionally graded scaffolds. *Acta biomaterialia*, 7(2):530–7, 2011.

[Telenko1997] Telenko Cassandra, Seepersad Carolyn Conner. A comparative evaluation of energy consumption of Selective Laser Sintering and Injection Molding of Nylon parts. In *Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 41–54, Austin, Texas (USA), 1997.

[Telenko2010] Telenko Cassandra, Seepersad Carolyn Conner. Assessing energy requirements and material flows of selective laser sintering of Nylon parts. In *Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 289–297, Austin, Texas (USA), 2010.

[Torralba2013] Torralba Béatrice. Les émissions de composés organiques volatils à la coulé, en fonderie. *Fonderie magazine n°31*, pp. 19–31, 2013.

[Verma2013] Verma Anoop, Rai Rahul. Energy Efficient Modeling and Optimization of Additive Manufacturing Processes. In *Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 231–241, Austin, Texas (USA), 2013.

[Vijayaraghavan2010] Vijayaraghavan A., Dornfeld D. Automated energy monitoring of machine tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59(1):21–24, 2010.

[Wang2013] Wang Qiulian, Liu Fei, Wang Xianglian. Multi-objective optimization of machining parameters considering energy consumption. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(5-8):1133–1142, 2013.

[Weinert2004] Weinert K, Inasaki I, Sutherland J W, Wakabayashi T. Dry machining and minimum quantity lubrication. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 53(2):511–537, 2004.

[Wohlers2013] Wohlers Terry. Wohlers Report 2013 - Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry, 2013.

[Yan2014] Yan Jihong, Feng Chunhua, Li Lin. Sustainability assessment of machining process based on extension theory and entropy weight approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(5-8):1419–1431, 2014.

[Yan2013] Yan Jihong, Li Lin. Multi-objective optimization of milling parameters - the trade-offs between energy, production rate and cutting quality. *Journal of Cleaner Production*, 52:462–471, 2013.

[Yoon2014] Yoon Hae-Sung, Lee Jang-Yeob, Kim Min-Soo, Ahn Sung-Hoon. Empirical power-consumption model for material removal in three-axis milling. *Journal of Cleaner Production*, 2014.

[Zeoli2011] Zeoli N., Tabbara H., Gu S. CFD modeling of primary breakup during metal powder atomization. *Chemical Engineering Science*, 66(24):6498–6504, 2011.

[Zhang2013] Zhang Yingjie. Energy efficiency techniques in machining process : a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(5-8):1123–1132, 2013.

[Zhao2012] Zhao Fu, Ogaldez Jonathan, Sutherland John W. Quantifying the water inventory of machining processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61(1):67–70, 2012.

l'université nantes angers le mans

PÔLE DE RECHERCHE ET D'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR

Centrale Nantes

Thèse de Doctorat

Florent LE BOURHIS

Titre : Modélisation de la performance environnementale des procédés de fabrication par ajout de matière, application à la projection de poudres métalliques

Title: Predictive model for environmental impact assessment in additive manufacturing processes, metallic powder projection application

Résumé

La fabrication additive est un procédé innovant permettant de produire des pièces mécaniques. Néanmoins, les impacts environnementaux qu'il génère sont encore méconnus. Pour assurer le développement des procédés de fabrication par ajout de matière, il est important de développer le concept de DFSAM (Design for Sustainable Additive Manufacturing). En effet, un des objectifs de la fabrication durable est de minimiser l'ensemble des flux consommés (électricité, matière, fluides, …) lors de l'étape de réalisation. Pour cela il est intéressant de proposer un modèle prédictif de consommation intégré dans la boucle de conception, permettant d'évaluer l'impact environnemental d'un produit lors de sa fabrication.
Les travaux de cette thèse porte sur la modélisation et l'évaluation des impacts environnementaux de ces procédés et plus précisément à la technologie de projection de poudres. Ces travaux ont permis de mettre en place une nouvelle méthodologie d'évaluation de la performance environnementale du couple pièce-procédé basée sur l'ensemble de sources d'impacts liés au procédé de fabrication. La méthodologie développée s'intéresse de plus à l'ensemble des étapes nécessaires à la production d'une pièce mécanique (de mise en œuvre de la matière brute jusqu'à la phase de finition).

Ce manuscrit est divisé en cinq chapitres qui permettent de présenter le contexte général de l'étude, l'état de l'art, la méthodologie d'évaluation, l'application sur le procédé de fabrication par projection de poudres et l'outil informatique développé durant ces travaux de thèse.
Le dernier chapitre se consacre à la conclusion sur les apports de ces travaux et propose des perspectives de recherches.

Mots clés
Fabrication Additive ; Impacts environnementaux ; Fabrication par projection de poudres ; Conception adaptée à la fabrication additive

Abstract

Additive manufacturing is an innovative process to produce mechanical parts. However, it generates environmental impacts are still unknown. To ensure the development of manufacturing processes by adding material, it is important to develop the concept of DFSAM (Design for Sustainable Additive Manufacturing). Indeed, one of the objectives of sustainable manufacturing is to minimize the total flow consumed (electricity, material, fluids...) during production step. For this it is interesting to propose a predictive model of consumption in the integrated design loop, allowing to assess the environmental impact of a product during its manufacture.
The work of this thesis focuses on the modeling and assessment of environmental impacts of these processes and more specifically for powder projecting technology. This work helped to establish a new methodology of the environmental performance of the set part-process based on the whole impacts sources related to the manufacturing process. The methodology developed is increasingly interested in all the stages necessary for the production of a mechanical part (raw material production to the finishing step).

This manuscript is divided into five chapters that can present the general context of the study, the state of the art, the methodology developed, an application of the methodology to projecting powders manufacturing process 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.

Key Words
Additive Manufacturing; Environmental Impact; Powder projection process; Design for sustainable additive manufacturing

L'Université Nantes Angers Le Mans