



Proposition d'une stratégie soutenable pour donner une nouvelle vie à une pièce en s'appuyant sur les techniques de fabrication additive

van Thao Le

► To cite this version:

van Thao Le. Proposition d'une stratégie soutenable pour donner une nouvelle vie à une pièce en s'appuyant sur les techniques de fabrication additive. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université Grenoble Alpes, 2017. Français. NNT: . tel-01623987v1

HAL Id: tel-01623987

<https://theses.hal.science/tel-01623987v1>

Submitted on 25 Oct 2017 (v1), last revised 26 Jan 2018 (v2)

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.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE LA COMMUNAUTÉ UNIVERSITÉ
GRENOBLE ALPES**

Spécialité : **Génie Industriel**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Van Thao LE

Thèse dirigée par **Henri PARIS**, professeur à l'Université Grenoble Alpes
et co-encadrée par **Guillaume MANDIL**, maître de conférences à
l'Université Grenoble Alpes

préparée au sein du **Laboratoire G-SCOP**
dans l'**École Doctorale I-MEP2**

Proposition d'une stratégie soutenable pour donner une nouvelle vie à une pièce en s'appuyant sur les techniques de fabrication additive

Thèse soutenue publiquement le **29 septembre 2017**,
devant le jury composé de :

Monsieur Emmanuel CAILLAUD

Professeur à l'Université de Strasbourg, Président

Monsieur Pascal MOGNOL

Professeur à l'Ecole Normale Supérieure de Rennes, Rapporteur

Monsieur Nicolas PERRY

Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers ParisTech,
Rapporteur

Monsieur Henri PARIS

Professeur à l'Université Grenoble Alpes, Directeur de thèse

Monsieur Guillaume MANDIL

Maître de conférences à l'Université Grenoble Alpes, Co-encadrant de thèse



A mes parents, ma femme et mon fils qui m'ont supporté ...

Remerciements

Mes remerciements s'adressent, dans un premier temps, à l'ARC8 et à la Région Auvergne-Rhône-Alpes, qui a financé ma thèse et donc permis d'accomplir tout ce travail. Ces travaux sont réalisés au sein du laboratoire G-SCOP. Je tiens donc à remercier M. **François VILLENEUVE**, Professeur à l'Université Grenoble-Alpes, pour son accueil au laboratoire.

Je tiens à remercier les membres du jury de thèse, en particulier à M. **Pascal MOGNOL**, professeur à l'Ecole Normale Supérieure de Rennes et M. **Nicolas PERRY**, professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers - ParisTech pour avoir accepté de rapporter sur mon travail. Le jugement apporté sur la qualité scientifique du document m'a permis d'améliorer la vision sur les perspectives. Je tiens également à remercier M. **Emmanuel CAILLAUD**, professeur à l'Université de Strasbourg d'avoir présider le jury de thèse.

Ces travaux ont été menés sous la direction de M. **Henri PARIS**, professeur à l'Université Grenoble-Alpes. Un grand merci à lui pour son encadrement, son investissement et sa grande disponibilité pendant ces trois ans de thèse. Il a eu un rôle fondamental et principal dans tous mes travaux. Je tiens également à remercier M. **Guillaume MANDIL**, maître de conférences à l'Université Grenoble Alpes pour son aide pendant les trois ans de thèse. Enfin, je remercie tous deux de m'avoir proposé un sujet de thèse intéressant et adapté à mon domaine de recherche. Ce travail est considéré comme la première expérience pour que je puisse aller plus loin dans ma carrière.

Je souhaite remercier aux permanents et thésards de l'équipe Conception Produit-Process pour leurs disponibilités et leurs qualités humaines. Je souhaite également remercier mes ami(e)s vietnamiens et français à Grenoble qui ont partagé avec moi des moments mémorables au cours des trois ans de thèse.

Finalement, je souhaite vraiment remercier toute ma famille au Vietnam qui m'a soutenue et encouragée durant ces trois ans de thèse, en particulier mes parents pour leurs encouragements et toutes les choses qu'ils ont faites pour moi. Un grand merci à la famille de ma cousine Mme. **HOANG Mai Huong** pour leurs aides à ma petite famille au Vietnam. Derniers mots je souhaite remercier ma femme **NGUYEN Thi Ha** et mon fils **LE Anh Khoi** qui est né en avril lorsque j'étais en train de rédiger le rapport de thèse. Lui et ma femme ont été indispensables pour que j'aie des motivations de finaliser ces travaux. **Merci beaucoup !**

LE Van Thao

Table des matières

Remerciements.....	1
Table des matières	3
Liste des figures	7
Liste des tableaux	13
Glossaire.....	15
Résumé en français.....	17
English summary	19
Chapitre 1 Contexte général de l'étude.....	21
1.0 Introduction	21
1.1 Produits en fin de vie et différentes stratégies pour les récupérer	21
1.1.1 Produits en fin de vie et les enjeux associés.....	21
1.1.2 Stratégies existantes de récupération de produits en fin de vie	23
1.2 Nouvelles opportunités offertes par la fabrication additive	25
1.2.1 Vision globale de techniques de fabrication additive.....	25
1.2.2 Capacités associées aux technologies de fabrication additive.....	29
1.3 Possibilité de donner une nouvelle vie aux pièces en fin de vie	32
1.3.1 Problématique.....	32
1.3.2 Questions de recherche (QR).....	33
1.4 Organisation du manuscrit	34
Chapitre 2 Etude bibliographique.....	35
2.0 Introduction	35
2.1 Procédés de fabrication additive métallique	35
2.1.1 Poudres métalliques.....	36
2.1.2 Procédés de fusion sur lit de poudre (PBF)	38
2.1.3 Procédés de fusion par dépôt direct de matière sous flux d'énergie	41
2.1.4 Matériaux disponibles pour les procédés additifs métalliques	42

2.1.5	Quels sont les facteurs importants pour la fabrication additive de pièces métalliques ?	44
2.2	Combinaison de procédés soustractifs et additifs	47
2.2.1	Pourquoi est-il nécessaire de combiner les procédés additifs et soustractifs ? ..	47
2.2.2	Applications principales de la combinaison des procédés additifs et soustractifs.....	47
2.3	Planification des processus de fabrication pour la combinaison des procédés additifs et soustractifs	51
2.3.1	Concept d'entité de fabrication	51
2.3.2	Identification et extraction des entités	54
2.3.3	Planification des processus de fabrication additive et soustractive	55
2.4	Outils d'analyse des impacts environnementaux	57
2.4.1	Analyse du Cycle de Vie (ACV).....	58
2.4.2	Evaluation des impacts environnementaux des procédés additifs et soustractifs.....	60
2.5	Synthèse de l'étude bibliographique	68
2.6	Proposition de la stratégie soutenable et la procédure de recherche	69
2.6.1	Principe de la stratégie	69
2.6.2	Processus général compatible avec la stratégie.....	70
2.6.3	Contour de l'étude et la procédure de recherche.....	71
Chapitre 3	Faisabilité de l'ajout de nouvelles entités sur une pièce existante par les procédés additifs métalliques	73
3.1	Caractéristiques des matériaux utilisés en fabrication additive métalliques	74
3.1.1	Microstructure des pièces fabriquées par fabrication additive.....	74
3.1.2	Propriétés mécaniques des matériaux	77
3.2	Ajout de nouvelles entités sur une pièce existante en fabrication additive métallique... ..	79
3.3	Ajout de nouvelles entités sur un substrat existant par EBM.....	80
3.3.1	Matériaux et méthode expérimentale	81

3.3.2	Fabrication des éprouvettes	81
3.3.3	Observation des microstructures et des propriétés mécaniques des éprouvettes	84
3.3.4	Résultats et discussions	85
3.4	Conclusion du chapitre	91
Chapitre 4	Conception de gammes de fabrication - une combinaison intelligente des opérations additives et soustractives.....	93
4.0	Introduction	93
4.1	Vision de la méthodologie proposée	94
4.2	Extraction des entités additives et soustractives.....	95
4.2.1	Définition des repères locaux et positionnement des deux modèles CAO (pièce existante et pièce finale) (A01-1)	96
4.2.2	Extraire la partie commune, la partie à enlever et la partie à ajouter (A01-2) ...	96
4.2.3	Modification du volume commun en prenant en compte les contraintes de fabrication (A01-3).....	97
4.2.4	Extraction des entités d'usinage et de fabrication additive (A01-4 et A01-5) et relations entre entités.....	97
4.3	Identification des états intermédiaires dans le processus de fabrication	98
4.4	Elaboration de gammes de fabrication combinant des opérations additives et soustractives	100
4.4.1	Définition d'un processus de fabrication associé à chaque entité	101
4.4.2	Elaboration des phases.....	102
4.5	Cas d'étude.....	107
4.5.1	Présentation du cas d'étude	107
4.5.1	Extraction des entités additives et soustractives.....	107
4.5.2	Elaboration de gammes de fabrication	110
4.6	Conclusion du chapitre	112
Chapitre 5	Evaluation des performances environnementales	115
5.0	Introduction	115
5.1	Méthodologie d'évaluation des impacts environnementaux.....	116

5.1.1	Définition des objectifs et de l'unité fonctionnelle	116
5.1.2	Frontières du système.....	116
5.2	Inventaire du cycle de vie (ICV) et méthode de calcul	118
5.2.1	Recyclage de la matière	120
5.2.2	Production de la poudre	121
5.2.3	Consommation énergétique en EBM	121
5.2.4	Consommation d'énergie et de ressources en usinage.....	125
5.2.5	Calcul des impacts environnementaux et comparaison des stratégies de fabrication	128
5.3	Résultats et les discussions	129
5.4	Conclusion du chapitre.....	134
Chapitre 6	Conclusions et perspectives	137
	Conclusion.....	137
	Perspectives.....	139
Bibliographie....		141
Annexes.....		155
	Annexe A : Liste des publications.....	155
	Annexe B : Métallurgie de l'alliage de titane (Ti-6Al-4V).....	157

Liste des figures

Figure 1.1. Cycle de vie de produits et des impacts environnementaux (Bourhis, 2014).	21
Figure 1.2. Cycle de vie de produits et les options en fin de vie (Gehin et al., 2009).....	24
Figure 1.3. Evolution du paradigme de la fabrication (Koren, 2010).	25
Figure 1.4. Evolution du nombre de machines industrielles de fabrication additive vendues (Source : Wohlers Report 2016).....	26
Figure 1.5. Nombre de publications dans le domaine de la fabrication jusqu'à 2015 (Esmailian et al., 2016).	27
Figure 1.6. Applications de techniques de fabrication additive (en %) dans les différents domaines de la fabrication (Wohlers, 2014).....	28
Figure 1.7. (a) Reconception de charnière de frein de l'Airbus A320 (Tomlin and Meyer, 2011) ; et (b) l'intégration des structures de treillis dans l'optimisation de pièce aéronautique (Vo et al., 2015).....	30
Figure 1.8. Reconception d'un conduit réduisant le nombre de composants de 15 à un seul (Hopkinson, 2006).	30
Figure 1.9. Système hybride <i>Lasertec 65 3D</i> développé par <i>DMG MORI</i>	31
Figure 2.1. Classification des techniques de fabrication additive métallique.	36
Figure 2.2. Obtention de poudres métalliques par atomisation (Yolton and Froes, 2015).....	37
Figure 2.3. Principe de fabrication du procédé SLM (Dutta and Froes, 2015).	38
Figure 2.4. Procédé EBM : (a) Schéma d'un système EBM, et (b) les étapes de construction d'une couche (adapté à partir de (Körner, 2016; Smith et al., 2016).	40
Figure 2.5. Principe de fabrication de procédés de fusion par dépôt direct de matière (Ponche, 2013).....	41
Figure 2.6. Rugosité de la surface de pièces réalisées en SLM.....	45
Figure 2.7. Rugosité de la surface de pièces réalisées en DMD (Gharbi et al., 2013).	45
Figure 2.8. Réduction des fissures et des déformations des pièces réalisées en SLM en chauffant la plaque de départ (Kruth et al., 2015).	46
Figure 2.9. Processus de fabrication des pièces via le système AIMS (<i>additive methods integrated with subtractive method</i>) (Manogharan et al., 2016, 2015).	48
Figure 2.10. Le modèle CAD de la turbine aéronautiques (Vayre, 2014).....	49
Figure 2.11. Représentation du processus de remanufacturing dans le projet RECLAIM (Jones et al., 2012).....	49

Figure 2.12. Remanufacturing de brûleurs à gaz via le procédé SLM (Navrotsky et al., 2015).	50
Figure 2.13. Différents types des entités d'usinage (extrait à partir de la thèse de (Vayre, 2014)).	52
Figure 2.14. Représentation des entités d'usinage par les graphes (Sunil et al., 2010).	54
Figure 2.15. Extraction des entités d'usinage par analyse des volumes à enlever : (a) l'entité MF1 usinée avant l'entité MF2 et (b) l'entité MF2 usinée avant l'entité MF1 (Woo and Sakurai, 2002).	55
Figure 2.16. La réparation des matrices en utilisant la combinaison des procédés additifs et soustractifs (Ren et al., 2006).	56
Figure 2.17. Fabrication d'une nouvelle pièce à partir d'une pièce existante en plastique (Newman et al., 2015; Zhu et al., 2017).	57
Figure 2.18. Les attributs pour la décision de fabrication des produits dans les années 1990s et aujourd'hui (Chen et al., 2015).	57
Figure 2.19. Quatre étapes de l'ACV (ISO, 2006).	58
Figure 2.20. Les méthodes d'évaluation des impacts environnementaux et leur nombre d'impacts, d'après (Carvalho et al., 2014).	59
Figure 2.21. La décomposition de l'énergie consommée en usinage (Gutowski et al., 2006).	61
Figure 2.22. Evolution de la consommation spécifique d'énergie en fonction du débit : machine DMU 60P sans utiliser de fluide de refroidissement (Kara and Li, 2011).	62
Figure 2.23. (a) la géométrie de la pièce étudiée et la configuration de remplissage maximal de l'espace de fabrication dans le procédé SLM (b) et EBM (c) (Baumers, 2012).	64
Figure 2.24. Méthodologie UPLCI associée à l'initiative CO2PE ! (Duflou et al., 2011).	64
Figure 2.25. Comparaison environnementale des procédés d'usinage et de fabrication additive : (a) la pièce utilisée, et (b) le résultat de l'ACV (Serres et al., 2011).	66
Figure 2.26. (a) la pièce originale de l'étude, (b) la géométrie optimisée de la pièce pour l'usinage, et (c) la géométrie optimisée pour la fabrication additive (Tang et al., 2016).	67
Figure 2.27. Les principaux flux dans la production des pièces par (a) l'usinage et (b) par la combinaison de la fabrication additive et d'usinage (Priarone and Ingarao, 2017).	67
Figure 2.28. Principe de la stratégie.	69
Figure 2.29. Vision du processus général de la stratégie.	70
Figure 3.1. Microstructures des éprouvettes Ti-6Al-4V: (a) forgées à 640°C, (b) forgées à 950°C puis refroidi à l'air et recuit à 700°C, (c) obtenues en EBM, (d) en DMD (Herzog et al., 2016) et (e) en SLM (Murr et al., 2009a).	75
Figure 3.2. Diagramme de phase pseudo-binaire de l'alliage Ti-6Al-4V (Suard, 2015).	76

Figure 3.3. Microstructures d'une pièce en Ti-6Al-4V obtenue en SLM : (a) dans la direction de construction (Z), et (b) dans le plan perpendiculaire à la direction de construction (Herzog et al., 2016).	77
Figure 3.4. La réparation des aubes de turbine en Ti-6Al-4V en DMD : l'aube réparée (à gauche), la macro de la section (au milieu) et les microstructures dans les trois zones (à droite) : la zone réparée en haut, la HAZ au milieu et la microstructure d'origine de l'aube en bas (Dutta and Froes, 2015).	80
Figure 3.5. Eprouvettes pour (a) l'observation des microstructures et (b) pour l'essai de traction.	82
Figure 3.6. Expérience pour déterminer l'évolution de la température de la surface au-dessus de la plaque pendant le préchauffage : (a) la plaque de titane avec la sonde thermique placée sur la table de fabrication de la machine, (b) l'évolution de la température mesurée par la sonde thermique.	83
Figure 3.7. Processus de fabrication des échantillons : (1) chauffage de la plaque et (2) construction des entités.....	83
Figure 3.8. Echantillon pour observer les microstructures et pour mesurer la dureté : (a) opérations de coupe, de polissage et d'attaque chimique ; (b) trois zones pour observer les microstructures et la dureté.....	84
Figure 3.9. Installation de l'échantillon sur la machine de traction et l'essai de traction : (a) l'échantillon de traction, (b) serrage de l'échantillon sur la table de la machine à l'aide de bride, (c) installation sur la machine de traction, et (d) la rupture de l'échantillon.....	85
Figure 3.10. Microstructures de la plaque de titane initiale (a) et dans la zone de plaque sur laquelle les entités sont construites (b) : Microstructure duplex (α lamellaire intégrée dans une matrice de grains β et les grains β sont entourés par des grains α équiaxes).	86
Figure 3.11. Microstructures dans la zone construite par EBM : (a) grains β colonnaires délimités par des grains α , (b) microstructures à l'intérieur des grains β colonnaires (structures $\alpha + \beta$).	87
Figure 3.12. Microstructure dans la zone (HAZ): (a) grossissement à 100 μm ; (b) la structure lamellaire de la phase α dans les grains <i>prior</i> β en colonne près de la zone construite par EBM, zone limite (1); et (c) la microstructure duplex près de la zone de la plaque, zone (2).....	87
Figure 3.13. Apparence et volume efficace d'un cylindre construit par EBM : (a) la reconstruction tomographique du cylindre de 1 mm avec les paramètres de la surface inscrite et circonscrite; (b) la reconstruction du cylindre inscrit (rouge) à l'intérieur du cylindre réel (vert) (Suard et al., 2014).	89
Figure 3.14. Le modèle CAO pour la simulation de l'essai de traction.	90

Figure 3.15. Le modèle du maillage (a) et les contraintes normales obtenues par la simulation (b).....	91
Figure 4.1. Les étapes principales de la conception de gammes de fabrication.	94
Figure 4.2. La procédure pour extraire les entités d'usinage et les entités de fabrication additive.	96
Figure 4.3. La prise en compte des contraintes (1), (2) et (3) dans la conception de gammes de fabrication.	99
Figure 4.4. Impact de la contrainte utilisation efficace de matière sur l'identification des entités.	100
Figure 4.5. Exemple illustrant la règle 4.	103
Figure 4.6. Exemples illustrant la règle 5.	104
Figure 4.7. Exemple illustrant les règles 6 et 7.	105
Figure 4.8. Les pièces utilisées dans le cas d'étude : (a) la pièce existante, (b) la pièce finale, et (c) la vue de dessus de la partie finale et certaines dimensions importantes discutées dans le cas d'étude.....	107
Figure 4.9. Illustration de l'étape A01-1 (a), de l'étape A01-2 (b), et de l'étape A01-3 (c)..	108
Figure 4.10. Illustration de l'étape A01-4 (a), et de l'étape A01-5 (b).	109
Figure 4.11. Les entités extraites (a) et leurs relations (b).	110
Figure 4.12. La séquence des processus de fabrication.	112
Figure 5.1. Le contour de l'étude d'analyse d'impacts environnementaux : (a) la stratégie soutenable et (b) la stratégie conventionnelle.	117
Figure 5.2. Evolution de la température de la surface au-dessous de la plaque de construction.	121
Figure 5.3. Mesure de la consommation de l'énergie électrique: (a) l'appareil pour mesurer l'énergie consommée ; (b) le branchement des câbles de l'appareil ; et (c) la machine EBM.	123
Figure 5.4. Préchauffage de la partie commune, la plaque et la poudre remplie autour de la partie commune.....	123
Figure 5.5. Consommation d'énergie dans les phases de fusion (a) et de refroidissement (b) en fonction de la hauteur totale de fabrication.....	125
Figure 5.6. Illustration de la profondeur axiale (ap) et de la profondeur radiale (ae) de coupe dans les opérations de fraisage.....	126
Figure 5.7. Contribution des éléments de l'inventaire sur les impacts environnementaux dans le cas $Mc = 0.6$ kg ; $K = 5$, d'après la méthode CML 2 Baseline 2000 : (a) la stratégie soutenable et (b) la stratégie conventionnelle.	130

Figure 5.8. Evolution de R en fonction de Mc et K dans le cas $Mf = 1.2$ kg, d'après (a) quatre indicateurs provenant de la méthode CExD, (b) six indicateurs provenant de la méthode CML 2 Baseline 2000, et (c) l'évolution de R en fonction de K pour $Mc = \{0.4 ; 0.6 ; \text{et } 0.8\}$ d'après l'indicateur (10).	131
Figure 5.9. Impacts environnementaux de la stratégie soutenable (en verte) et de la stratégie conventionnelle (en rouge) dans le cas $Mc = 0.8$ (kg) et $K = 7$	132
Figure 5.10. Evolution de R en fonction de Hf dans le cas $Mc = 0.8$ (kg) ; $Mf = 1.6$ (kg) ; $K = 7$, d'après dix indicateurs choisis.	133

Liste des tableaux

Tableau 2.1. Données de machines SLM de cinq constructeurs du marché (Rias et al., 2014).	38
Tableau 2.2. Les modèles du SEC pour certaines machines-outils (Kara and Li, 2011).	63
Tableau 3.1. Les propriétés mécaniques (issues d'essais de traction) du titane en fonction de la microstructure générées par les procédés additifs métallique (Herzog et al., 2016).	78
Tableau 3.2. Compositions chimiques de l'alliage Ti-6Al-4V d'après la spécification ASTM F1472.	81
Tableau 3.3. Micro-dureté (HV) de l'échantillon.	88
Tableau 4.1. Exemple de règle pour définir une séquence des opérations pour chaque entité d'usinage.	102
Tableau 4.2. Définition d'un processus de fabrication pour chaque entité.	111
Tableau 5.1. Paramètres utilisés pour calculer la consommation de l'énergie et des ressources.	119
Tableau 5.2. Consommations d'énergie et des ressources dans le processus du recyclage du titane et de production de poudre de titane (Paris et al., 2016).	120
Tableau 5.3. Consommation de l'énergie mesurée dans les trois cas de fabrication.	124
Tableau 5.4. Paramètres de coupe pour les opérations d'ébauche, de demi-finition et de finition.	127
Tableau 5.5. Deux scénarios pour comparer la performance environnementale entre les deux stratégies.	128

Glossaire

ACV Analyse du Cycle de Vie (ou **LCA** – *Life Cycle Assessment*) : c'est un moyen systémique d'évaluation des impacts environnementaux globaux d'un produit, d'un service, d'une entreprise ou d'un procédé.

ALM *Additive Layer Manufacturing* : la fabrication additive par couches, le principe de fabrication de la plupart des procédés additifs (LBM, EBM, SLS, etc.).

AM *Additive Manufacturing* : la fabrication additive.

AMF *Additive Manufacturing Feature* : l'entité de fabrication additive.

CAO Conception Assistée par Ordinateur.

CAPP *Computer-Aided Process Planning* : c'est un lien entre le module CAO et FAO. Il permet de générer la planification de processus de fabrication de manière quasi-automatique. La planification des processus de fabrication concerne la détermination de séquences d'opérations de fabrication pour produire une pièce ou un produit.

CNC *Computer Numerical Control* : l'automatisation de machines-outils par les ordinateurs pour exécuter les séquences préprogrammées des commandes pour les machines-outils.

DED *Directed Energy Deposition* : c'est une famille de procédés de fusion par dépôt direct de matière sous flux d'énergie, par exemple les procédés DMD et CLAD.

DMD *Direct Metal Deposition* et **CLAD** - Conception Laser Additive Directe : le procédé de fabrication additive métallique par projection de particules de poudre en fusion.

DMLS *Direct Metal Laser Sintering* : le procédé de fabrication additive métallique par couches qui lie les particules par fusion partielle à l'aide d'une source laser.

EBM *Electron Beam Melting* : le procédé de fabrication additive métallique par couches qui lie les particules par fusion à l'aide d'un faisceau d'électrons.

EoL *End of Life* : la fin de vie d'un produit ou d'un composant.

FAO Fabrication Assistée par Ordinateur : les outils numériques d'aide à la préparation de la fabrication numérique. Ils permettent de générer les programmes qui décrivent les trajectoires pour les commandes numériques des machines de production. Ces outils permettent, en outre, d'effectuer des simulations de la fabrication.

FDM *Fused Deposition Modeling* (ou **FFF** - *fused filament fabrication*) : le procédé de fabrication additive par dépôt d'un fil fondu, généralement un plastique PLA ou ABS, à l'aide d'une résistance électrique.

LBM *Laser Beam Melting* (ou **SLM** - *Selective Laser Melting*) : le procédé de fabrication additive métallique par couches qui lie les particules par fusion à l'aide d'une source laser.

MF *Machining Feature* : l'entité d'usinage.

PBF *Powder Bed Fusion* : c'est une famille de procédés de fusion sur lit de poudre par un faisceau de laser ou d'électrons, tels que EBM, SLM et SLS.

SEC *Specific Energy Consumption* : la consommation spécifique d'énergie d'une machine-outil pour enlever 1 cm³ du matériau, kJ/cm³.

SLS *Selective Laser Sintering* : le procédé de fabrication additive par couches qui lie les particules par consolidation locale de polymères, ou d'autres matériaux enrobés d'un liant polymère.

Résumé en français

Actuellement, les matériaux collectés à partir de produits en fin de vie sont recyclés en matière première pour être réutilisée dans un nouveau cycle de production. Cependant, la consommation énergétique des filières de recyclage reste importante. Le processus du recyclage fait aussi perdre la valeur ajoutée et l'énergie utilisée durant la fabrication de pièces originales. Aujourd'hui, les techniques de fabrication additive sont suffisamment performantes et permettent une fabrication de produits avec un matériau compatible avec l'usage. La prise en compte des performances de ces nouvelles techniques dans une stratégie soutenable peut ouvrir des pistes pour modifier les pièces et les réutiliser directement sans retourner au niveau de matière première. ***Cette thèse a pour objectif de développer une stratégie soutenable, qui permet de donner une nouvelle vie à une pièce en fin de vie (ou une pièce existante) en la transformant directement en une nouvelle pièce destinée à un autre produit.*** Afin de développer une telle stratégie, les travaux menés de la thèse visent à lever les verrous scientifiques suivants :

Le premier verrou scientifique est lié à la faisabilité technologique : ***Est-il possible de déposer de la matière sur une pièce existante en utilisant les techniques de fabrication additive pour obtenir la nouvelle pièce avec une bonne santé de matière ?*** Cette question a été résolue en réalisant une étude expérimentale sur l'observation de microstructures et de propriétés mécaniques des éprouvettes, qui sont fabriquées par ajout de nouvelles entités sur une pièce existante en EBM.

Le deuxième verrou scientifique est lié à l'étude de la chaîne complète de fabrication d'un point de vue technologique. ***Comment concevoir des gammes de fabrication en combinant intelligemment des opérations additives et soustractives pour obtenir la pièce attendue à partir de la pièce existante ?*** Une méthode de conception des gammes de fabrication combinant les procédés additifs et soustractifs a été proposée en s'appuyant sur le concept d'entités de fabrication additive et soustractive.

Le troisième verrou scientifique est lié à la soutenabilité et ***la stratégie proposée présente-t-elle des avantages par rapport à la stratégie conventionnelle en termes de soutenabilité ?*** Pour répondre à cette question, une approche s'appuyant sur la méthode d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) a été développée pour évaluer des impacts environnementaux. Des critères permettant de qualifier le domaine de la stratégie proposée vis-à-vis de la stratégie conventionnelle ont également été identifiés.

Mots clés : Fabrication additive ; Remanufacturing ; Gamme de fabrication ; Soutenabilité ; Analyse du cycle de vie ; Produit en fin de vie.

English summary

Currently, materials collected from end-of-life (EoL) products are recycled into raw materials for reusing in a new production cycle. However, energy consumptions of recycling sectors remain important. The added values and energy used in the manufacture of original parts are also lost during the material recycling process. Nowadays, additive manufacturing techniques are sufficiently efficient and allow the manufacture of products with a material compatible with the usage. Taking into account the performances of these techniques in a sustainable strategy can open the ways to modify parts and reuse them directly without returning to the raw material level. ***This thesis aims to develop a sustainable strategy, which allows giving a new life to an EoL part (or an existing part) by transforming it directly into a new part intended for another product.*** In order to develop such a strategy, the works released in the thesis aim to solve the following scientific issues:

The first scientific issue is related to the technological feasibility: ***Is it possible to deposit material on an existing part using additive manufacturing technologies to obtain the new part with good material health?*** This question is solved by carrying out an experimental study on the observation of microstructures and mechanical properties of the samples, which are manufactured by adding new features into an existing part in EBM.

The second scientific issue is related to the study of the complete manufacturing chain from a technological point of view. ***How to design the process planning for additive and subtractive manufacturing combination to manufacture the expected part from the existing part?*** A methodology to design the process planning for combining these manufacturing processes has been proposed based on the concept of additive manufacturing and machining features.

The third scientific issue is linked to the sustainability and ***does the proposed strategy have advantages in comparison to the conventional strategy in terms of sustainability?*** To deal with this issue, an approach based on the Life Cycle Assessment (LCA) method has been developed to assess environmental impacts. The criteria for qualifying the domain of the proposed strategy vis-à-vis the conventional strategy were also identified.

Keywords: Additive manufacturing; Remanufacturing; Process planning; Life cycle assessment; End-of-life product.

Chapitre 1 Contexte général de l'étude

1.0 Introduction

Ce premier chapitre présente le contexte général des travaux de thèse. Il s'agit de fournir aux lecteurs une vision du contexte scientifique dans lequel les travaux de thèse s'inscrivent.

Tout d'abord, le contexte actuel sur des produits en fin de vie, leurs impacts sur l'environnement, l'économie et la société, ainsi que les différentes stratégies pour leur récupération sont présentés. Ensuite, l'évolution des techniques de fabrication additive et leurs nouvelles capacités permettant la liberté de conception et de fabrication des produits, ainsi que le développement de nouvelles stratégies de récupération de produits/pièces en fin de vie sont présentées dans la deuxième partie. Puis, la troisième partie introduit la problématique et les questions de recherche concernant le développement d'une nouvelle stratégie permettant de donner une nouvelle vie à une pièce en fin de vie. Enfin, la dernière partie décrit le plan du manuscrit de la thèse.

1.1 Produits en fin de vie et différentes stratégies pour les récupérer

1.1.1 Produits en fin de vie et les enjeux associés

1.1.1.1 Produits en fin de vie. La fin de vie d'un produit est l'une des étapes principales dans son cycle de vie. Depuis l'extraction de matières jusqu'à la fin de vie, le produit traverse de nombreuses étapes telles que la fabrication, la distribution, et l'utilisation (Figure 1.1).

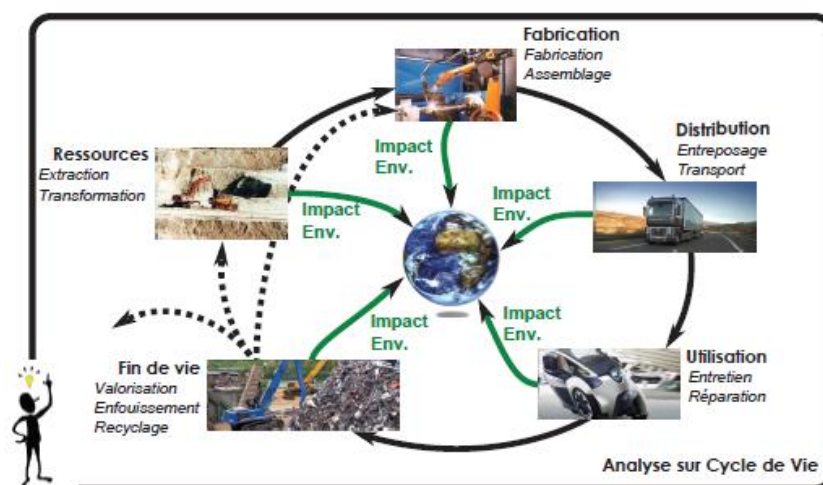


Figure 1.1. Cycle de vie de produits et des impacts environnementaux (Bourhis, 2014).

Dans la littérature, il existe de nombreuses définitions de produits en fin de vie. (Rose et al., 2002) définissent la fin de vie d'un produit à partir du moment où il ne satisfait plus les fonctions, qui sont attendues lors de sa première utilisation (par exemple, les fonctions d'usage ou les fonctions d'estime). (Kiritsis et al., 2003) définissent également le produit arrivant en fin de vie comme un produit retiré de l'environnement fonctionnel pour des raisons techniques, économiques, sociales et juridiques. Du point de vue technique, le produit atteint sa fin de vie quand il ne peut plus fonctionner correctement avec les services et les maintenances normales. Du point de vue économique, si la réparation d'un produit n'est plus rentable, ce produit arrive donc à sa fin de vie. En considérant l'aspect social, le produit est en fin de vie s'il est démodé.

En bref, un produit arrive à sa fin de vie s'il ne remplit plus ses fonctions d'origine ; ou s'il tombe en panne ; ou simplement le produit est démodé ou obsolète et les consommateurs ne l'utilisent plus.

1.1.1.2 Enjeux concernant les produits en fin de vie. Pourquoi l'état en fin de vie des produits devient-il un sujet très intéressant et intensif dans le secteur industriel ? La réponse à cette question peut être trouvée en analysant les raisons suivantes :

(1) Les impacts sur l'environnement. Durant le cycle de vie (Figure 1.1), tous les produits ont des impacts négatifs sur l'environnement. En effet, la production des produits conduit à un épuisement des ressources naturelles. De plus, dans les étapes d'élaboration des matières/matériaux et de fabrication des produits, une quantité énorme d'énergie est consommée et des pollutions dues aux rejets de substances dans l'eau, l'air et les sols sont générées. De même, les produits en fin de vie sont stockés ou enfouis dans les centres d'enfouissement, ce qui engendre des impacts importants sur l'environnement. D'après le rapport de (Friends of the Earth Europe, 2009), environs 31 millions de tonnes de déchets sont rejetés chaque année en France. Cela est équivalent à 15 millions de tonnes de CO₂ émis en l'environnement chaque année, soit 3% des émissions annuelles de la France. La fin de vie des produits est alors un problème majeur pour l'environnement (Jimenez et al., 2016).

(2) L'espace limité des centres d'enfouissement des déchets (landfill). Un autre problème est lié à l'espace disponible pour les centres d'enfouissement qui actuellement se remplissent rapidement. L'augmentation des produits en fin de vie et des déchets générés chaque année conduit à utiliser de nouveaux sites d'enfouissement. Cependant, l'expansion de ces sites est aujourd'hui limitée et dans l'avenir impossible (Kiritsis et al., 2003). De plus, ces sites causent également des problèmes de dangerosité qui peuvent influencer la vie et la santé des habitants.

(3) La perte de matières et l'épuisement des ressources naturelles. Comme nous l'avons vu précédemment, la fabrication des produits consomme des ressources naturelles, qui s'épuisent de plus en plus. Si les produits en fin de vie sont envoyés dans les centres d'enfouissement, les matières et les valeurs ajoutées, ainsi que l'énergie consommée durant le processus de fabrication sont perdues. D'après (AEA Technology, 1997), en Europe, la perte potentielle de ressources à partir de produits électriques et électroniques en fin de vie est estimée à 2.4 millions de tonnes de métaux ferreux ; 1.2 millions de tonnes de matières plastiques et 0.65 millions de tonnes de cuivre. De plus, le stockage, l'enfouissement ou l'incinération des produits en fin de vie représentent évidemment un coût très important.

(4) L'effet des législations sur les déchets. Face à ces problèmes, différentes législations et directives nationales et internationales sur les déchets sont imposées. Elles font pression sur les industriels afin qu'ils prennent en compte des contraintes environnementales de la phase de conception jusqu'à la phase de fin de vie des produits (Le Duigou et al., 2016). Par exemple, la législation concernant les véhicules hors d'usage (*End-of-Life Vehicle (ELV) Directive*) proposée par la Communauté Européenne est mise en vigueur depuis septembre 2000 (Gerrard and Kandlikar, 2007). Cette législation a pour objectif de récupérer les véhicules hors d'usage pour réduire les déchets sortant des véhicules en fin de vie. La directive 2000/53 CE, imposée en octobre 2000, définit des objectifs de recyclage et donne un ensemble d'informations permettant de mieux connaître la composition des véhicules et de faciliter les évolutions des futurs traitements (Directive, 2000).

Ces législations ont pour objectif de valoriser les produits en fin de vie. Il est donc temps de se concentrer sur des stratégies plus efficaces permettant une meilleure revalorisation des produits en fin de vie. De plus, le système de production doit être équilibré d'un point de vue économique et social, tout en diminuant ou stabilisant ses impacts environnementaux (Bashkite et al., 2014).

1.1.2 Stratégies existantes de récupération de produits en fin de vie

D'après (Gehin et al., 2009), il y a généralement trois stratégies possibles pour récupérer des produits/composants en fin de vie. Il s'agit du recyclage (*recycling*), de la réutilisation (*reuse*) et du remanufacturing, comme présentés sur la Figure 1.2.

1.1.2.1 Recyclage. Le recyclage est un processus industriel qui consiste à récupérer des matières premières à partir de déchets et de produits/composants en fin de vie. Le recyclage comporte une série d'activités où les matériaux mis au rebut sont collectés, séparés et recyclés en matières premières pour être utilisées dans la production de nouveaux produits (King et al., 2006; Paterson et al., 2017).

Depuis longtemps, les industriels et les chercheurs portent principalement leur attention sur le développement des produits en intégrant le recyclage des matériaux. Cependant, la consommation d'énergie des filières de recyclage reste très importante (King et al., 2006). En outre, le processus de recyclage fait perdre une grande partie de la valeur ajoutée et de l'énergie utilisée durant la fabrication des produits originaux (Gehin et al., 2008; Smith and Keolelian, 2004). Pour ces raisons, cette stratégie est moins performante du point de vue économique et environnemental par rapport aux autres options de fin de vie (la réutilisation et le remanufacturing).

Néanmoins, cette stratégie est souvent retenue pour le traitement de déchets et de produits en fin de vie. En effet, la plupart des déchets (par exemple les déchets plastiques et les déchets métalliques comme des copeaux en usinage, etc.) et des composants sont principalement recyclés (Jimenez et al., 2016).

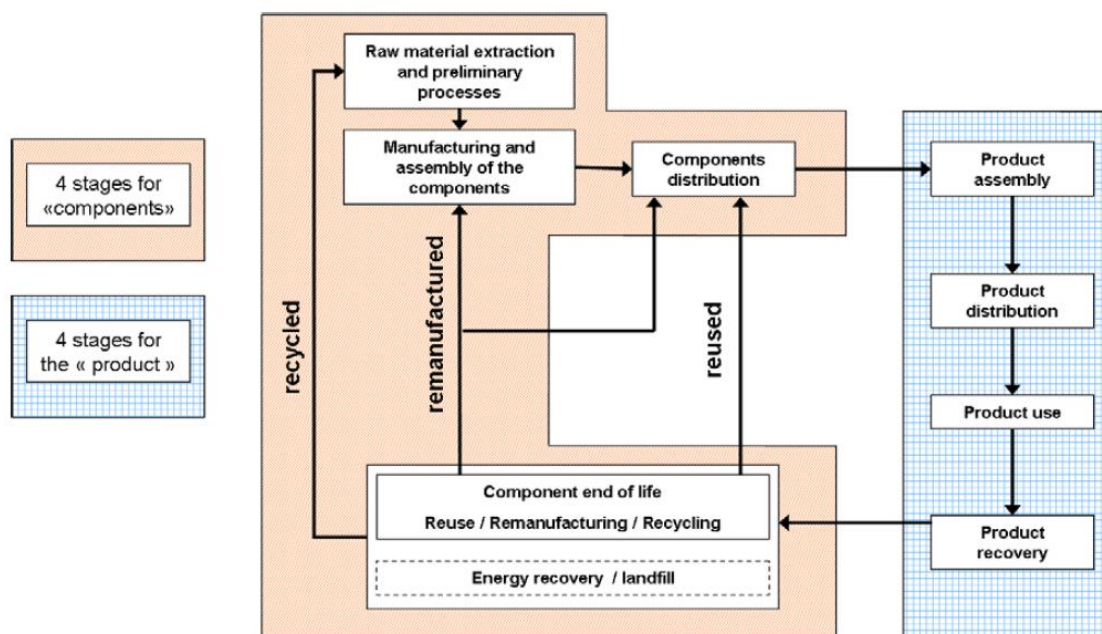


Figure 1.2. Cycle de vie de produits et les options en fin de vie (Gehin et al., 2009).

1.1.2.2 Réutilisation. Cette stratégie pour les produits/composants en fin de vie est la plus simple. La réutilisation consiste en la commercialisation d'un produit d'occasion pour s'en servir selon son concept original (Rose et al., 2002). En effet, cette stratégie est seulement valable dans le cas de produits usagés ayant des composants qui n'ont pas encore atteint leur fin de vie. Ils peuvent donc être réutilisés. Cependant, dans la plupart des cas il est impossible d'améliorer les composants avant une réutilisation (Amaya Rivas, 2012).

1.1.2.3 Remanufacturing. Le remanufacturing est aujourd'hui considéré comme une stratégie la plus pertinente pour prolonger la vie des produits (Gehin et al., 2008; King et al., 2006). Le remanufacturing est défini comme un processus industriel dans lequel les produits en

fin de vie sont restaurés pour atteindre des performances et garanties équivalentes ou supérieures aux produits neufs. Le processus de remanufacturing comporte généralement les étapes suivantes : le nettoyage, le désassemblage, l'inspection, la remise à neuf, et le réassemblage. Les composants ne pouvant pas être remis à neuf sont remplacés par de nouveaux composants. Un produit remanufacturé est donc une combinaison de nouvelles pièces et de pièces réutilisées (Gehin et al., 2008; Goepp et al., 2014; Lindahl et al., 2006; Östlin et al., 2009).

Globalement, le remanufacturing permet de prolonger la vie des produits. En gardant la forme des composants et la valeur ajoutée des produits durant le processus de remanufacturing, nous pouvons également diminuer l'extraction des matières premières. De plus, le remanufacturing permet de réduire les déchets et l'énergie consommée pendant le processus de fabrication. En conséquence, le coût des produits et les impacts environnementaux sont réduits (Bashkite et al., 2014; Gehin et al., 2008; Lopez Ontiveros, 2004).

1.2 Nouvelles opportunités offertes par la fabrication additive

1.2.1 Vision globale de techniques de fabrication additive

1.2.1.1 Evolution de la fabrication additive. Au cours des deux derniers siècles, les besoins et les attentes du marché en produits manufacturés ont évolué conduisant à changer le paradigme de leur fabrication progressivement d'une production artisanale (*craft production*) à une production de masse (*mass production*) (Figure 1.3).

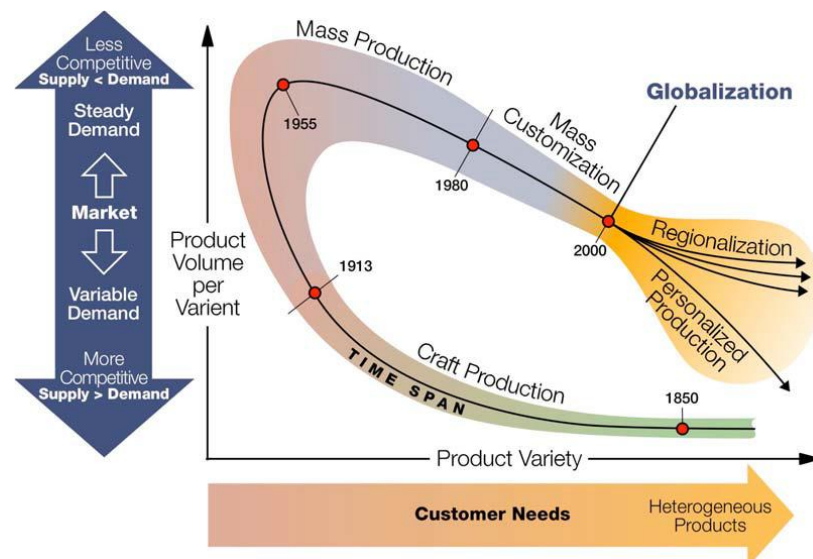


Figure 1.3. Evolution du paradigme de la fabrication (Koren, 2010).

Depuis les années 1980s, due au développement des outils informatiques et des moyens de communications, la personnalisation de masse (*mass customization*) a émergé et a évolué.

Par opposition à la production de masse, ce type de production répond au désir du client d'avoir exactement le produit dont il a besoin avec un coût et un délai raisonnable (Hu et al., 2011).

En parallèle avec la personnalisation de masse, les techniques de fabrication additive sont apparues et se développent. Elles permettent de fabriquer des pièces à géométrie complexe par ajout de matière couche par couche. De plus, les pièces produites par ces techniques peuvent répondre aux caractéristiques fonctionnelles attendues d'un produit final (Kruth et al., 1998; Thompson et al., 2016). La fabrication additive semble répondre à la personnalisation de masse, et plus encore à la production personnalisée (*personalized production*). Elle est considérée comme une troisième révolution industrielle.

La Figure 1.4 présente l'évolution des ventes de machines industrielles de fabrication additive dans les dernières années. Nous remarquons que les ventes ont tendance à augmenter de façon exponentielle ce qui tend à montrer l'intérêt grandissant des industriels pour la fabrication additive. En 2015, 280000 machines ont été vendues dans le monde. Les Etats-Unis sont les pionniers avec 38% de machines installées, suivis par le Japon (9.7%), l'Allemagne (9.4%), la Chine (8.7%) et la France (3.3%) (Wohlers, 2014).

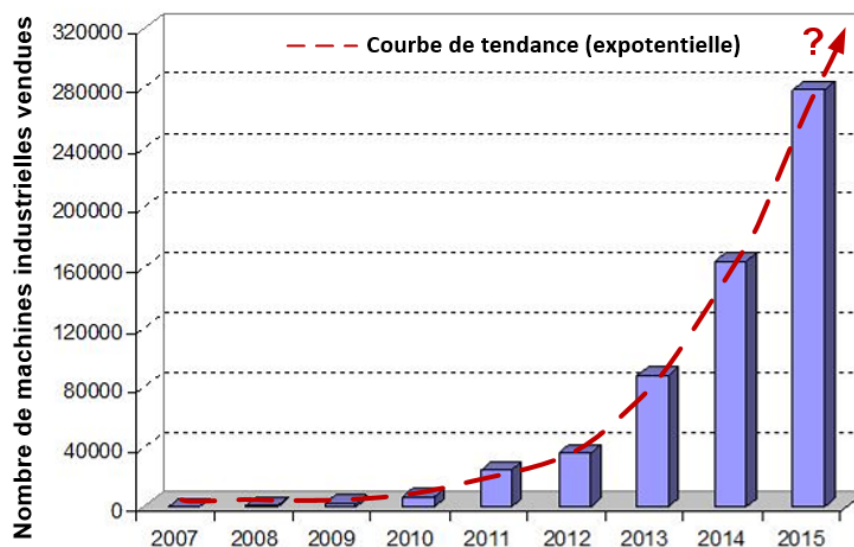


Figure 1.4. Evolution du nombre de machines industrielles de fabrication additive vendues (Source : Wohlers Report 2016).

La Figure 1.5 montre le nombre de publications (articles scientifiques) dans le domaine de la fabrication. Le nombre d'articles publiés sur la fabrication additive augmente très rapidement par rapport aux autres secteurs de la fabrication entre les années 2012 et 2015. Cela signifie que les chercheurs portent également une attention significative sur ces technologies.

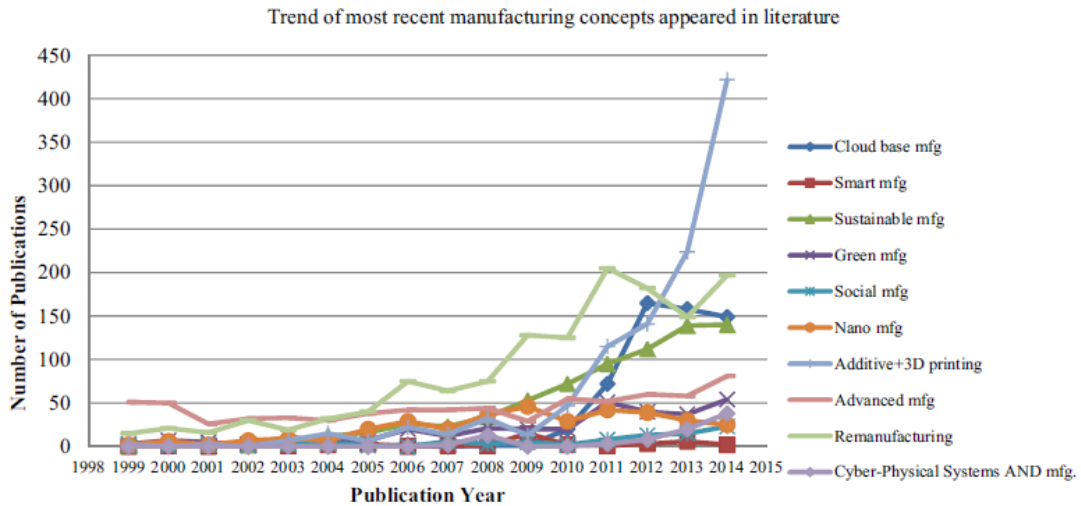


Figure 1.5. Nombre de publications dans le domaine de la fabrication jusqu'à 2015 (Esmaeilian et al., 2016).

1.2.1.2 Classification des techniques de fabrication additive. Aujourd'hui, de nombreuses techniques de fabrication additive offrent la possibilité de fabriquer des pièces avec différents types de matériaux, comme les polymères, les métaux, les céramiques et les composites. Ces techniques peuvent être classées selon la nature des matériaux utilisés, ou suivant l'état du matériau initial - liquide, solide en forme de feuilles, de fils ou de poudre (Guo and Leu, 2013; Vayre et al., 2012a).

L'ASTM International¹ a classé ces techniques en sept catégories : l'extrusion du matériau (*Material Extrusion*), la fusion sur lit de poudre (*Powder Bed Fusion, PBF*) et la fusion par dépôt direct de matière sous flux d'énergie (*Directed Energy Deposition, DED*) etc. (Table 1.1) (ASTM, 2010). Généralement, il y a deux principes technologiques qui sont mises en œuvre : la fabrication par couches (*Additive Layer Manufacturing, ALM*) et la fabrication par dépôt direct (*Direct Material Deposition, DMD*).

En ce qui concerne la fabrication des pièces métalliques, les deux types de procédés de fabrication additive, c'est-à-dire *PBF* et *DED*, sont largement utilisées dans les secteurs industriels et académiques.

1.2.1.3 Applications. La Figure 1.6 introduit la proportion en 2014 des applications de la fabrication additive dans l'industrie (Wohlers, 2014). Aujourd'hui, ces techniques sont notamment utilisées pour trois types d'applications :

- Le prototypage au sens large ;
- La fabrication des outillages ;
- La fabrication des pièces mécaniques fonctionnelles.

¹ ASTM International est un organisme de normalisation, fondé en 1898 aux États-Unis, qui rédige et produit des normes techniques concernant les matériaux, les produits, les systèmes et les services.

Table 1.1. Classification de techniques de fabrication additive (Gao et al., 2015).

CATEGORIES	TECHNOLOGIES	PRINTED “INK”	POWER SOURCE	STRENGTHS / DOWNSIDES
Material Extrusion	Fused Deposition Modeling (FDM)	Thermoplastics, Ceramic slurries, Metal pastes	Thermal Energy	• Inexpensive extrusion machine • Multi-material printing • Limited part resolution • Poor surface finish
	Contour Crafting			
Powder Bed Fusion	Selective Laser Sintering (SLS)	Polyamides /Polymer	High-powered Laser Beam	• High Accuracy and Details • Fully dense parts • High specific strength & stiffness • Powder handling & recycling • Support and anchor structure • Fully dense parts • High specific strength and stiffness
	Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	Atomized metal powder (17-4 PH stainless steel, cobalt chromium, titanium Ti6Al-4V), ceramic powder,		
	Selective Laser Melting (SLM)			
	Electron Beam Melting (EBM)		Electron Beam	
Vat Photopolymerization	Stereolithography (SLA)	Photopolymer, Ceramics (alumina, zirconia, PZT)	Ultraviolet Laser	• High building speed • Good part resolution • Overcuring, scanned line shape • High cost for supplies and materials
Material Jetting	Polyjet / Inkjet Printing	Photopolymer, Wax	Thermal Energy / Photocuring	• Multi-material printing • High surface finish • Low-strength material
Binder Jetting	Indirect Inkjet Printing (Binder 3DP)	Polymer Powder (Plaster, Resin), Ceramic powder, Metal powder	Thermal Energy	• Full-color objects printing • Require infiltration during post-processing • Wide material selection • High porosites on finished parts
Sheet Lamination	Laminated Object Manufacturing (LOM)	Plastic Film, Metallic Sheet, Ceramic Tape	Laser Beam	• High surface finish • Low material, machine, process cost • Decubing issues
Directed Energy Deposition	Laser Engineered Net Shaping (LENS) Electronic Beam Welding (EBW)	Melted powder and metal wire	Laser Beam	• Repair of damaged / worn parts • Functionally graded material printing • Require post-processing machine

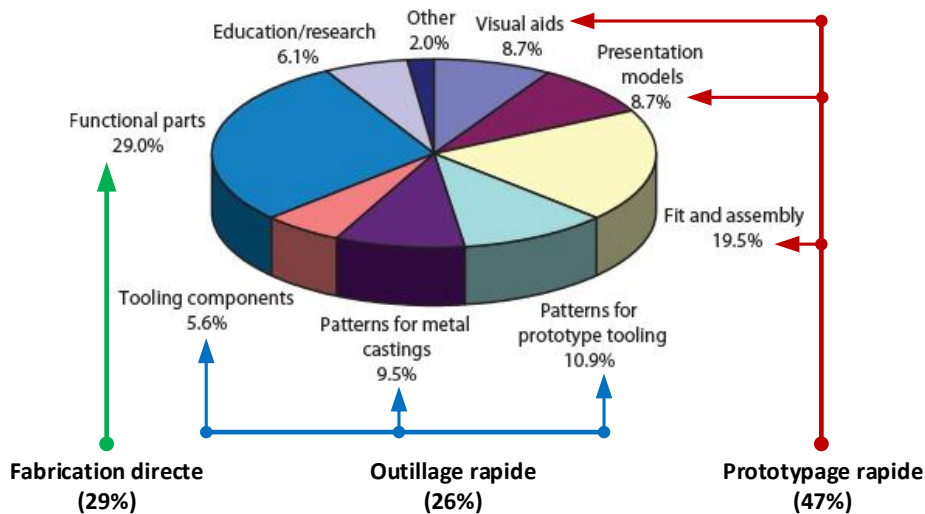


Figure 1.6. Applications de techniques de fabrication additive (en %) dans les différents domaines de la fabrication (Wohlers, 2014).

Le prototypage rapide est encore la principale application de la fabrication additive (environ 47%). Tandis que la fabrication d'outillages et la fabrication directe (c'est-à-dire la fabrication de pièces mécaniques fonctionnelles) représentent des pourcentages de 26% et de 29% respectivement (Figure 1.6). En effet, la fabrication directe est au début de son développement, notamment dans les secteurs aéronautique, automobile et médical (Guo and Leu, 2013). Les industriels ou les chercheurs utilisent ces techniques pour fabriquer des pièces

en petite série ayant des formes complexes ou des pièces personnalisées. Cependant, avec l'investissement fort des secteurs industriels et académiques, ainsi que le développement récent de nouvelles techniques de fabrication additive métallique, ce type d'applications va croître rapidement.

1.2.2 Capacités associées aux technologies de fabrication additive

En comparaison avec les techniques de fabrication traditionnelle, telles que l'usinage, la fonderie et la forge, les techniques de fabrication additive offrent de nombreuses nouvelles opportunités.

1.2.2.1 Nouvelles capacités pour la reconception (redesign) de pièces/produits. Grâce à la méthode de fabrication par ajout de matière couche par couche, ces techniques offrent une capacité de fabriquer des pièces avec des caractéristiques difficiles, voire impossibles à réaliser avec un procédé de fabrication classique. De plus, la fabrication additive limite l'usage de ressources supplémentaires, telles que les outils de coupe, le système de posage et de bridage et le fluide de refroidissement. Les formes peuvent être très complexes incluant des structures internes, ou utilisant de multi matériaux. Ces nouvelles capacités permettent la conception des produits/pièces mécaniques d'un point de vue fonctionnel, économique et environnemental (Huang et al., 2016, 2013).

En utilisant la méthode d'optimisation topologique, la géométrie d'un produit peut être optimisée pour répondre à un cahier des charges données (Thompson et al., 2016; Vayre et al., 2012b). Cela permet de réduire la masse des pièces et d'obtenir des pièces plus légères. En conséquence, nous pouvons réduire la quantité de matière et l'énergie consommées durant le processus de fabrication. D'après (Gebler et al., 2014), due à la conception et fabrication des pièces légères, nous pourrions réduire la consommation d'énergie et économiser ainsi entre 113 et 370 milliard de dollars en 2025.

La Figure 1.7a montre un exemple d'optimisation géométrique de charnière de frein de l'Airbus A320 (Tomlin and Meyer, 2011). Dans ce cas, la masse de pièce est réduite de 918 g à 326 g (une réduction de 64%) et la pièce optimisée répond au même cahier des charges que la pièce initiale. Il est également possible d'intégrer des structures spécifiques telles que des treillis et des structures architecturées (Figure 1.7b). L'intégration de ces nouvelles structures permet d'améliorer les attributs des pièces à fabriquer, comme la résistance élevée, la rigidité et l'efficacité énergétique (Guo and Leu, 2013). Par exemple, la résistance des pièces intégrant des mousses cellulaires ouvertes, fabriquées par EBM, peut être supérieure d'environ 40% par rapport aux pièces denses fabriquées par EBM (Murr et al., 2010).

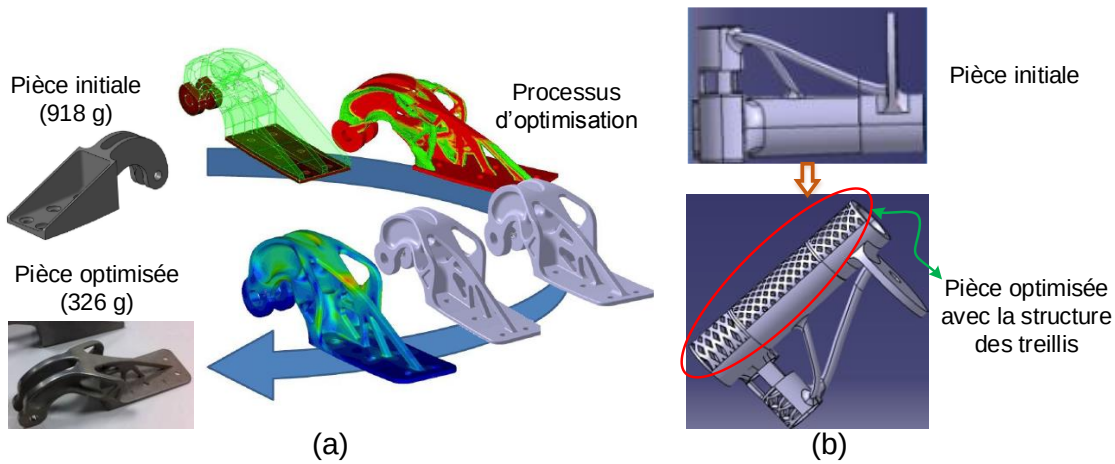


Figure 1.7. (a) Reconcepting de charnière de frein de l'Airbus A320 (Tomlin and Meyer, 2011) ; et (b) l'intégration des structures de treillis dans l'optimisation de pièce aéronautique (Vo et al., 2015).

La liberté de conception (*design freedom*) offerte par la fabrication additive permet également la reconception des produits. C'est-à-dire un produit assemblé par un ensemble de pièces de différents matériaux peut être remplacé par une pièce unique (Figure 1.8). Cela permet de réduire le coût et des erreurs générées pendant le processus d'assemblage des produits.

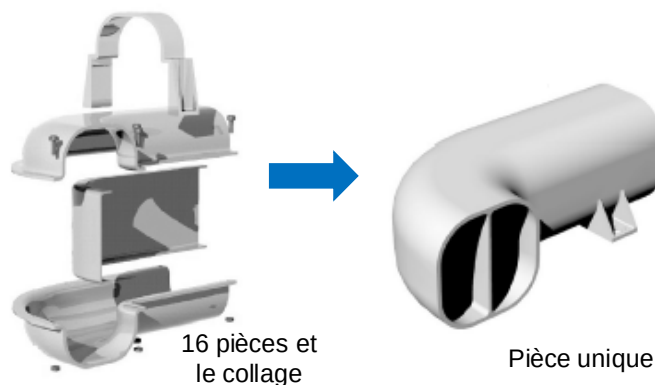


Figure 1.8. Reconcepting d'un conduit réduisant le nombre de composants de 15 à un seul (Hopkinson, 2006).

L'optimisation géométrique des pièces obtenue en fabrication additive est aujourd'hui appliquée largement dans les secteurs industriels et biomécaniques. Dans le secteur aéronautique, les pièces présentent généralement un ratio entre le volume du matériau brut et la pièce finale très élevé, souvent compris entre 4:1 et 20:1. L'utilisation des techniques de fabrication additive pour fabriquer ces pièces réduit donc les déchets (copeaux) par rapport à l'utilisation d'un centre d'usinage 5-axes (Huang et al., 2016).

1.2.2.2 Capacités pour prolonger la durée de vie des produits/composants.

Aujourd'hui, les techniques de fabrication additive offrent aussi des possibilités de détourner des produits/pièces en fin de vie vers de nouvelles applications.

Les approches se basant sur ces techniques, telles que la réparation, le remanufacturing et la remise à neuf, permettent de prolonger la durée de vie des produits/pièces. Dans ce

contexte, les techniques de fusion par dépôt direct de matière sous le flux d'énergie (DMD et CLAD – Construction Laser Additive Deposition) sont largement utilisées pour le remanufacturing et la réparation des composants de hautes valeurs (par exemple des turbines et des moules) (Chen et al., 2014; Wilson et al., 2014). Ces techniques permettent également d'ajouter de nouvelles fonctionnalités sur les pièces existantes. Grâce à ces techniques, les pièces de rechange sont fabriquées rapidement pour être utilisées dans la stratégie de remanufacturing ou la réparation (Ford et al., 2015).

Aujourd'hui, la technologie hybride (*hybrid technology*) combinant des procédés de fabrication additive et soustractive est aussi une nouvelle perspective pour prolonger la durée de vie des produits ou donner une nouvelle vie aux produits (Flynn et al., 2016). Elle offre la capacité de remanufacturer ou de réparer les composants de manière entièrement automatisée, comme illustrée sur la Figure 1.9.



Figure 1.9. Système hybride *Lasertec 65 3D* développé par *DMG MORI*².

1.2.2.3 Efficacité environnementale. Nous avons vu que des matières premières sont utilisées efficacement via la fabrication additive car les pièces sont construites couche par couche. La quantité de matière consommée est proche du volume de la pièce finale.

Grâce à son principe de fabrication et sa liberté de conception, la quantité de matériau utilisé, ainsi que l'énergie sont minimisées (Chen et al., 2015; Gebler et al., 2014; Huang et al., 2016). Dans le cas des métaux, cette technique permet de réduire jusqu'à 60% les matières premières par rapport aux techniques soustractives. De plus, ces procédés additifs ne génèrent quasiment pas de déchets. Dans les procédés PBF, environ 95% à 98% de poudres métalliques non fondues peut être recyclées localement et réutilisée directement dans la production suivante (Petrovic et al., 2011).

² Source : <http://www.fabricatingandmetalworking.com/2016/02/hybrid-manufacturing-of-3d-aerospace-parts-to-finish-quality/> (accès le 28 février 2017)

En conséquence, les techniques de fabrication additive présente un potentiel significatif pour réduire les impacts environnementaux (Ford and Despeisse, 2016; Huang et al., 2013; Paris et al., 2016; Serres et al., 2011). D'après l'estimation de (Gebler et al., 2014), la fabrication additive permettra d'économiser d'ici 2025 de 2.54E18 à 9.30E18 (J) l'énergie consommée et de réduire de 130.5 à 525.5 (Mt) les émissions de CO₂.

De plus, les techniques de fabrication additive participent efficacement aux activités de récupérations de matières dans la phase de fin de vie de produits. Elles présentent de plus en plus un rôle important dans le système de production durable et dans une économie circulaire (Despeisse et al., 2016).

1.3 Possibilité de donner une nouvelle vie aux pièces en fin de vie

1.3.1 Problématique

Nous avons vu que le traitement des produits/pièces en fin de vie joue un rôle très important aujourd'hui. Sous l'effet des législations sur les déchets et la compétition des produits sur les aspects économiques et environnementaux, les industriels doivent chercher des stratégies efficaces pour traiter les produits/pièces en fin de vie. Dans ce cadre, le remanufacturing est considéré comme une option la plus pertinente par rapport à la stratégie de recyclage.

Cependant, la stratégie existante du remanufacturing de composants se limite elle-même car elle ne peut que redonner à une pièce en fin de vie son état original. Si nous souhaitons les transformer en nouvelles pièces avec de nouvelles fonctionnalités adaptées à un autre usage, les stratégies existantes ne sont pas efficaces. Récemment, grâce aux capacités et avantages offertes par les techniques de fabrication additive, les chercheurs et les industriels peuvent envisager de nouvelles stratégies.

La problématique de la thèse consiste donc à développer une stratégie soutenable permettant de donner une nouvelle vie à une pièce en fin de vie/une pièce existante, en prenant en compte les possibilités des techniques de fabrication additive et soustractive.

La nouvelle pièce obtenue par cette stratégie à partir de la pièce en fin de vie (ou la pièce existante) est destinée à un autre produit. Les fonctionnalités de la nouvelle pièce sont donc totalement différentes de celles de la pièce existante.

En outre, la stratégie attendue doit satisfaire les deux points suivants :

- (1) Elle doit conserver au maximum le volume de matière de la pièce existante ;
- (2) Elle doit aussi assurer la qualité de la pièce finale équivalente à une pièce neuve obtenue par les procédés conventionnels (par exemple, la fonderie, le forgeage et l'usinage).

1.3.2 Questions de recherche (QR)

Pour répondre à cette problématique les trois verrous scientifiques suivants se posent.

Le premier verrou concerne la possibilité technologique des techniques de fabrication additive de créer de nouvelles entités sur une base existante. Aujourd'hui, ces techniques comme EBM, SLM et DMD, permettent de déposer la matière sur un substrat existant. Cela signifie que nous pourrions obtenir une nouvelle pièce à partir d'une pièce existante sur laquelle les nouvelles entités sont ajoutées. Cependant, la santé de matière de la pièce obtenue doit être assurée et être équivalente à celle d'une pièce neuve obtenue par les procédés conventionnels. La première question de recherche est donc :

QR1 : Est-il possible de déposer de la matière sur une pièce existante en utilisant les techniques de fabrication additive pour obtenir la nouvelle pièce avec une bonne santé matière ?

Le deuxième verrou est lié à l'étude de la chaîne complète de fabrication d'un point de vue technologique. Considérant l'aspect technologique, un prétraitement est nécessaire et à définir pour mettre les pièces existantes/les pièces en fin de vie dans une bonne configuration pour créer de nouvelles pièces en ajoutant de la matière sur cette base via les techniques de fabrication additive. L'étape suivante consiste donc à concevoir une gamme de fabrication permettant d'atteindre la géométrie et la qualité désirées, en combinant les opérations additives, soustractives et d'inspection de manière intelligente. Pour répondre aux critères de qualité, un post-traitement est aussi à définir. Cependant, la conception de la gamme de fabrication pour la combinaison des opérations additives, soustractives et d'inspections est encore un nouveau problème à résoudre. Ce problème nous conduit à aborder la deuxième question de recherche :

QR2 : Comment concevoir des gammes de fabrication en combinant des opérations additives et soustractives pour obtenir la pièce attendue à partir de la pièce existante ?

Le troisième verrou scientifique est lié à la soutenabilité et la nouvelle stratégie présente-t-elle des avantages par rapport à la stratégie conventionnelle en termes de soutenabilité ? Pour répondre à cette question, les modèles et les méthodes d'évaluation des impacts environnementaux sont à définir. Ils permettent de comparer la performance de la nouvelle stratégie avec la stratégie conventionnelle d'un point de vue environnemental. La troisième question de recherche est donc:

QR3 : La stratégie présente-t-elle des avantages par rapport à la stratégie conventionnelle en termes d'impacts environnementaux ? Et quelles méthodes d'évaluation utiliser ?

1.4 Organisation du manuscrit

Cette thèse a pour objectif de développer la nouvelle stratégie permettant de transformer une pièce existante en une nouvelle pièce destinée à un autre produit, en utilisant les performances des techniques de fabrication additive et soustractive.

Afin de répondre aux questions de recherche précédemment identifiées, les travaux de la thèse ont été réalisés. Ils sont présentés dans les chapitres suivants.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude bibliographique sur les différentes techniques de fabrication additive métallique, la conception de gammes de fabrication, et aussi des outils pour évaluer des impacts environnementaux des produits et des processus de fabrication. Ce chapitre nous permet de mettre en avant la nécessité de développer la nouvelle stratégie, ainsi que d'acquérir des connaissances nécessaires pour la développer. A la fin du chapitre, une vision de la stratégie et la méthodologie mise en place, ainsi que le contour de l'étude de la thèse sont proposés.

Le troisième chapitre se concentre sur la première question de recherche. Dans ce chapitre, nous démontrerons la possibilité d'obtenir une nouvelle pièce à partir de la pièce existante avec une bonne santé de matière.

Le quatrième chapitre est consacré à répondre à la deuxième question de recherche. Les travaux représentés dans ce chapitre portent sur la méthode de conception de gammes de fabrication en combinant les procédés additifs et soustractifs. Notre méthode comporte deux étapes : l'extraction d'entités de fabrication et la conception de gammes de fabrication à partir des entités extraites, en utilisant des connaissances des techniques de fabrication, des ressources disponibles et des spécifications attendues de la pièce finale.

En ce qui concerne la troisième question de recherche, les travaux présentés dans le cinquième chapitre portent sur le développement d'une méthode qui permet d'évaluer la performance environnementale de processus de fabrication via la nouvelle stratégie.

Finalement, le sixième chapitre présente les conclusions de l'ensemble de ces travaux, ainsi que les perspectives.

Chapitre 2 Etude bibliographique

2.0 Introduction

Afin de résoudre la problématique et les questions de recherche posées dans le premier chapitre, l'étude bibliographique est d'abord effectuée dans le cadre du travail de la thèse. Cette étude nous permet d'acquérir des connaissances nécessaires sur les techniques de fabrication additive, des méthodes et des outils développées dans la littérature concernant les questions de recherche. A partir de cette étude, nous pourrions définir la méthodologie pour développer la stratégie attendue.

Dans la première partie du chapitre, les techniques de fabrication additive sont étudiées. Nous nous focaliserons particulièrement sur les procédés de fabrication additive métallique. Les principes de fabrication, les caractéristiques de ces procédés, ainsi que les matériaux disponibles utilisés dans ces procédés sont présentés.

Ensuite, nous allons expliquer, dans la deuxième partie, pourquoi les techniques de fabrication additive doivent être combinées avec les techniques conventionnelles telles que l'usinage. Nous introduirons aussi des applications de cette combinaison à travers des travaux existants dans la littérature.

La troisième partie vise à présenter des méthodes existantes concernant la conception de gammes de fabrication additive et soustractive. Cette étude nous permet d'identifier les pistes pour concevoir les gammes de fabrication combinant les procédés additifs et soustractifs.

Dans la quatrième partie, les approches d'analyse d'impacts environnementaux des produits et des processus de fabrication sont analysées.

Enfin, dans la cinquième partie et la sixième partie, nous ferons la synthèse de cette étude bibliographique et définirons les verrous scientifiques que nous allons lever dans cette thèse.

2.1 Procédés de fabrication additive métallique

Aujourd'hui, les procédés de fusion sur lit de poudre (*Powder Bed Fusion, PBF*) et les procédés de fusion par dépôt direct de matière sous flux d'énergie (*Directed Energy Deposition, DED*) sont les deux familles de fabrication additive métallique principalement utilisées dans les secteurs industriels et académiques (Figure 2.1).

Le premier procédé permettant la fabrication de pièces métalliques est le procédé de frittage laser (*Selective Laser Sintering, SLS*), qui a été développé à la fin des années 1980 (Guo and Leu, 2013; Kruth et al., 1998). Cette technologie ne permet pas d'obtenir des pièces métalliques denses. En effet, le procédé utilise un mélange de deux poudres dont l'une a un point de fusion beaucoup plus bas que l'autre. Durant la fabrication, sous l'effet d'un laser, le composant dont le point de fusion est plus faible fond et lie les grains de poudre du second composant. La pièce obtenue possède donc des caractéristiques mécaniques inférieures au matériau ayant le point de fusion le plus haut.

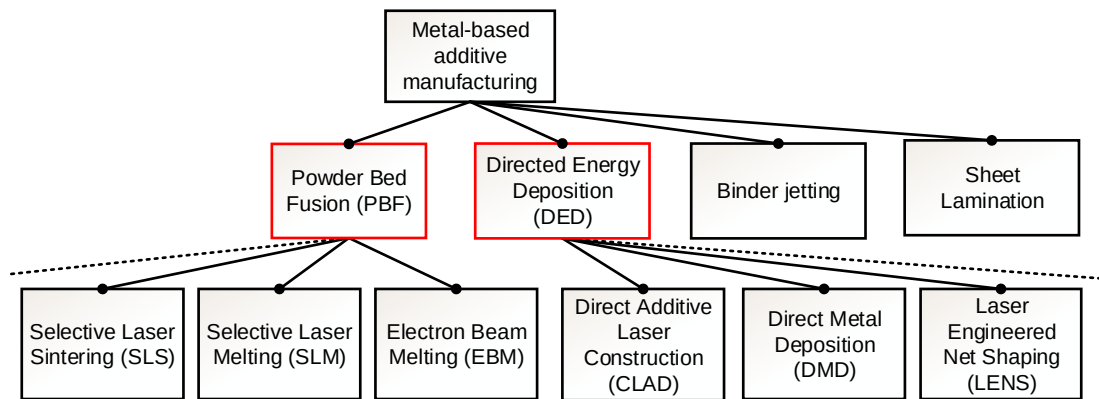


Figure 2.1. Classification des techniques de fabrication additive métallique.

De nombreuses techniques permettent aujourd'hui d'obtenir des pièces métalliques denses : par exemple, les procédés de fusion sur lit de poudre par faisceau laser (*Selective Laser Melting, SLM*) ou par faisceau d'électron (*Electron Beam Melting, EBM*), ou les techniques par projection ou par dépôt direct de matière sous le flux d'énergie (par exemple, les procédés *DMD* et *CLAD*) (Frazier, 2014; Guo and Leu, 2013; Herzog et al., 2016).

Dans le cadre de cette thèse, nous nous focaliserons sur ces procédés qui permettent l'obtention de pièces métalliques denses et utilisent des poudres métalliques comme matières premières.

2.1.1 Poudres métalliques

Les procédés PBF et DED permettent de fabriquer des pièces métalliques à partir de poudres métalliques en utilisant un faisceau laser ou d'électron comme source d'énergie pour fondre complètement la poudre. Nous obtenons alors des pièces métalliques denses et dites « bonne matière », c'est-à-dire les pièces fabriquées avec un matériau souhaité et des propriétés mécaniques nominales (Kruth et al., 2003).

De nombreux métaux et alliages sont aujourd'hui disponibles pour produire des poudres. La liste des alliages métalliques disponibles augmente d'année en année. Les pièces

métalliques peuvent être fabriquées en aciers (inoxydable ou non), en titane, en aluminium, en alliages à base de nickels (Inconels), de cobalt-chrome, etc.

Plusieurs techniques existent pour produire des poudres métalliques. Nous pouvons citer le procédé d'électrode rotative au plasma (*plasma rotating electrode process, PREP*), l'atomisation sous flux gazeux (*gas atomization, GA*), et l'atomisation par plasma (*plasma atomization*) (Khatim, 2011). Les caractéristiques de la poudre, telles que la morphologie, la taille des particules et la composition chimique dépendent nettement des techniques utilisées. Les caractéristiques de la poudre affectent également la qualité des pièces obtenues, telles que la microstructure, la rugosité et les propriétés mécaniques (Herzog et al., 2016).

Parmi les techniques permettant l'obtention de la poudre, le procédé d'atomisation sous flux gazeux est principalement utilisé (Yolton and Froes, 2015). La Figure 2.2a représente ce procédé. Le matériau est fondu dans un creuset. Ensuite, il s'écoule à travers une buse sous l'effet de la gravité. Le flux du matériau fondu est atomisé par un flux gazeux (argon). Le métal liquide est alors transformé en fines gouttelettes, qui vont se solidifier sous l'effet convectif du gaz inerte. Ce procédé permet l'obtention des particules de poudre quasi-sphériques dont la taille est généralement comprise entre 20 μm et 150 μm (Figure 2.2b).

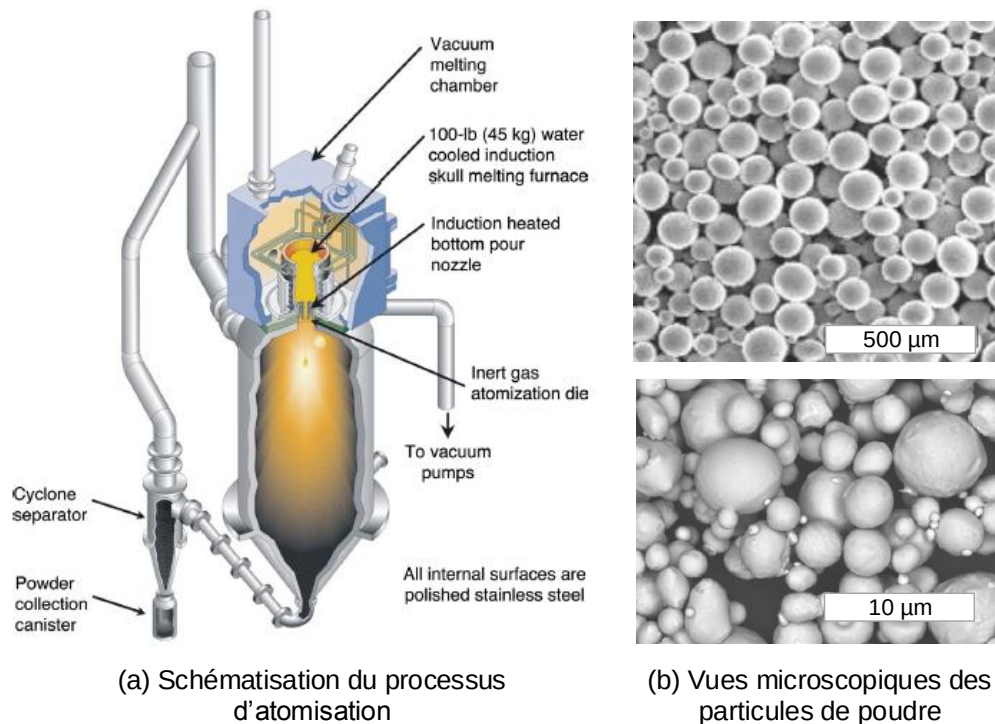


Figure 2.2. Obtention de poudres métalliques par atomisation (Yolton and Froes, 2015).

Plus la taille de la poudre est fine, plus l'état de surface de la pièce obtenue est bon. Cependant, l'utilisation des particules fines augmente considérablement les surfaces d'échange et cela peut présenter des risques d'inflammation ou d'explosion.

2.1.2 Procédés de fusion sur lit de poudre (PBF)

Les procédés de fusion sur lit de poudre, tels que SLM et EBM, utilisent un système mécanique pour créer une couche plane de poudre avec une épaisseur présélectionnée avant de la fusionner par un faisceau laser ou d'électrons. Une fois que la poudre est étalée, l'énergie du faisceau laser ou d'électrons fond sélectivement les particules sur une couche précédemment fondue. Chaque couche dans ces procédés est une tranche plane (2D) de la pièce 3D. La superposition de ces tranches constitue la pièce complète, qui repose dans la poudre. La pièce fabriquée est ensuite retirée et la poudre excédentaire est retirée afin d'obtenir la pièce finale.

2.1.2.1 Procédé SLM. Le volume de fabrication du procédé SLM varie selon les modèles de machine (Tableau 2.1). Le principe de fabrication du procédé SLM est représenté sur la Figure 2.3. La poudre nécessaire au cycle de fabrication est placée dans un réservoir d'approvisionnement à côté du plateau de fabrication. La poudre est étalée par un râteau avec une épaisseur comprise entre 20 μm et 200 μm (Rias et al., 2014). Le faisceau laser (YAG à fibre optique avec une puissance de 400 W à 1 kW) est orienté par des miroirs pour balayer sélectivement le lit de façon à fusionner des particules dans les zones définies par le fichier numérique (*.stl). La vitesse de balayage peut atteindre jusqu'à 15 m/s. La taille du point focal du faisceau laser varie entre 50 μm et 180 μm (Herzog et al., 2016).

Tableau 2.1. Données de machines SLM de cinq constructeurs du marché (Rias et al., 2014).

Machines	AM250 de Renishaw	M280 d'EOS	SLM 500 de SLM Solutions	Pro X400 de 3D Systems	XLine 1000R de Concept Laser
Epaisseur de couche (μm)	20 – 100	20 - 100	20 - 200	20 - 100	30 - 200
Dimensions de la chambre (mm)	250 x250x300	250x250x325	500x280x325	500x500x500	630x400x500

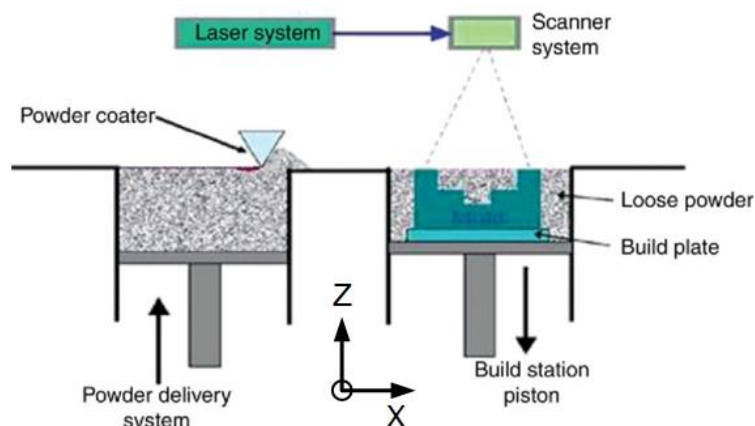


Figure 2.3. Principe de fabrication du procédé SLM (Dutta and Froes, 2015).

La température de fusion au point focal du laser est variable selon l'alliage métallique utilisé. En dépassant la température de fusion de la matière, la poudre est complètement fondue le long de contours de pièces et à l'intérieur du contour.

Une fois que la construction de la couche est finie, le piston de distribution de la poudre monte pour délivrer la poudre, tandis que le plateau de fabrication descend d'un pas équivalent à l'épaisseur de la couche. Les constructions des couches suivantes sont répétées jusqu'à la fin de la fabrication de la pièce. Le processus de fabrication des pièces se déroule dans une chambre sous atmosphère contrôlée (azote ou argon) en évitant l'oxydation voire l'inflammation des particules métalliques.

2.1.2.2 Procédé EBM. Le procédé EBM développé par la société Arcam³ est aussi un procédé de fabrication sur lit de poudre. La taille du volume de fabrication dépend du modèle de la machine. Aujourd'hui, il y a plus de sept modèles, qui sont actuellement commercialisés par Arcam.

- Les modèles présentant le volume de fabrication le plus faible sont S12, A1 et Q10. Ces modèles ont un volume de fabrication maximal de 200 mm x 200 mm x 190 mm ;
- Les modèles A2 et A2X permettent de réaliser de pièces plus grandes : 200 mm x 200 mm x 350 mm ;
- Et deux modèles A2XX et Q20 offrent des dimensions maximales avec un volume de fabrication cylindrique de 380 mm du diamètre et de 350 mm de la hauteur.

Dans le procédé EBM, un faisceau d'électrons est utilisé comme source d'énergie au lieu d'un faisceau du laser. La Figure 2.4a représente le schéma de la machine EBM. Le faisceau d'électrons est généré par un filament en Tungstène (pour les modèles S12, A1, A2, A2X et A2XX) ou par une cathode d'hexa-borure de Lantane LaB₆ (pour les modèle Q10 et Q20). Les électrons sont ensuite accélérés jusqu'à 60 keV par un champ électrique de 60 kV. La position, la focalisation et la forme du faisceau d'électrons sont contrôlées par un système de bobines électromagnétiques (une bobine de correction de l'astigmatisme, une bobine de focalisation et une bobine de déflexion). Le courant du faisceau d'électrons est compris entre 1 mA et 50 mA, correspondant à une puissance maximum de 3 kW.

³ <http://www.arcam.com/>

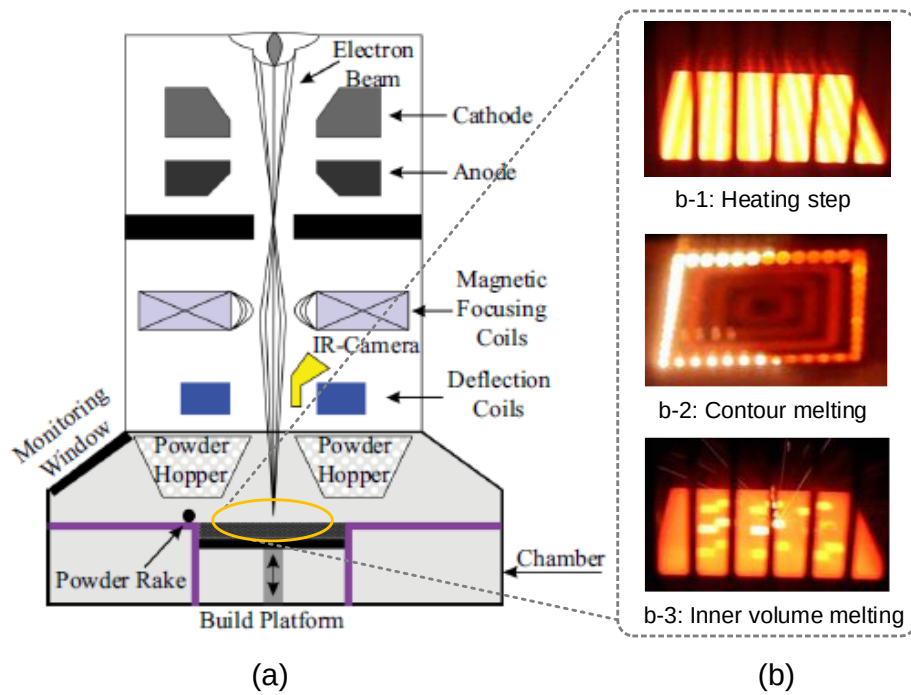


Figure 2.4. Procédé EBM : (a) Schéma d'un système EBM, et (b) les étapes de construction d'une couche (adapté à partir de (Körner, 2016; Smith et al., 2016)).

L'utilisation du faisceau d'électrons permet de varier la puissance et le diamètre du point focal. En outre, le pilotage du faisceau étant réalisé par des bobines au lieu des éléments mécaniques comme dans le procédé SLM, la vitesse de déplacement peut être très élevée (jusqu'à 8000 m/s).

La poudre est chargée dans deux conteneurs et étalée sur le plateau de fabrication grâce à un râteau. Ce râteau réalise plusieurs allers-retours, normalement 2 fois, afin de répandre une couche de poudre ayant une épaisseur constante. L'épaisseur de la couche de poudre est généralement choisie entre 50 μm et 150 μm .

Dans un premier temps, une plaque d'acier inoxydable est insérée sur le plateau de fabrication. Ensuite, le vide est effectué pour éviter les interactions entre les molécules de gaz et les électrons. Une pression environ 10^{-5} - 10^{-4} (mbar) dans la chambre de fabrication est nécessaire avant de mettre sous énergie le canon à électrons. La présence du vide permet de limiter la pollution de la poudre et de la pièce par des gaz comme l'oxygène et l'azote.

Après le vide secondaire, le lit de poudre est préchauffé par le faisceau d'électrons défocalisé, qui balaye plusieurs fois la surface du lit de poudre avec une vitesse de 10^4 mm/s pour consolider le lit de poudre (Figure 2.4b-1). La consolidation de la poudre, parfois considérée comme un pré-frittage, permet d'éviter les projections dues à la répulsion électrostatique des particules adjacentes de la poudre. La température de consolidation est proche de la moitié de la température de fusion (par exemple 750°C dans le cas de l'alliage Ti-6Al-4V), ce qui limite le gradient thermique dans le volume de fabrication et au sein de la pièce.

Ensuite, le faisceau d'électrons fond les zones composant la pièce. La vitesse de balayage et le courant du faisceau d'électron se réduisent à 10^2 mm/s et 5 mA – 10 mA, respectivement. Dans un premier temps, les contours sont fondus (Figure 2.4b-2) ; puis, les zones intérieures des contours sont balayées (Figure 2.4b-3). Après cette étape, la table de fabrication descend un pas équivalent à l'épaisseur de la couche et le cycle de fabrication recommence.

Lorsque toutes les couches sont fabriquées, le bloc de poudre consolidée contenant les pièces est refroidi à la température ambiante. Ce bloc est puis amené dans un système PRS (*Powder Recovery System*) pour déconsolider la poudre et récupérer les pièces fabriquées.

En utilisant le faisceau d'électrons comme source d'énergie, le procédé EBM présente certains avantages par rapport au procédé SLM. Le faisceau d'électrons étant contrôlé pas des bobines électromagnétiques, la vitesse de balayage est plus élevée par rapport à celle du faisceau laser dans le procédé SLM.

Cependant, l'utilisation du faisceau d'électrons nécessite de travailler sous vide, ce qui évite toute contamination du matériau. En outre, le procédé EBM est uniquement compatible avec des matériaux conducteurs.

2.1.3 Procédés de fusion par dépôt direct de matière sous flux d'énergie

2.1.3.1 Principe de fabrication. Cette famille de technologies (DMD et CLAD) utilise des machines-outils 3 axes ou 5 axes, ou des robots où une tête de dépôt de la poudre est ajoutée (Dutta et al., 2011). Le principe de fabrication de ces procédés consiste à amener de la poudre dans un bain de fusion local, qui est obtenu grâce à un laser de puissance, le tout étant sous atmosphère contrôlée (hélium ou argon) (Figure 2.5). Les pièces sont fabriquées en couches selon le déplacement de la tête.

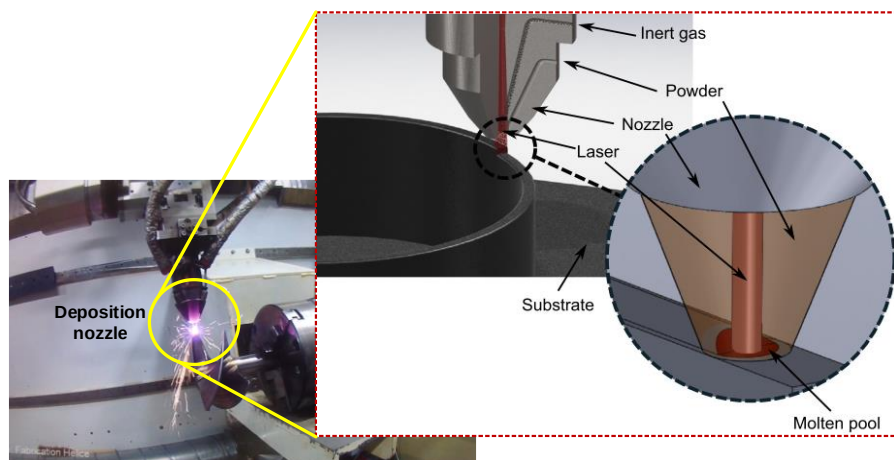


Figure 2.5. Principe de fabrication de procédés de fusion par dépôt direct de matière (Ponche, 2013).

Il existe trois types de projection (Ponche, 2013) : (i) la projection radiale - la poudre est projetée latéralement par une seule buse sur le rayon laser ; (ii) la projection coaxiale continue - la projection est conique et centrée sur le faisceau laser ; et (iii) la projection coaxiale discontinue - la poudre est projetée par trois ou quatre buses coaxialement autour du faisceau laser.

Grâce à une structure multiaxes la pièce est orientée au cours du processus de fabrication, ce qui permet de minimiser voir de supprimer les supports.

En comparaison avec les procédés de fusion sur lit de poudre (EBM et SLM), ces procédés offrent un taux de fabrication élevée et un grand volume de fabrication. D'après la synthèse (Herzog et al., 2016), le taux de fabrication peut atteindre jusqu'à 300 cm³/h avec une épaisseur de couche comprise entre 40 µm et 1000 µm. La taille du spot du faisceau laser varie entre 0.3 mm et 3 mm. La vitesse de balayage varie de 150 mm/min à 1500 mm/min.

Aujourd'hui, cette technologie possède un fort potentiel pour la fabrication directe, la réparation ou le remanufacturing des composants dans les domaines de l'aéronautique et du spatial.

2.1.4 Matériaux disponibles pour les procédés additifs métalliques

De nombreux métaux et alliages sont disponibles pour produire la poudre utilisée dans les procédés additifs. Dans cette partie, nous présenterons les matériaux principalement utilisés.

2.1.4.1 Acier. L'acier est le plus utilisé en ingénierie (Callister and Rethwisch, 2007). Il est évidemment aussi un matériau de grand intérêt pour la fabrication additive. Les aciers inoxydables austénitiques (AISI 316L/EN : 1.4404/X2CrNiMo17-12-2 and AISI 304L/EN : 1.4306/X2CrNi19-11) (Lima and Sankaré, 2014; Guan et al., 2013), l'acier maraging (Casalino et al., 2015) et les aciers martensitique (AISI 420/EN : 1.4034/X46Cr13) sont utilisés avec le procédé SLM (Krakhmalev et al., 2015).

Alors que, dans le procédé EBM, les aciers d'outillage (H11/EN : 1.2343/X37CrMoV5-1 et H13/EN : 1.2344/X40CrMoV5-1) ainsi que les aciers inoxydables austénitiques (316L) sont souvent utilisés (Guo and Leu, 2013; Körner, 2016).

Pour les procédés DED, les aciers d'outillage (H13) (Pinkerton and Li, 2005) et inoxydable austénitiques (Kakinuma et al., 2016; Wang et al., 2010) sont également appliqués.

2.1.4.2 Alliages d'aluminium. Les alliages d'aluminium disponibles pour la fabrication additive sont encore assez limités. Une raison est que l'aluminium est relativement facile à usiner et les coûts des pièces en aluminium sont comparativement faibles (Brice et al., 2015). Une autre raison est que nombreux alliages d'aluminium sont connus comme des matériaux difficilement soudables. Certains alliages, par exemple EN AW-7075, contiennent des

composants très volatils, tels que le zinc, conduisant à un bassin de fusion turbulent et à des porosités. Ils ne sont donc pas adaptés ou faciles à utiliser en fabrication additive (Herzog et al., 2016).

Les alliages d'aluminium les plus courants pour les procédés additifs sont l'alliage AlSi10Mg (EN AC-43000) et l'alliage eutectique AlSi12 (EN AC-44200) (Sing et al., 2015).

2.1.4.3 Titane et ses alliages. L'alliage de titane est un matériau utilisé dans les domaines aéronautiques et biomédicaux. Le titane et ses alliages possèdent d'excellentes propriétés mécaniques à hautes températures, telles que la densité et la résistance à corrosion (Karlsson et al., 2013). De plus, ils ont un ratio élevé de la résistance par rapport au poids. Aujourd'hui, l'alliage de Titane, Ti-6Al-4V, est le plus utilisé dans les secteurs industriels et académiques.

Cependant, le titane et ses alliages présentent aussi des inconvénients pour les procédés conventionnels. En raison d'une conductivité thermique relativement faible, ils sont souvent difficiles à usiner (Donachie, 2000). De plus, le titane est difficile à extraire, ce qui conduit à un prix relativement élevé. Les méthodes d'enlèvement de matière comme l'usinage, qui génèrent des copeaux durant le procédé de fabrication ne sont pas favorables (Campbell, 2011). Afin de réduire la quantité de copeaux en usinage, les procédés qui réalisent une forme proche de la pièce finale peuvent être appliqués (fonderie ou forge). Néanmoins, ces procédés rencontrent aussi des difficultés car le titane présente une réactivité élevée avec l'oxygène.

Les techniques de fabrication additive sont aujourd'hui efficaces pour fabriquer des pièces en titane. Les procédés SLM (H. Gong et al., 2014; Murr et al., 2009b; Thijs et al., 2010; Vilaro et al., 2011), et EBM (Li et al., 2014; Murr et al., 2009a; Parthasarathy et al., 2010; Rafi et al., 2013; Suard et al., 2015; Tan et al., 2015; Tong et al., 2016) et DED (Kelly and Kampe, 2004; Serres et al., 2011) sont appliqués avec succès pour fabriquer les pièces en Ti-6Al-4V.

D'autres alliages de titane sont utilisés en SLM, par exemple Ti-24Nb-4Zr-8Sn, Ti-6Al-7Nb pour les applications biomédicales (Chlebus et al., 2011; Zhang et al., 2011), et l'alliage Ti-6,5Al-3,5Mo-1,5Zr-0,3Si pour les applications spatiales (Liu et al., 2014; Ren et al., 2015).

2.1.4.4 Superalliages à base de Nickel. Ces alliages ayant une haute performance sont caractérisés par d'excellentes propriétés mécaniques, une haute résistance à la déformation par fluage, à la corrosion et à l'oxydation (Körner, 2016). Grâce à leurs propriétés, ces alliages sont principalement utilisés dans les centrales électriques ou les moteurs aérodynamiques (Joseph, 2000). En effet, les alliages à base de nickel se classent en alliages soudables et non soudables. Les alliages non soudables sont difficiles à traiter par les procédés additifs (EBM, SLM et DED). Dans le groupe d'alliages à base nickel soudables, l'Inconel 625 et l'Inconel 718 sont

principalement utilisés en EBM (Murr, 2015; Murr et al., 2013, 2011; Sochalski-Kolbus et al., 2015), SLM (Kunze et al., 2014; Nie et al., 2014; Yadroitsev et al., 2007) et DED (Kakinuma et al., 2016; Thompson et al., 2015).

2.1.4.5 Superalliages à base de Cobalt. Les alliages à base de cobalt possèdent une résistance élevée à la corrosion et une haute dureté. En ajoutant du carbone, des carbures à base de Co, W ou Mo au lieu de Cr sont créées, qui donnent à ces alliages une résistance élevée et une augmentation de la dureté. Ces alliages sont utilisés pour fabriquer des joints artificiels, des prothèses dentaires, des pièces de turbocompresseurs et des outils de coupe via les procédés SLM (Vandenbroucke and Kruth, 2007), et EBM (Körner, 2016; Murr et al., 2012) et DED (España et al., 2010).

2.1.5 Quels sont les facteurs importants pour la fabrication additive de pièces métalliques ?

2.1.5.1 Capacité de fabrication. Comme nous l'avons vu dans les parties précédentes, l'un des avantages des procédés PBF est de réaliser des pièces très complexes comportant des structures internes (Figure 2.6). Cependant, la fabrication doit commencer à partir d'une surface plane (horizontale) sur laquelle la première couche de poudre est déposée. Par conséquent, dans le cas de modification d'une pièce existante, cette pièce doit être usinée afin d'obtenir une surface plane. Elle doit aussi être mise en position correctement dans le repère de la machine. De plus, le volume de fabrication dans les procédés PBF est limité.

Contrairement aux procédés PBF, les procédés DED offrent un grand volume de fabrication. Ces procédés sont capables de déposer de la matière avec un taux très élevé (Shamsaei et al., 2015). Ils peuvent facilement déposer la matière sur une pièce existante et fabriquer des pièces multi matériaux. Ces procédés sont donc compatibles avec le rechargement, la réparation ou le remanufacturing des composants usés ou endommagés (Dutta and Froes, 2015). Néanmoins, ils trouvent leurs limites pour fabriquer des structures internes complexes (Herzog et al., 2016; Smith et al., 2016).

2.1.5.2 Qualités dimensionnelles et surfaciques. La surface générée par les procédés additifs métalliques présente souvent une forte rugosité. Cela s'explique par la fabrication par couches et par la présence de particules qui entourent la zone de fusion. Nous pouvons voir sur la Figure 2.6 et la Figure 2.7 que des particules de la poudre non fondue ou fondue partiellement adhèrent à la surface des pièces. Les valeurs de rugosité arithmétique se situent généralement entre 10 μm et 50 μm et sont plus élevées que les spécifications des surfaces fonctionnelles (normalement inférieure à 8 μm). En conséquence, des opérations de finition par l'usinage sont nécessaires pour l'obtention des surfaces fonctionnelles (Le et al., 2015; Vayre et al., 2012b).

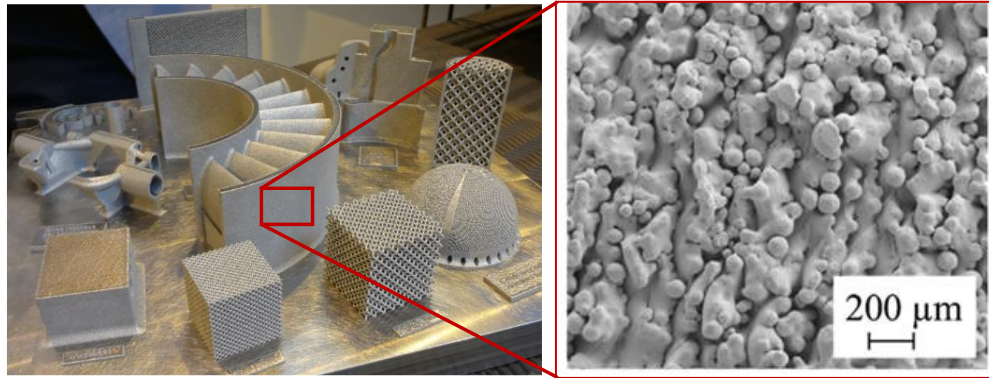


Figure 2.6. Rugosité de la surface de pièces réalisées en SLM⁴.

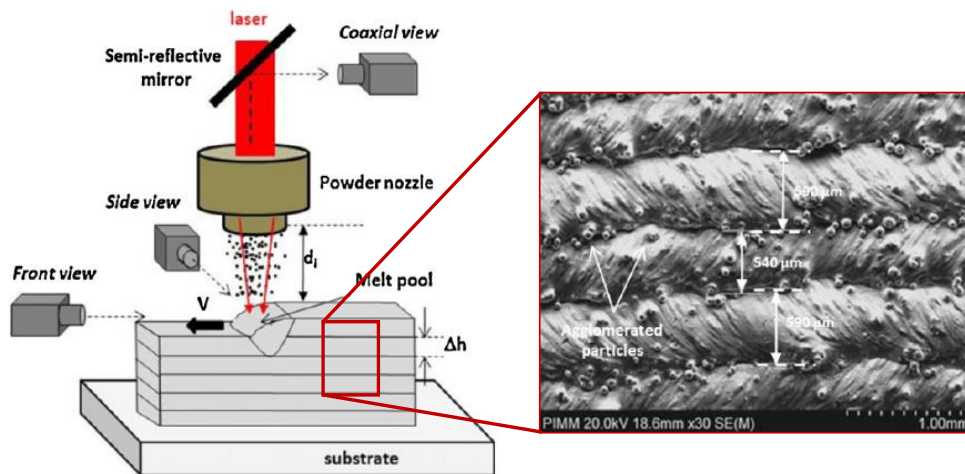


Figure 2.7. Rugosité de la surface de pièces réalisées en DMD (Gharbi et al., 2013).

En effet, différents facteurs ont une influence sur la rugosité, par exemple la taille moyenne des particules de la poudre, l'épaisseur des couches, les paramètres du procédé, la déformation thermique et les contraintes résiduelles. La rugosité des pièces obtenues par le procédé SLM présentent généralement les valeurs de rugosité les plus faibles, entre 9 μm et 26 μm (Yap et al., 2015). En EBM, la rugosité se situent entre 25 – 36 μm (Vayre et al., 2012a). Cela peut s'expliquer par la taille des particules de la poudre et de l'épaisseur des couches utilisées dans le procédé SLM, qui sont souvent plus faibles que celles utilisées en EBM. Dans le cas de fabrication de pièces de petites dimensions (inférieures à 1 cm) en titane par le procédé EBM, les valeurs de rugosité sont très élevées, entre 212 et 247 μm (Suard et al., 2015). D'après (Dutta and Froes, 2014), les valeurs de rugosité obtenues par les procédés DED sont comprises entre 20 et 50 μm . Concernant les incertitudes dimensionnelles, les valeurs communiquées par les constructeurs sont comprises entre 0.1 mm (pour une distance de 100 mm réalisée en SLM) et 0.2 mm dans les mêmes conditions en EBM (Vayre et al., 2012a).

⁴ Source : <http://www.cetim.fr>

2.1.5.3 Contraintes résiduelles et de déformations. Les procédés utilisant un laser (par exemple, SLM, laser cladding et DMD) introduisent souvent des contraintes résiduelles. Ceci est dû aux gradients thermiques qui existent intrinsèquement dans le processus de fabrication. Les contraintes résiduelles proviennent du refroidissement et du retrait des nouvelles couches fondues (Kruth et al., 2015). De plus, les contraintes résiduelles sont partiellement relâchées lors de la séparation de la pièce de la plaque de départ. Les contraintes résiduelles des pièces fabriquées par les procédés laser peuvent être réduites par un post traitement thermique ou par le chauffage de la plaque de départ (Figure 2.8).

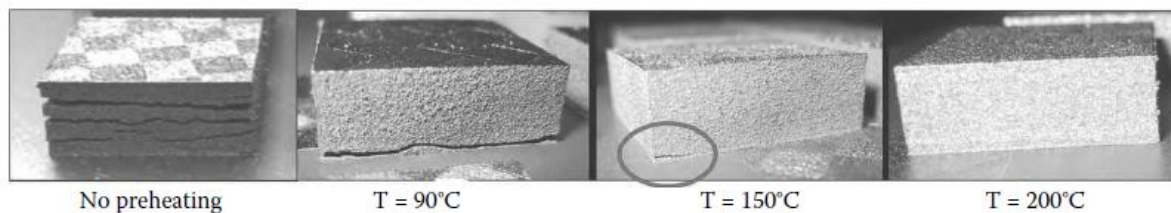


Figure 2.8. Réduction des fissures et des déformations des pièces réalisées en SLM en chauffant la plaque de départ (Kruth et al., 2015).

Au contraire, la déformation des pièces réalisées en EBM est quasiment nulle ou très faible. Cela s'explique par la construction des pièces en EBM réalisée à une haute température et sur une période très longue, ce qui conduit à un recuit de détente et le relâchement des contraintes résiduelles.

2.1.5.4 Accessibilité des outils dans le processus de fabrication. Les outils dans les procédés de fabrication additive métallique sont les buses de dépôt des matières (dans les procédés DED, voir la partie 1.3), ou les distributeurs de la poudre (dans les procédés PBF, voir la partie 1.2). Ces outils peuvent rentrer en collisions avec la pièce au cours du processus de fabrication. Les contraintes d'accessibilité doivent donc être considérées dans la conception de la gamme de fabrication pour éviter les collisions.

Dans les procédés PBF, la surface de départ sur laquelle la poudre est étalée doit être plane. En conséquence, pour ajouter de la matière sur une pièce existante, il faut d'abord créer une surface plane.

Dans les procédés DED, les buses sont installées sur une machine à commande numérique 3 axes ou 5 axes. L'accessibilité des buses durant le processus de fabrication est similaire à l'outil de coupe en fraisage. Dans la conception de gammes de fabrication, les dimensions des buses doivent être considérées pour éviter les collisions entre la buse et la pièce ou le système de prise de pièce.

2.1.5.5 Dé-poudrage dans les procédés PBF. Après avoir réalisé les pièces par les procédés PBF, l'opération de dé-poudrage est effectuée pour récupérer les pièces ainsi que la

poudre non fondue. Les difficultés de dé-poudrage apparaissent pour les pièces ayant des structures complexes, par exemple des treillis ou des structures internes. Pour des pièces classiques, la présence de trous ayant un petit diamètre ($D < 8 \text{ mm}$) et/ou un grand rapport de la hauteur (H) sur le diamètre (D), $H/D > 3$, pose des difficultés pour enlever la poudre (Vayre et al., 2013). Ce facteur est aussi important et à prendre en compte dans la conception de gammes de fabrication.

2.2 Combinaison de procédés soustractifs et additifs

2.2.1 Pourquoi est-il nécessaire de combiner les procédés additifs et soustractifs ?

Comme présenté précédemment, les procédés de fabrication additive consomment une quantité de matière proche du volume de la pièce finie. Les pièces réalisées par ces procédés présentent néanmoins une qualité de dimensions et de surfaces qui n'est pas en adéquation avec les surfaces fonctionnelles.

Au contraire, l'usinage à commande numérique (*CNC machining*) permet l'obtention de pièces de haute précision. Cependant, des difficultés en usinage apparaissent pour réaliser des formes complexes, telles que les entités internes, dues à l'accessibilité limitée des outils de coupe. De plus, le procédé d'usinage génère souvent une grande quantité de copeaux qui sont considérés comme les déchets (Karunakaran et al., 2010).

Ainsi, la combinaison des procédés additifs et soustractifs devient une solution pertinente. Cette combinaison permet de prendre les avantages des techniques individuelles (additive et soustractive), tout en minimisant les inconvénients (Karunakaran et al., 2010; Zhu et al., 2013). En créant une géométrie très proche de la pièce via les procédés additifs et en obtenant la qualité attendue par les procédés soustractifs (l'usinage et le polissage), la consommation de matière est efficace et les déchets générés sont réduits. Une réduction significative des coûts de pièces et des impacts environnementaux est donc attendue (Huang et al., 2016; Karunakaran et al., 2010; Manogharan et al., 2016).

En combinant les procédés additifs and soustractifs sur une machine-outil, nous obtenons une technologie hybride. Elle permet de fabriquer des pièces de géométries très complexes avec une qualité attendue (Flynn et al., 2016).

2.2.2 Applications principales de la combinaison des procédés additifs et soustractifs

Jusqu'à maintenant, nous constatons qu'il y a deux types d'applications principales de la fabrication hybride. Le premier est la fabrication de pièces mécaniques de géométrie complexes en alliages métalliques. Dans ces applications, la technique de fabrication additive joue un rôle important pour créer une géométrie très proche à celle de la pièce finie. Puis, la

géométrie et la qualité de la pièce finale sont obtenues par la technique soustractive (usinage et polissage). Le deuxième concerne les applications dans le contexte du remanufacturing des composants en fin de vie.

2.2.2.1 Fabrications de pièces de géométrie complexe. Citons une application typique présentée dans les travaux de (Manogharan et al., 2016, 2015). Les auteurs ont développé un système de fabrication, appelé AIMS, qui intègre le procédé EBM ou DMLS avec l'usinage à commande numérique (Figure 2.9).

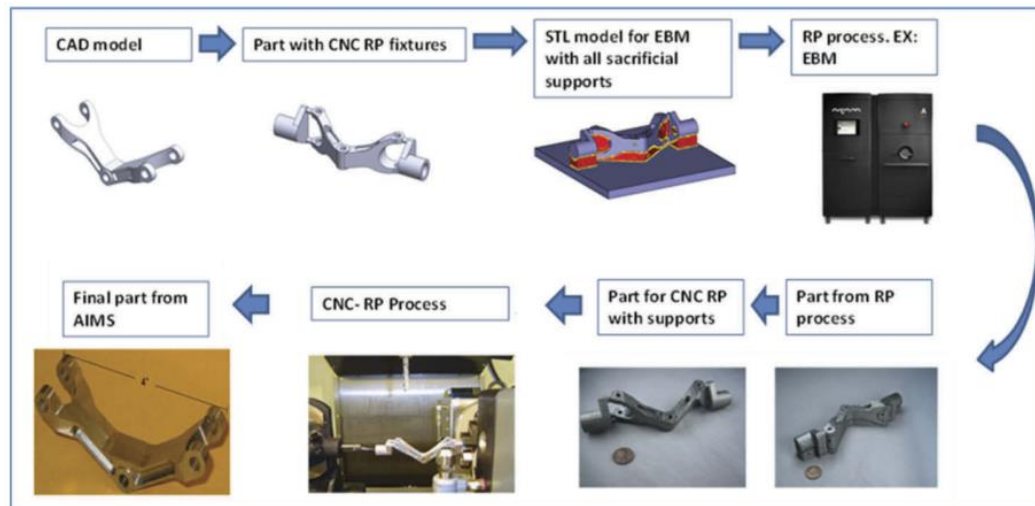


Figure 2.9. Processus de fabrication des pièces via le système AIMS (*additive methods integrated with subtractive method*) (Manogharan et al., 2016, 2015).

Ce système consiste à utiliser un procédé additif métallique (EBM ou DMLS) pour créer des géométries complexes. Afin d'obtenir la qualité requise des surfaces et des dimensions finales, l'usinage à commande numérique est utilisé. Cette intégration fournit un système hybride avec des capacités à produire des pièces fonctionnelles et des prototypes avec une précision élevée. Cette combinaison permet d'améliorer la faisabilité de fabrication des pièces ayant des géométries complexes. De plus, ces pièces doivent être fabriquées à partir des alliages métalliques coûteux et performants. Elles sont difficiles à traiter par les méthodes conventionnelles. Ainsi, en utilisant cette combinaison, nous pourrions réduire les phases intermédiaires de fabrication et simplifier les ressources supplémentaires (les systèmes de posage et de bridage). Cela conduit également à réduire les coûts de fabrication.

Une autre application utilisant la combinaison du procédé EBM avec l'usinage pour fabriquer une turbine aéronautique en titane (Figure 2.10) a été présentée dans le travail de (Vayre, 2014). Le procédé EBM ne permet pas d'obtenir directement les états finaux de la turbine, mais il permet l'obtention d'une pièce semi-finie de 440 g (avec des surépaisseurs d'usinage de 0.2 mm pour les opérations de finition). Le prix de la pièce est estimé à environ

840 à 1300 euros. Alors que la réalisation de cette pièce par l'usinage sur un centre d'usinage 5 axes, à partir d'un brut cylindrique de 132 mm de diamètre et de 32 mm de hauteur, dont la masse est de 2 kg dure 6h50. Le prix de fabrication d'une pièce est estimé à environ 780 à 1600 euros.

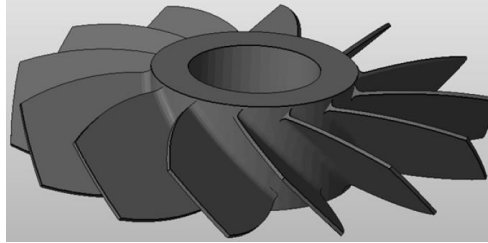


Figure 2.10. Le modèle CAD de la turbine aéronautiques (Vayre, 2014).

A partir de ces résultats, nous constatons que la combinaison des techniques (EBM et usinage 5 axes) permet de réduire la quantité de matière utilisée de 76%.

2.2.2.2 Applications dans le contexte du remanufacturing. Les procédés additifs métalliques, particulièrement les procédés DED, sont également utilisés dans le contexte du remanufacturing des composants (Jhavar et al., 2013). (Dutta and Froes, 2015) ont indiqué que l'une des meilleures applications des techniques DED (laser cladding et DMD) est le remanufacturing et la réparation des pièces endommagées ou usées. La raison est que ces techniques possèdent une bonne capacité pour ajouter de la matière sur une base existante.

Dans le cadre du projet RECLAIM, une combinaison de procédés additifs (laser cladding), soustractifs et d'inspection pour faciliter le remanufacturing de composants métalliques de hautes valeurs est proposée (Jones et al., 2012). Une descriptions détaillée du processus de remanufacturing est illustrée sur la Figure 2.11.

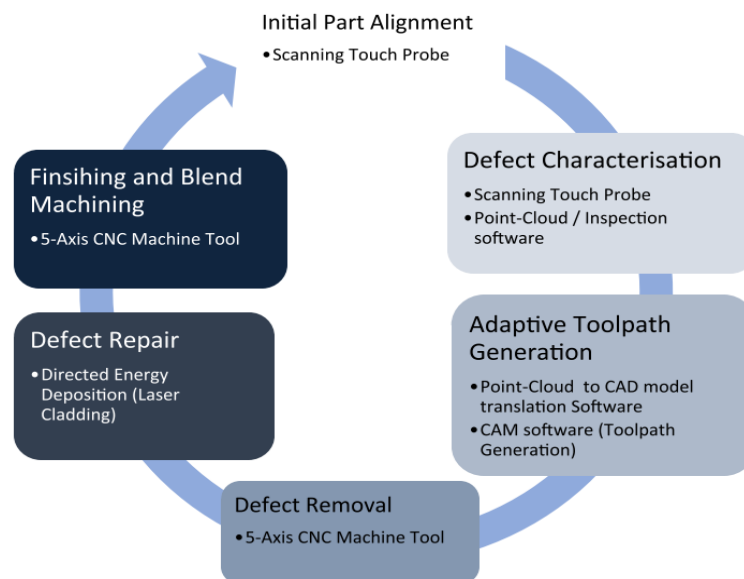


Figure 2.11. Représentation du processus de remanufacturing dans le projet RECLAIM (Jones et al., 2012).

L'objectif initial de ce travail est de remanufacturer les aubes des turbines en alliage de titane. Cette approche a montré son efficacité en termes de temps et de coûts. (Nan et al., 2010) ont également proposé un système de remanufacturing s'appuyant sur le laser cladding et l'usinage à commande numérique. Ce système permet de prolonger la vie des matrices et des composants des véhicules en fin de vie.

Récemment, (Wilson et al., 2014) et (Rickli et al., 2014) combinent le procédé DMD avec l'usinage pour remanufacturer les aubes des turbines. Les auteurs montrent que le remanufacturing des aubes en utilisant cette combinaison permet de réduire la consommation d'énergie et les impacts environnementaux par rapport à la fabrication de nouvelles aubes.

En comparaison avec les procédés DED, les procédés de fusion sur lit de poudre (PBF), tels que l'EBM et le SLM, sont limités pour les applications dans le contexte du remanufacturing en raison de leur volume de fabrication limité et que la fabrication additive doit être réalisée sur une surface plane. Cependant, il y a de nombreuses pièces avec des dimensions moyennes qui peuvent être remanufacturées par ces procédés. (Navrotsky et al., 2015) présentent une application du procédé SLM pour remanufacturer le brûleur de la turbine à gaz. La pointe du brûleur est usinée avant qu'elle soit placée dans le lit de poudre de la machine SLM. La nouvelle pointe est ensuite construite sur la surface usinée (Figure 2.12). Les résultats montrent que l'utilisation de la technologie SLM pour remanufacturer les brûleurs est 10 fois plus rapide que l'utilisation des procédés conventionnels.

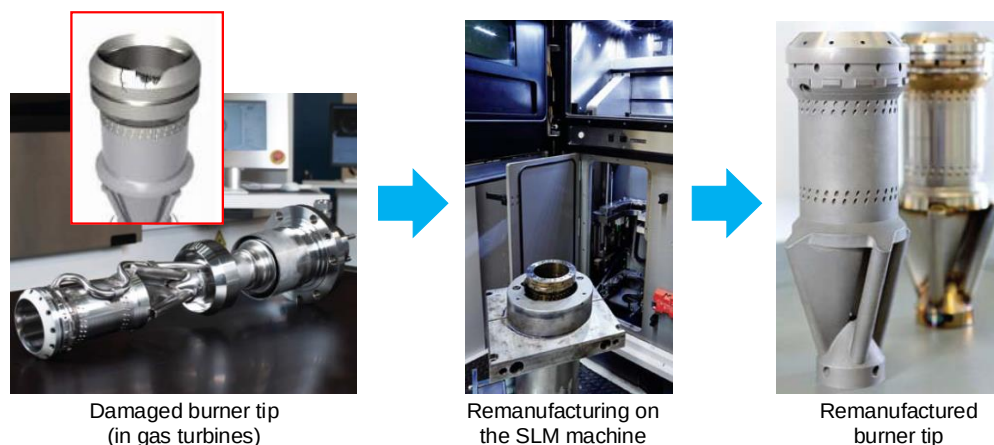


Figure 2.12. Remanufacturing de brûleurs à gaz via le procédé SLM (Navrotsky et al., 2015).

Dans le contexte de donner une nouvelle vie et de nouveaux usages à une pièce en fin de vie, les travaux existants dans la littérature restent limités. Récemment, (Zhu et al., 2017) ont proposé différentes stratégies possibles pour produire de nouvelles pièces en plastique à partir de pièces existantes. Leurs stratégies combinent la technique de fabrication additive FFF (*fused filament fabrication*), l'usinage à commande numérique et l'inspection. Néanmoins, cette stratégie n'est efficace que pour produire des pièces prismatiques en plastique avec la technique

FFF. Dans certains cas, la stratégie n'est pas efficace en temps. Il est donc nécessaire d'élargir leurs travaux pour la fabrication de pièces métalliques compatibles avec des applications industrielles.

2.3 Planification des processus de fabrication pour la combinaison des procédés additifs et soustractifs

La planification des processus de fabrication est l'activité qui lie la conception et la fabrication. La planification des processus assisté par ordinateur (ou *CAPP*, *Computer-Aided Process Planning*) est un élément critique pour la compétitivité d'une entreprise manufacturière parce qu'elle permet de réduire le gap entre la conception (CAO) et la fabrication (FAO). L'objectif principal est d'améliorer l'efficacité et d'obtenir une réponse rapide (devis de fabrication) tout en optimisant les moyens de production (GAMA, 1990).

Généralement, la conception de gammes de fabrication repose sur les connaissances et le savoir-faire du gammiste (Derigent, 2005). L'ensemble des informations manipulées par le gammiste est :

- Les données de la pièce à fabriquer. Par exemple, la géométrie de la pièce, les tolérances et les états de surface à obtenir.
- Les contraintes économiques (la quantité et le délai) et le type de production.
- Les ressources à prendre en compte. Tous les moyens de production disponibles et leurs caractéristiques (c'est-à-dire les machines-outils avec leur productivité, les outils coupants et les moyens de posage et de bridage).
- Les connaissances métier et les savoir-faire. Par exemple, les règles générales de la fabrication et les règles propres à l'entreprise.

Les systèmes CAPP en usinage sont développés en utilisant le concept d'entité d'usinage. Ces entités sont identifiées et/ou extraites à partir de fichiers CAO de la pièce. Elles représentent non seulement des formes géométriques, mais aussi des significations fonctionnelles et des attributs associés à un procédé de fabrication.

2.3.1 Concept d'entité de fabrication

2.3.1.1 Entité d'usinage. Dans le contexte de CAPP, de nombreuses définitions pour les entités d'usinage sont proposées dans la littérature (Wang et al., 2003; Yip-Hoi et al., 2003). (Sormaz and Khoshnevis, 2000) définissent une entité d'usinage comme une entité volumique, qui est un sous-ensemble de volume balayé par les outils de coupe. Cette définition se limite au volume de la matière qui est enlevée dans les opérations d'usinage. Elle ne donne pas d'informations suffisantes pour définir un processus d'usinage à l'entité. (Wang, 2015) propose

également un modèle complet d'entités d'usinage qui est représenté par des entités surfaciques, des entités géométriques, des entités volumiques et des informations associées telles que les directions d'accès de l'outil et le type d'outil. Ce modèle contient aussi des informations concernant le changement du volume de l'entité dans les différentes phases d'usinage.

Dans ce manuscrit, nous retiendrons la définition des entités d'usinage proposée par le groupe GAMA (GAMA, 1990) :

Définition 1. « Une entité d'usinage est une forme géométrique et un ensemble de spécifications pour lesquels un processus d'usinage est connu. Ce processus est quasi indépendant des processus d'autres entités d'usinage ».

D'après cette définition, l'entité d'usinage contient toutes les informations nécessaires (la géométrie et les spécifications technologiques) pour définir les processus d'usinage possibles pour réaliser l'entité. Le processus d'usinage d'une entité est une séquence ordonnée d'opérations d'usinage. Les attributs de l'entité d'usinage sont (Paris and Brissaud, 2000):

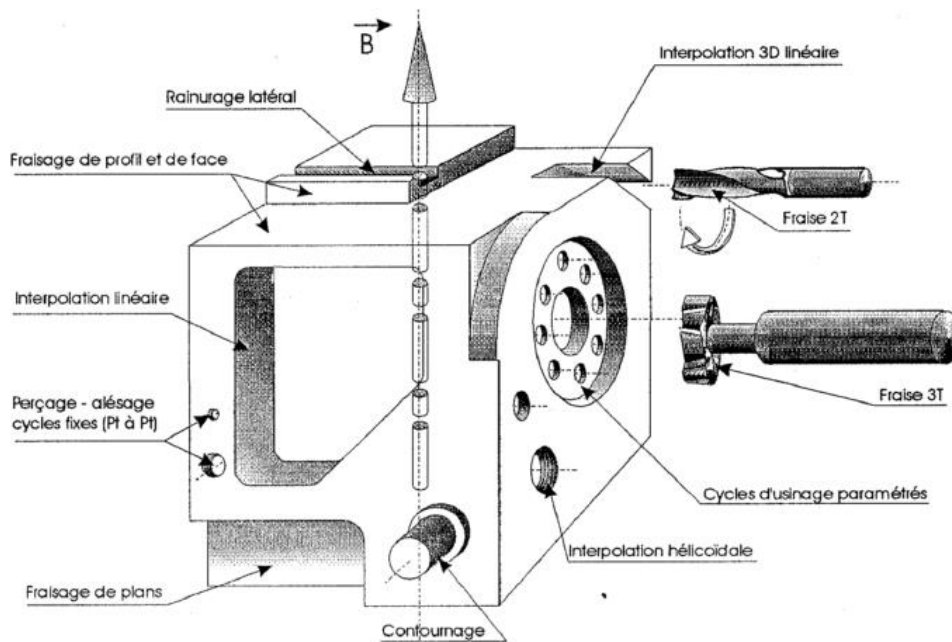


Figure 2.13. Différents types des entités d'usinage (extrait à partir de la thèse de (Vayre, 2014)).

(i) Le type. La composante géométrique d'une entité est essentiellement déterminée par son appellation, par exemple des entités d'alésage (des trous), des poches, ou des rainurages (Figure 2.13). Ce principe de description permet de capturer rapidement les entités et définir un processus de fabrication possible. Cependant, certaines entités plus complexes nécessitent des informations géométriques plus précises.

(ii) Les directions d'usinage. Il s'agit de la position et de l'orientation de l'axe de l'outil coupant durant l'usinage de l'entité.

(iii) **Les tolérances intrinsèques sur la forme à obtenir.** L'état d'une entité est caractérisé par la forme géométrique et les tolérances associées à la forme.

(iv) **Le volume estimé à enlever.** Il s'agit le volume de la matière à enlever pour passer de l'état brut à la forme finale de l'entité.

(v) **L'état brut.** L'état brut de l'entité est défini de manières différentes soit comme une surépaisseur de matière par rapport à l'entité, soit comme une forme complexe générée par la fonderie ou la forge, etc.

2.3.1.2 Entités de fabrication additive.

Récemment, la définition des entités de fabrication additive est également proposée par (Zhang et al., 2016): « **Une entité de fabrication additive est définie comme une caractéristique de forme identifiée représentant un certain modèle de forme qui a une certaine importance ou certaines fonctions importantes pour le prétraitement, le traitement ou le post-traitement associés à la fabrication additive** ». D'après cette définition, les entités de fabrication additive peuvent être classifiées en deux catégories : les entités fonctionnelles (*functional features*) et les entités habilitantes (*enabling features*). Les entités de forme, qui sont définies par les utilisateurs ou les concepteurs durant la phase de conception pour répondre aux fonctions de la pièce, sont dans le groupe des entités fonctionnelles. Les entités habilitantes sont les entités de forme définies par les experts dans le domaine de fabrication additive. Ces entités sont liées à la capacité des procédés de fabrication additive. Elles ont des impacts sur le prétraitement, le traitement ou le post-traitement de la fabrication additive. Cependant, une entité de fabrication additive peut être une entité fonctionnelle ou une entité habilitante. Cela dépend du point de vue des concepteurs et des fabricants.

Cette définition permet aux concepteurs d'identifier les entités de fabrication additive pour une pièce à réaliser. Particulièrement, elle joue un rôle important pour sélectionner les directions de construction. La sélection de bonnes directions de fabrication permet d'obtenir une meilleure qualité.

Dans le contexte de cette thèse, la matière sera déposée sur une pièce existante pour créer de nouvelles entités. La direction de fabrication d'une nouvelle entité est normalement le vecteur normal de la surface existante sur laquelle l'entité est construite. Une nouvelle définition des entités de fabrication additive adaptée au contexte de notre travail a été proposée (Le et al., 2017a, 2017b).

Définition 2. Une entité de fabrication additive est définie comme une forme géométrique et un ensemble d'attributs technologiques associés pour lesquels un procédé de fabrication additive existe.

Les attributs d'une entité de fabrication additive sont :

(i) **La forme géométrique.** La géométrie d'une entité de fabrication additive est définie pour obtenir soit la géométrie de la pièce finale, soit l'état brut qui doit être reprise en usinage pour obtenir la géométrie de la pièce finale.

(ii) **La direction de fabrication.** Dans les procédés PBF, chaque entité de fabrication additive n'a qu'une seule direction de fabrication. Elle est définie par le vecteur normal d'une surface plane sur laquelle le matériau est déposé. Cette surface peut être obtenue par usinage sur la pièce existante. Dans les procédés DED, la direction de fabrication d'une entité peut être le vecteur normal d'une surface plane, ou un vecteur normal local d'une surface 3D de la pièce existante.

(iii) **La surface de départ.** Pour construire une entité de fabrication additive sur la pièce existante, le dépôt de la matière commence sur une surface de la pièce existante. Cette surface s'appelle la surface de départ de l'entité de fabrication additive.

(iv) **Le volume de matière à ajouter.**

(v) **La qualité.** Elle s'agit des tolérances intrinsèques de la géométrie de l'entité. Celles-ci permettent d'identifier si une entité de fabrication additive devient l'état brut des entités d'usinage correspondantes.

A partir de ces attributs, au moins un procédé de fabrication additive est sélectionné pour réaliser l'entité de fabrication additive.

2.3.2 Identification et extraction des entités

De nombreuses études publiées dans la littérature se concentrent sur les méthodes automatiques de reconnaissance et d'extraction d'entités d'usinage, telles que les méthodes basées sur les graphes (Figure 2.14) et les méthodes basées sur la décomposition volumique (Zirmi, 2006).

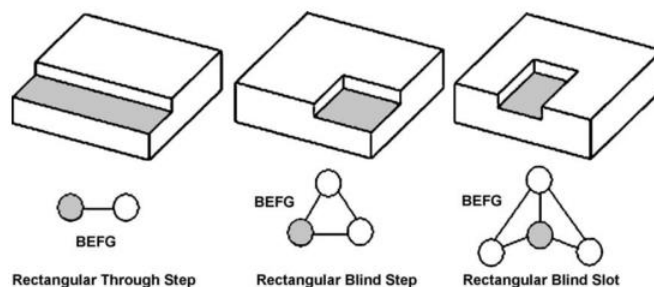


Figure 2.14. Représentation des entités d'usinage par les graphes (Sunil et al., 2010).

Sur la Figure 2.14, les relations de voisinage des faces peuvent être modélisées grâce à un graphe d'adjacence des faces. Des informations additionnelles comme la convexité de l'arête sont incorporées dans le graphe. Les entités sont identifiées en analysant le graphe.

D'autres méthodes basées sur les volumes de matières enlevés par les opération d'usinage sont aussi proposées (Woo and Sakurai, 2002) (Figure 2.15).

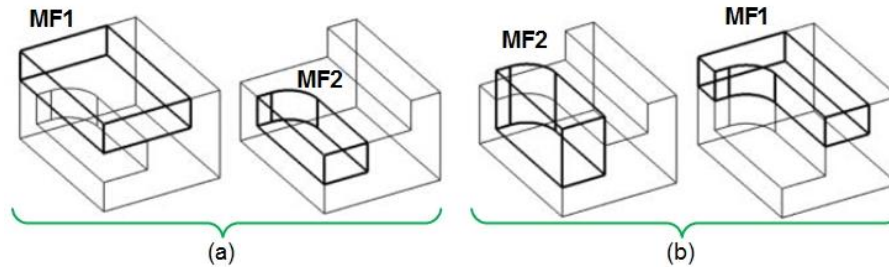


Figure 2.15. Extraction des entités d'usinage par analyse des volumes à enlever : (a) l'entité MF1 usinée avant l'entité MF2 et (b) l'entité MF2 usinée avant l'entité MF1 (Woo and Sakurai, 2002).

Globalement, ces méthodes sont basées sur la connaissance des procédés d'usinage (par exemple, le fraisage et le tournage). Les entités d'usinage extraites sont ensuite utilisées pour la conception de la gamme de fabrication (Liu and Wang, 2007; Paris and Brissaud, 2000).

Concernant l'identification des entités de fabrication additive, la méthode développée par (Zhang et al., 2016) consiste à optimiser la direction de fabrication des pièces en respectant la qualité. Néanmoins, elle n'est pas efficace dans notre étude. Jusqu'à maintenant, très peu de méthodes permettant d'extraire des entités de fabrication additive sont proposées.

2.3.3 Planification des processus de fabrication additive et soustractive

De nombreuses études portent sur la planification des processus de fabrication pour les procédés d'usinage (Givehchi et al., 2015; Kim et al., 2001; Liu and Wang, 2007; Paris and Brissaud, 2000; Wang, 2015; Wang et al., 2006) et les procédés additifs (Ding et al., 2015; Ren et al., 2008). Cependant, les études abordant la planification des processus additifs et soustractifs sont peu nombreuses.

(Ren et al., 2006) présentent un système hybride combinant le procédé DMD avec l'usinage pour réparer des matrices (Figure 2.16). Les auteurs proposent quatre étapes principales pour planifier le processus de réparation. Dans la première étape, les entités endommagées sont identifiées. Les trajectoires d'usinage pour enlever la matière sont ensuite générées. Dans la troisième étape, les entités endommagées sont reconstruites par le procédé additif. Finalement, les entités reconstruites sont usinées pour obtenir la géométrie et la qualité requises. Les auteurs montrent que cette méthode peut réduire considérablement le temps, la consommation d'énergie et les coûts en comparaison avec la fabrication d'une nouvelle matrice.

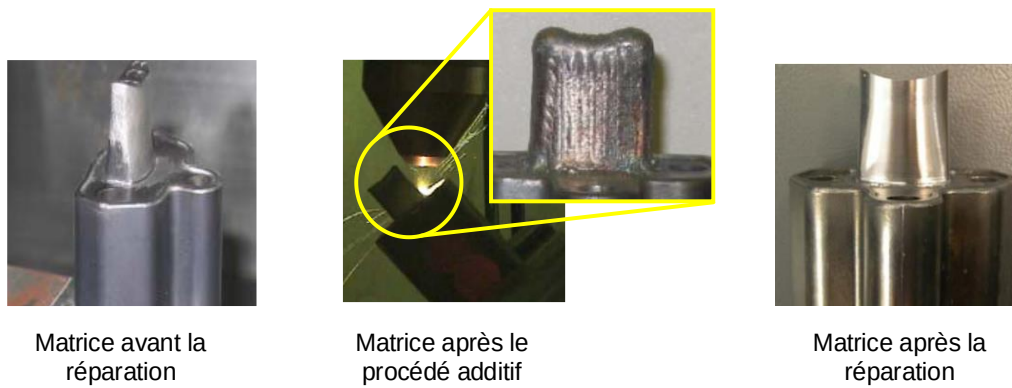


Figure 2.16. La réparation des matrices en utilisant la combinaison des procédés additifs et soustractifs (Ren et al., 2006).

(Kerbrat et al., 2011, 2010) proposent une approche d'évaluation et de planification des processus de fabrication en se basant sur la difficulté de fabrication. L'analyse de la difficulté associée à une entité permet de choisir la méthode de fabrication - la méthode additive ou l'usinage. Cette complexité de fabrication est due aux limitations des procédés de fabrication, telles que la faisabilité et l'accessibilité des outils, etc. Bien que ces études ne soient pas appliquées explicitement pour la planification de la combinaison des procédés additifs et soustractifs, les résultats peuvent être exploités lors de la planification du processus de fabrication pour la combinaison des procédés de fabrication additive et soustractive.

(Zhu et al., 2014, 2013) proposent un système, appelé iAtractive, qui est capable de fabriquer des pièces plastiques de haute précision et comprenant des structures internes en combinant l'usinage à commande numérique avec la fabrication additive (FFF - *fused filament fabrication*) et l'inspection. Dans leurs travaux, les pièces complexes sont décomposées en sous-pièces avec leur propre direction de construction, qui pourrait être construites et usinées sans collisions. Les opérations d'inspection sont ajoutées dans la séquence d'opérations additives et soustractives. La planification des processus de fabrication commence par une séquence statique des opérations, qui est mise à jour en fonction des opérations d'inspection.

Récemment, (Newman et al., 2015) et (Zhu et al., 2017) introduisent également un système de planification de processus de fabrication s'appuyant sur le concept iAtractive. Ce système peut générer différentes stratégies pour fabriquer une nouvelle pièce à partir d'une pièce existante en matière plastique (Figure 2.17). Ces stratégies sont développées en prenant en compte des contraintes locales (c'est-à-dire la géométrie et les dimensions des entités sur les pièces existantes et finales) et les contraintes de collisions. Les contraintes globales (par exemple, le temps et le coût de production) sont utilisées pour limiter le nombre de stratégies. Cependant, cette approche n'est efficace que pour la production de pièces en plastique et limitée par la technique FFF. De plus, les pièces obtenues ont des caractéristiques mécaniques limitées.

Il est donc nécessaire d'étendre leurs travaux pour la fabrication de pièces métalliques qui sont compatibles avec les applications industrielles.

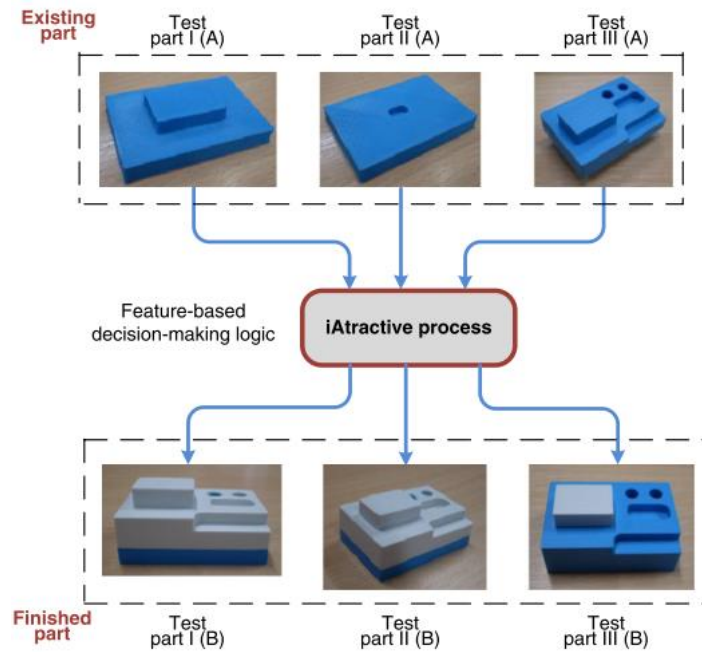


Figure 2.17. Fabrication d'une nouvelle pièce à partir d'une pièce existante en plastique (Newman et al., 2015; Zhu et al., 2017).

2.4 Outils d'analyse des impacts environnementaux

Dans les années 1990s, la performance d'un système de fabrication est évaluée en considérant quatre attributs de fabrication : le temps, le coût, la qualité et la flexibilité du système de fabrication. Aujourd'hui, dans le contexte de développement durable, certains attributs supplémentaires, tels que la consommation efficace d'énergie et de ressources, ainsi que l'impact environnemental, doivent être pris en compte (Figure 2.18). Ces aspects doivent être considérés simultanément dans les étapes de conception et de fabrication.

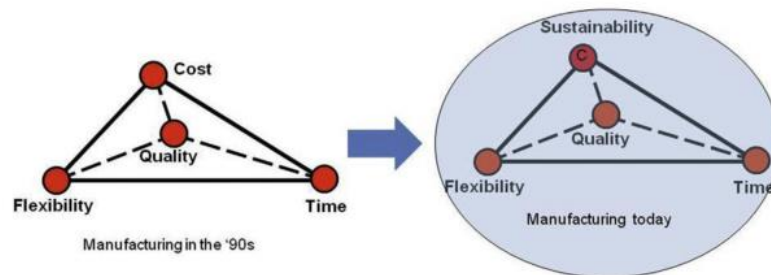


Figure 2.18. Les attributs pour la décision de fabrication des produits dans les années 1990s et aujourd'hui (Chen et al., 2015).

Pour évaluer un produit ou un process de fabrication sur l'aspect environnemental, il est nécessaire de proposer des outils permettant d'analyser les impacts sur l'environnement. Aujourd'hui, il existe différents outils, soit qualitatifs, soit quantitatifs. Nous pouvons citer :

- le bilan carbone développé par Jancovici (Jancovici, 2009) ;
- l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) (ISO, 2006) ;
- la conception pour l'environnement (*design for environment*) (Hopkinson et al., 2006).

Les deux premiers sont des outils permettant de quantifier les impacts environnementaux, tandis que le troisième est une méthode non-quantitative qui permet de prendre en compte l'environnement dans la phase de conception.

Dans le cadre de ce manuscrit, nous nous intéressons à utiliser un outil normalisé permettant la quantification des impacts environnementaux, c'est-à-dire l'approche de type **Analyse du Cycle de Vie (ACV)**.

2.4.1 Analyse du Cycle de Vie (ACV)

L'analyse du cycle de vie (ou *Life Cycle Assessment, LCA*) est un outil normalisé suivant la norme ISO 14040 mise à jour en 2006. La méthodologie associée à cet outil couple une approche multi critères et multi étapes (depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie des produits, voir la Figure 1.1 du chapitre 1). De plus, une des forces de cet outil est qu'il permet de comparer des produits ayant une même fonction.

Cette approche se décompose en quatre étapes suivantes (Figure 2.19) :

- la définition des objectifs et le contour de l'étude,
- l'inventaire des émissions et extractions des matières considérées,
- l'évaluation des impacts environnementaux,
- l'interprétation des résultats.

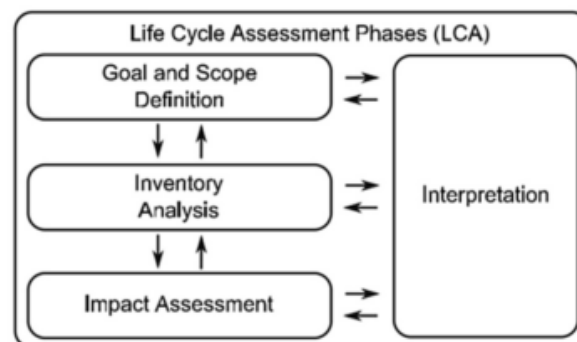


Figure 2.19. Quatre étapes de l'ACV (ISO, 2006).

2.4.1.1 Définition des objectifs et le contour de l'étude. Cette étape permet de poser le problème de définir les objectifs de l'étude et le contour de l'étude. Les scénarios de la vie du produit sont aussi définis dans cette étape. Dès le début de l'étude, les objectifs de l'ACV envisagée doivent être clairement explicités.

De plus, Il est important de bien définir la fonction réalisée par un produit afin de pouvoir par la suite comparer les impacts environnementaux de deux produits remplissant la

même fonction. Pour cela, la fonction ou service rendue par le produit est décrite sous la forme d'**unité fonctionnelle**. Il s'agit de la fonction de référence à laquelle est ramené l'ensemble des impacts quantifiés pour ce produit. Par exemple, dans le cas où nous souhaitons évaluer les impacts environnementaux d'une peinture murale, nous pourrions choisir une unité fonctionnelle du type « assurer la couverture d'un mètre carré de mur pendant 10 ans ». Nous pourrions alors comparer les impacts environnementaux de 2 types de peinture ayant des compositions différentes, des pouvoirs couvrant différents et des durées de vie différentes.

2.4.1.2 Inventaire des émissions et extractions des matières. Cette étape permet de comptabiliser les émissions polluantes dans l'air, l'eau et le sol, ainsi que les extractions des matières premières renouvelables et non renouvelables. Pour un système de production, il faut estimer l'énergie, la matière première, ainsi que l'ensemble des consommables nécessaires à la mise en forme du produit. Cela correspond à l'inventaire des extractions auquel il faut ajouter l'inventaire des émissions.

2.4.1.3 Evaluation des impacts environnementaux. Dans cette étape, l'ensemble des émissions et extractions est traduit en impacts environnementaux. Il est nécessaire, dans un premier temps, de classer les émissions et extractions dans les catégories d'impacts. Cette classification dépend de la méthode d'évaluation utilisée et de la base de données utilisée.

L'étude menée par (Carvalho et al., 2014) énumère vingt-cinq méthodes de quantifications des impacts environnementaux (Figure 2.20).

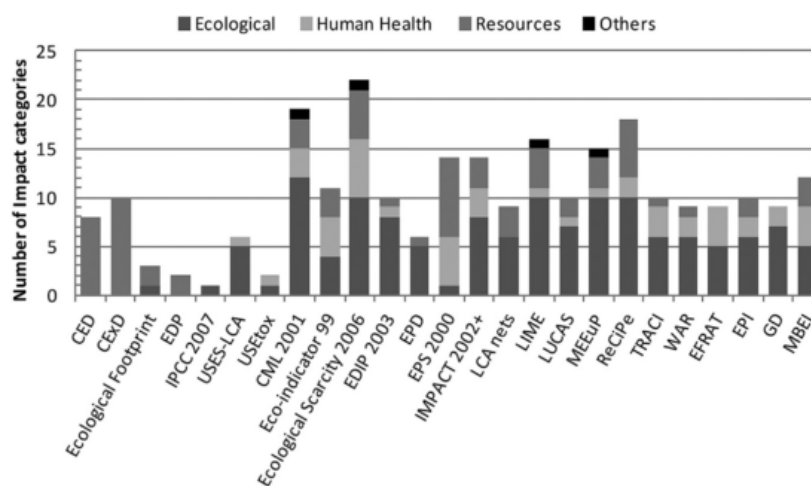


Figure 2.20. Les méthodes d'évaluation des impacts environnementaux et leur nombre d'impacts, d'après (Carvalho et al., 2014).

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 la Figure 2.20, les catégories d'impacts sont classifiées en trois classes principales : l'écologique, la santé

humaine et les ressources. Les deux premières classes (l'écologique et la santé humaine) évaluent l'impact des émissions du process, tandis que la classe des ressources évalue l'extraction et l'épuisement des matières premières. Ces classes sont indépendantes.

2.4.1.4 Interprétation des résultats. Cette étape consiste à interpréter les résultats obtenus. C'est également dans cette étape que nous tenterons d'évaluer la robustesse des résultats (en réalisant par exemple des analyses de sensibilité), notamment pour s'assurer que les incertitudes et variabilités sont bien d'un ordre inférieur aux différences constatées entre les performances environnementales des différents systèmes étudiés.

A l'issue d'une étude ACV, un rapport d'étude est élaboré présentant de manière détaillée et transparente les objectifs et le champ de l'étude, les limites et hypothèses, les données employées, les résultats de l'étude et leur analyse critique. Une synthèse en est généralement tirée pour faciliter sa compréhension. Une des principales difficultés dans la réalisation d'une ACV est de parvenir à collecter des données fiables et représentatives de la réalité de l'objet analysé.

2.4.2 Evaluation des impacts environnementaux des procédés additifs et soustractifs

Bien que les performances consolidées de la combinaison des procédés soustractifs et additifs aient été démontrés, il est nécessaire d'évaluer les impacts environnementaux (la consommation d'énergie et de ressources et les émissions telles que les gaz à effet de serre, substances toxiques, etc.). Cette évaluation aide les fabricants à sélectionner la meilleure stratégie entre la combinaison des procédés de fabrication et les procédés de fabrication conventionnels. De fait, la fabrication de pièces par des procédés additifs nécessite de la poudre métallique comme matière première. La production de la poudre métallique consomme une quantité importante de ressources et d'énergie, et génère donc des impacts environnementaux. Ainsi, la consommation d'énergie et de ressources dans le processus de production de la poudre doit être prise en considération. De nombreuses études, qui portent sur l'évaluation de la consommation d'énergie et de ressources, ainsi que des impacts environnementaux pour les procédés d'usinage ou additifs, ne prennent pas en compte la fabrication du brut (pièce ou poudre). Certaines études ont également été réalisées pour comparer la performance environnementale entre les procédés additif et soustractif (Paris et al., 2016).

2.4.2.1 Consommation d'énergie et de ressources en usinage. Généralement, la performance des procédés de fabrication est souvent orientée uniquement sur des aspects énergétiques. Cependant, pour évaluer la performance environnementale d'un procédé, il faut 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. La consommation

des fluides de coupe ou la production de copeaux sont des sources d'impacts non-négligeables. De même, la consommation d'eau dans ces procédés doit aussi être prise en compte car elle contribue aussi à l'impact environnemental global (Zhao et al., 2012). 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.

Pour calculer l'énergie de coupe des machines-outils, l'équation théorique $E = F * v * t$ est généralement adoptée, où F est la force de coupe, v est la vitesse de coupe et t est le temps de coupe. Cependant, l'énergie calculée par cette équation ne prend pas en compte la consommation énergétiques de l'ensemble des organes du moyen de production (Kara and Li, 2011).

(Gutowski et al., 2006) montre que la consommation d'énergie d'une machine-outil est normalement constituée d'un socle et une partie variable, Figure 2.21. La partie variable correspond à la consommation d'énergie nécessaire pour enlever la matière. Cette partie représente souvent de 10% à 20% de la consommation totale d'énergie des machines-outils. Elle est liée aux propriétés du matériau, aux conditions de coupe et de l'outil. La puissance absorbée par les sous-systèmes tels que le système de changement d'outils et le système d'approvisionnement de lubrification est souvent importante.

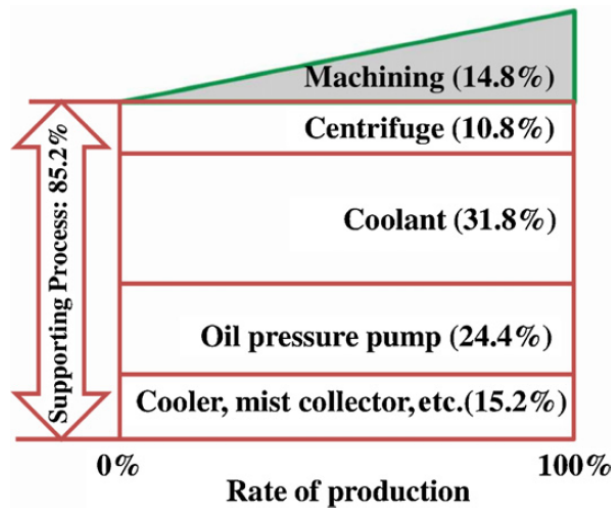


Figure 2.21. La décomposition de l'énergie consommée en usinage (Gutowski et al., 2006).

(Diaz et al., 2011) proposent un modèle de consommation d'énergie en fonction du débit d'enlèvement de matière (MRR - *Material Removal Rate*) (Eq. 2-1 et 2-2).

$$P = P_0 + k * MRR \quad (\text{Eq. 2-1})$$

$$E = (P_0 + k * MRR) * \Delta t \quad (\text{Eq. 2-2})$$

Où P , est la puissance électrique absorbée par la machine (W),

- P_0 , la puissance électrique absorbée par la machine hors enlèvement de matière (W),

- MRR , le débit de copeaux (mm^3/s),
- k , l'énergie consommée par volume de copeaux enlevé (J/mm^3),
- E , l'énergie électrique consommée par la machine durant une période Δt (J),
- Δt , la durée de l'usinage (s).

Dans ce modèle, P_0 dépend des caractéristiques de la machine-outil elle-même, alors que k est une constante étroitement liée au mécanisme de coupe.

(Kara and Li, 2011) ont également étudié la relation entre la consommation spécifique d'énergie (SEC – *Specific Energy Consumption*, kJ/cm^3) et MRR . SEC représente l'énergie consommée pour enlever 1 cm^3 du matériau (Eq. 2-3 et Figure 2.22).

$$SEC = C_0 + \frac{C_1}{MRR} \quad (\text{Eq. 2-3})$$

Où C_0 et C_1 sont les coefficients spécifiques de la machine-outil et du couple outil matière.

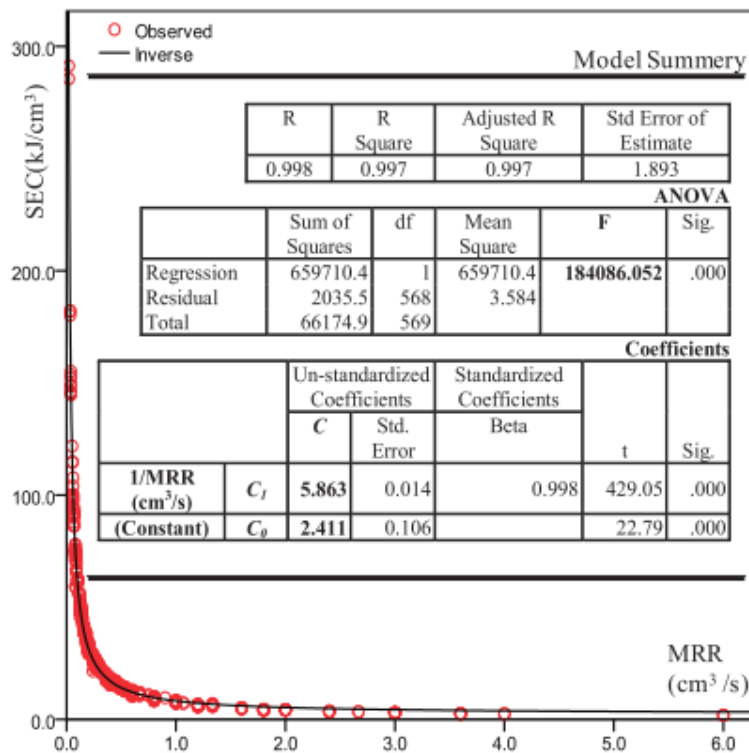


Figure 2.22. Evolution de la consommation spécifique d'énergie en fonction du débit : machine DMU 60P sans utiliser de fluide de refroidissement (Kara and Li, 2011).

Donc, l'énergie utilisée pour enlever la matière peut être calculée en multipliant SEC par le volume de matière à enlever. Ce modèle peut prédire la consommation d'énergie avec une précision supérieure à 94%. Les auteurs ont également comparé les consommations en usinage à sec et avec un fluide de refroidissement. Ils soulignent que l'utilisation du dispositif

de refroidissement a un effet important sur la valeur de C_1 . Le Tableau 2.2 donne les valeurs de C_1 et C_2 pour différentes machines-outils usinant à sec et avec un fluide de coupe.

Tableau 2.2. Les modèles du SEC pour certaines machines-outils (Kara and Li, 2011).

Machine tool		Model
Fadal VMC 4020 (3 axis)	Dry cut	$SEC = 2.845 + 1.330 / MRR$
	Wet cut	$SEC = 3.082 + 1.396 / MRR$
Mori Seiki Dura Vertical 5500 (3 axis)	Dry cut	$SEC = 2.830 + 1.344 / MRR$
	Wet cut	$SEC = 2.953 + 2.019 / MRR$
DMU 60P (5 axis)	Dry cut	$SEC = 2.411 + 5.863 / MRR$
	Wet cut	$SEC = 2.677 + 6.526 / MRR$

Comme nous l'avons dit précédemment, la consommation énergétique des procédés d'usinage représente une grande partie des impacts environnementaux. Néanmoins, pour une analyse environnementale complète, il est nécessaire de s'intéresser aussi aux consommables. Dans le cadre de notre travail, nous nous intéressons au procédé d'usinage qui utilise le fluide de coupe. D'après (Kellens et al., 2012a), une part du fluide de coupe (l'eau et l'huile) est perdue pendant le processus d'usinage. Les pertes d'huile et d'eau ont été estimées à environ 0.042 (g/s) et 0.238 (g/s), respectivement. Ces pertes sont considérées comme une consommation d'eau et d'huile pendant le processus d'usinage.

Dans l'étude de (Zhao et al., 2012), 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. Dans un contexte de développement durable, l'eau fait partie de l'un des enjeux majeurs dans les impacts environnementaux.

2.4.2.2 Consommation d'énergie et de ressources en fabrication additive. Concernant la consommation d'énergie et de ressources dans les procédés additifs, un certain nombre d'études ont également été réalisées. (Mognol et al., 2006) réalisent une étude sur l'influence de l'orientation du tranchage de la pièce sur la consommation énergétique de trois machines (impression 3D, dépôt de fil fondu, frittage laser de poudres métalliques). Leurs travaux permettent de mettre en avant l'influence non-négligeable de l'orientation de la pièce 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.

(Baumers, 2012) analyse 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. L'auteur utilise une pièce ayant une hauteur variable (Figure 2.23a). Cela permet 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 la machine (Figure 2.23b) sur la consommation énergétique, il montre que cette consommation n'est pas proportionnelle aux nombres de pièces à produire. Cette analyse rejoint celle faite par (Mognol et al., 2006) car la consommation énergétique est fortement dépendante de la hauteur à fabriquer. Dans un travail récent, (Baumers et al., 2016) montrent que la consommation d'énergie de ces procédés n'est pas liée à la complexité de forme des pièces.

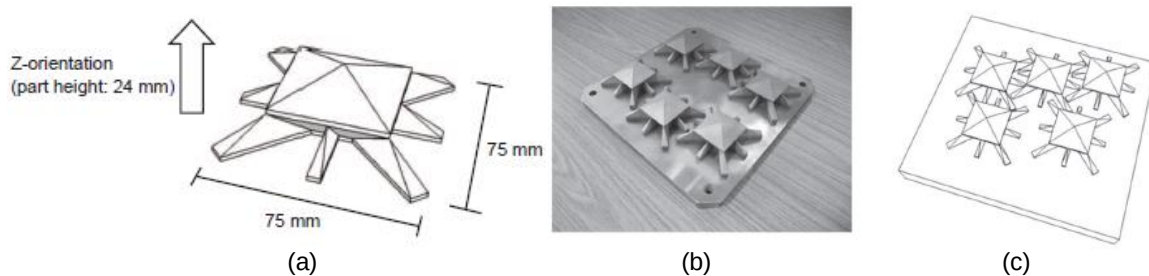


Figure 2.23. (a) la géométrie de la pièce étudiée et la configuration de remplissage maximal de l'espace de fabrication dans le procédé SLM (b) et EBM (c) (Baumers, 2012).

(Duflou et al., 2011; Kellens et al., 2012b) proposent une étude du cycle de vie des technologies de friction sélective par laser et de fusion sélective par laser en appliquant la méthodologie UPLCI (*Unit Process Life Cycle Inventory*) développée dans le programme CO₂PE!, Figure 2.24.

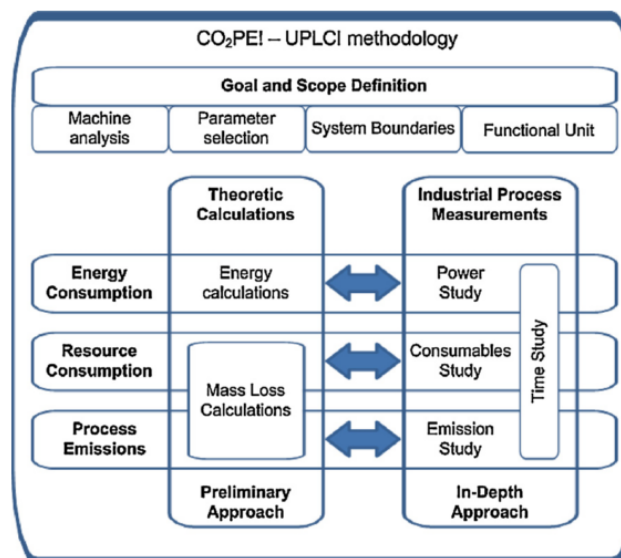


Figure 2.24. Méthodologie UPLCI associée à l'initiative CO₂PE ! (Duflou et al., 2011).

Cette méthodologie prend en compte l'ensemble des flux traversant le système étudié. Les auteurs analysent la consommation d'énergie électrique, la consommation d'air comprimé, la consommation de matière, en prenant en compte l'impact environnemental dû à l'atomisation, 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 des pièces unitaires. La collecte de données est réalisée soit par des méthodes empiriques, soit par des méthodes théoriques. La connaissance issue de cette méthodologie permet de fournir des bases de données d'ACV en proposant des modèles d'impacts environnementaux associés à ces procédés de fabrication.

Plus récemment, (Bourhis et al., 2013) proposent également une nouvelle méthodologie basée sur l'ACV pour évaluer des impacts environnementaux d'un procédé additif. Au lieu de considérer uniquement l'énergie électrique du processus, les auteurs considèrent tous les facteurs d'influence importants du processus de fabrication. Plus précisément, leur modèle permet de prendre en compte l'évaluation de la consommation d'énergie électrique, des fluides et des matières premières pour un procédé de dépôt direct (DMD) pour produire des pièces en acier.

2.4.2.3 Comparaison de la performance environnementale entre les procédés additifs et soustractifs. Pour obtenir la même sortie (pièce ou produit) en termes de performances technologiques, plusieurs procédés additifs et soustractifs peuvent être utilisés. Cependant, la sélection du processus le plus respectueux vis-à-vis de l'environnement, parmi les options disponibles, est aujourd'hui nécessaire. Le monde scientifique commence à développer des analyses comparatives des processus de fabrication pour fournir des guidelines.

(Morrow et al., 2007) ont réalisé la première estimation quantitative de la consommation d'énergie et des émissions associées à la production des moules et des matrices en utilisant le procédé DMD et le fraisage à commande numérique. Cette étude propose la mise en place d'un indicateur permettant au concepteur de faire un choix sur le type de procédé optimal d'un point de vue environnemental. L'un des principaux résultats porte sur la corrélation entre la complexité géométrique du composant et le résultat de l'analyse comparative. Les auteurs montrent que l'usinage des moules avec une quantité des copeaux à enlever importante a un impact environnemental supérieur à la fabrication additive. Dans cette étude, les auteurs montrent également que la fabrication additive peut aussi être utilisée pour la réparation des moules. L'objectif étant de redéposer de la matière sur le moule usé et de ré-usiner les surfaces concernées, évitant ainsi de réaliser une nouvelle pièce.

(Serres et al., 2011) comparent le procédé additif (CLAD) avec l'usinage conventionnel en considérant la réalisation d'une pièce mécanique en Ti-6Al-4V (Figure 2.25a). Cette étude

permet de mettre en avant que sur l'ensemble du cycle de vie de la pièce, la fabrication additive permet de diminuer jusqu'à 70% les impacts environnementaux générés (Figure 2.25b). 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 liées aux procédés (par exemple, l'optimisation topologique) qui permettent de proposer des géométries adaptées aux procédés.

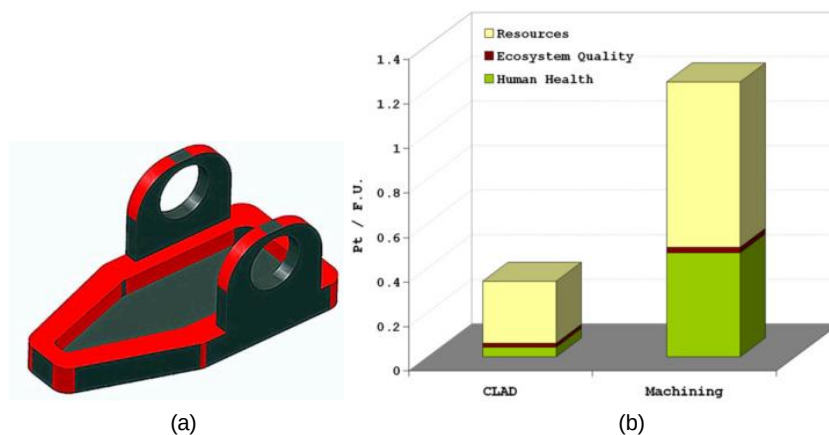


Figure 2.25. Comparaison environnementale des procédés d'usinage et de fabrication additive : (a) la pièce utilisée, et (b) le résultat de l'ACV (Serres et al., 2011).

(Huang et al., 2016) appliquent une analyse comparative à cinq cas d'études (cinq composants aéronautiques). Cette étude considère le traitement des matériaux métalliques (titane et alliages d'aluminium) et les procédés additifs métalliques (EBM, SLM et DMLS). En prenant en compte tous les facteurs d'influence (tels que la production de matières premières, la distribution de matières premières, la fabrication de composants et la distribution des composants vers l'usine d'assemblage) les auteurs affirment que, pour chaque cas d'étude, la fabrication additive permet une consommation d'énergie primaire nettement inférieure à celle des voies de fabrication classiques. Les auteurs soulignent la pertinence de la pondération légère pouvant être obtenue par une optimisation topologique de la géométrie des pièces dans les procédés additifs.

(Paris et al., 2016) comparent l'énergie cumulée requise pour la fabrication d'une turbine à base de titane en utilisant les procédés d'usinage et EBM. Ils suggèrent que les procédés de fabrication additive sont préférables lorsque le volume du matériau à enlever en usinage (c'est-à-dire des copeaux) est important.

Dans l'étude réalisée par (Tang et al., 2016), après avoir présenté un système pour analyser des impacts environnementaux liés aux procédés de fabrication additive, les auteurs proposent une comparaison entre le procédé « *binder jetting* » et l'usinage à commande numérique. Plus précisément, les auteurs considèrent également la réduction de l'impact environnemental grâce à la réduction de la masse, ce qui peut être obtenue par l'optimisation

topologique des pièces (Figure 2.26). Les auteurs affirment que les émissions de CO₂ (équivalent) peuvent être réduites jusqu'à 64% en choisissant le procédé de fabrication additive par rapport à l'usinage.

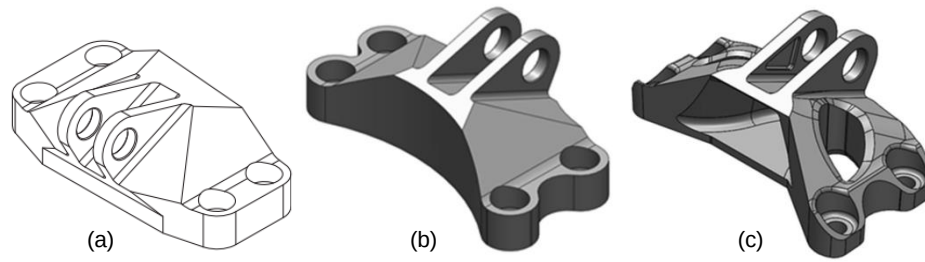


Figure 2.26. (a) la pièce originale de l'étude, (b) la géométrie optimisée de la pièce pour l'usinage, et (c) la géométrie optimisée pour la fabrication additive (Tang et al., 2016).

Plus récemment, (Priarone and Ingarao, 2017) proposent une méthodologie systématique basée sur la modélisation empirique des procédés additifs et soustractifs. La méthodologie peut être utilisée pour identifier la voie de production ayant la plus faible demande d'énergie ou générant moins d'émissions de CO₂. La demande d'énergie primaire et les émissions de CO₂ liées aux deux approches de fabrication ont été modélisées pour toutes les phases du cycle de vie (Figure 2.27). Le résultat principal de ce travail est un critère pour sélectionner le procédé de fabrication le plus respectueux de l'environnement.

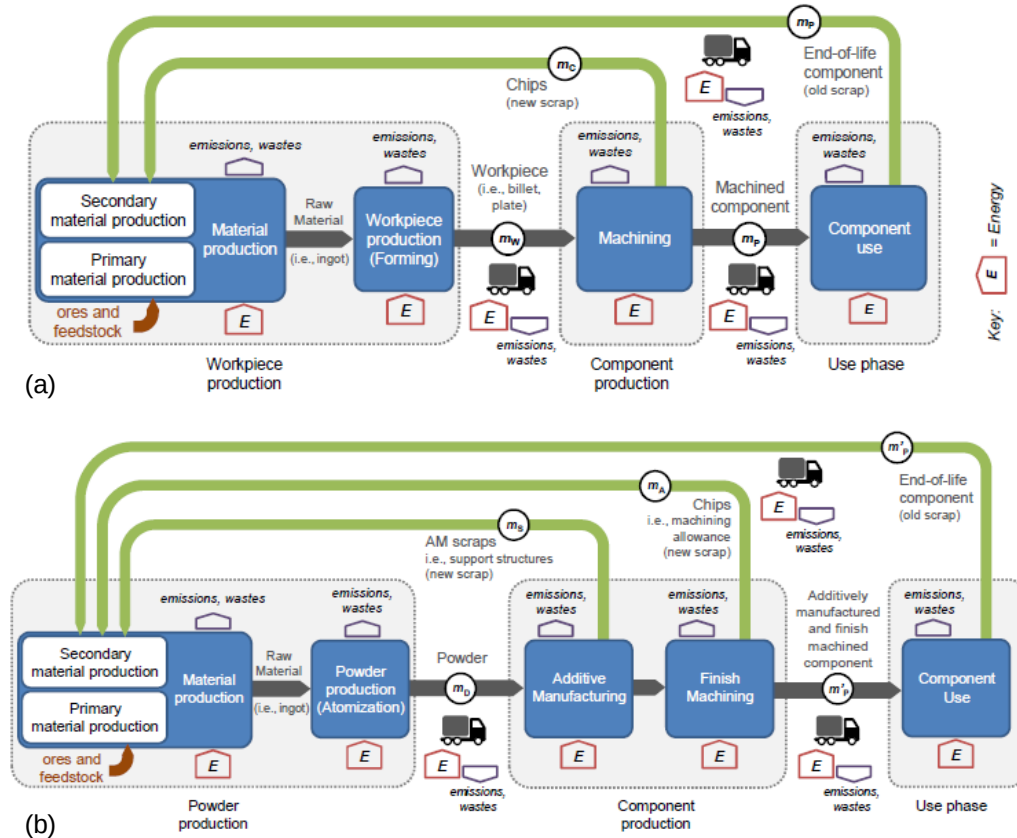


Figure 2.27. Les principaux flux dans la production des pièces par (a) l'usinage et (b) par la combinaison de la fabrication additive et d'usinage (Priarone and Ingarao, 2017).

2.5 Synthèse de l'étude bibliographique

Ce chapitre nous a permis de réaliser l'état de l'art concernant les étapes pour développer une nouvelle stratégie du remanufacturing ayant la possibilité de donner une nouvelle vie aux pièces/composants à fin de vie. L'ensemble des parties du chapitre sont liées aux questions de recherche que nous avons proposées dans le premier chapitre.

Dans la première partie, les connaissances des procédés de fabrication additive métallique ainsi que les matériaux disponibles utilisés pour ces procédés sont soulignés. En particulier, les procédés appartenant à deux familles de fabrication additive métallique (PBF et DED) sont étudiés. Leurs connaissances sont très importantes pour les concepteurs et les fabricants qui développent des stratégies de la fabrication.

Dans la deuxième partie, nous avons montré la nécessité de combiner la fabrication additive avec l'usinage à commande numérique. Cette solution est essentielle en raison du fait qu'un processus de fabrication lui-même ne permet pas de réaliser un produit fini. De plus, cette combinaison permet de profiter des avantages des technologies individuelles tout en minimisant leurs inconvénients. Dans le contexte du remanufacturing, la combinaison des procédés additifs et soustractifs a montré sa performance pour réparer ou remanufacturer les composants en fin de vie. Cela nous permet de penser à une nouvelle approche de récupération des pièces en fin de vie pour produire de nouvelles pièces.

La troisième partie a porté sur les approches et les méthodes utilisées pour la planification des procédés soustractifs et additifs. Pour les procédés soustractifs (c'est-à-dire l'usinage), la conception de gammes de fabrication est abordée par de nombreuses études. De nombreux systèmes CAPP permettent aujourd'hui de générer des gammes d'usinage de façon semi-automatique. Ces systèmes sont développés en s'appuyant sur le concept d'entité d'usinage. Par contre, les études menées sur la gamme de fabrication pour les procédés additifs restent limitées. La raison est que les techniques de fabrication offrent une capacité à produire des pièces avec un nombre limité d'opération, la planification des opérations de fabrication ne semble donc pas nécessaire. De même, la planification des processus de fabrication combinant des procédés additifs et soustractifs reste limitée à la réparation ou au remanufacturing des composants usagés (comme les aubes de la turbine, les moules, etc.). Pour aller plus loin et envisager la réutilisation des pièces en fin de vie, une méthode pour concevoir les gammes de fabrication combinant les opérations additives et soustractives est à développer. Pour cela, les approches existantes sont intéressantes car nous pouvons nous appuyer sur les connaissances et les guidelines pour développer la gamme de fabrication attendue. En particulier, les travaux de (Zhu et al., 2017, 2013) qui portent sur la transformation d'une pièce plastique existante en une nouvelle pièce grâce à la combinaison des procédés additifs (le procédé FFF) et soustractifs

(l'usinage à commande numérique) sont très intéressants pour notre étude. Cependant, leurs travaux sont limités à la fabrication de pièces plastiques.

Pour finir, la quatrième partie du chapitre présente les outils permettant d'évaluer les impacts environnementaux des procédés additifs et soustractifs. Globalement, la méthode ACV est particulièrement utilisée dans les travaux publiés. De plus, afin d'évaluer complètement les impacts sur l'environnement du processus de fabrication, il est nécessaire de prendre en considération l'ensemble des flux (l'énergie, la matière et les autres consommables telles que les gaz dans le procédé d'atomisation, etc.). La stratégie envisagée dans notre étude combine les procédés additifs et soustractifs pour fabriquer une pièce finie à partir d'une pièce en fin de vie. Certains modèles développés dans les travaux précédents peuvent être appliqués pour estimer la consommation d'énergie et de ressources durant le processus de fabrication. Enfin, les méthodologies proposées par (Paris et al., 2016; Priarone and Ingarao, 2017; Serres et al., 2011) sont également intéressantes pour évaluer les impacts environnementaux des procédés additifs et comparer la performance environnementale entre les procédés additifs et l'usinage.

2.6 Proposition de la stratégie soutenable et la procédure de recherche

2.6.1 Principe de la stratégie

Afin de réutiliser efficacement les ressources et de réduire les impacts environnementaux, la stratégie attendue consiste à combiner les procédés additifs, soustractifs et l'inspection, ainsi que le traitement thermique pour transformer directement une pièce métallique en fin de vie (ou une pièce métallique existante) en une nouvelle pièce, sans passer par la phase de recyclage des matières (Figure 2.28). La pièce obtenue est destinée à un autre produit, c'est-à-dire que la stratégie donne une nouvelle vie ou de nouveaux usages à la pièce métallique en fin de vie (Le et al., 2015).

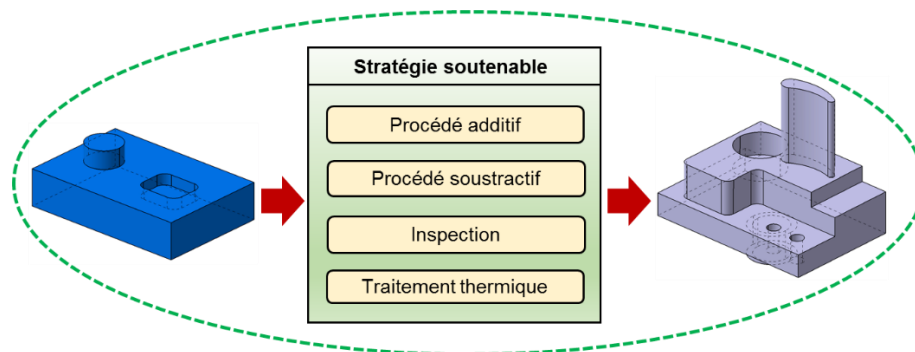


Figure 2.28. Principe de la stratégie.

La stratégie permet donc d'une part de réduire les déchets, et d'autre part, de conserver une part significative de l'énergie consommée et de la valeur ajoutée durant le processus de

fabrication de la pièce originale. De plus, comme nous l'avons indiqué dans les chapitres précédents, la combinaison des procédés additifs et soustractifs permet de profiter des avantages et des performances des procédés individuels tout en minimisant leurs limitations.

En comparaison avec les approches de remanufacturing des composants usagés proposées par (Nan et al., 2010; Navrotsky et al., 2015; Rickli et al., 2014; Wilson et al., 2014), où les travaux portant sur la restauration des fonctionnalités et des performances originales des composants en fin de vie, la stratégie attendue permet de conserver une part importante de la matière de la pièce existante pour produire une nouvelle pièce. La stratégie attendue est également élargie aux pièces métalliques.

2.6.2 Processus général compatible avec la stratégie

La Figure 2.29 représente le processus général compatible avec la stratégie attendue. Ce processus consiste en trois phases principales : le prétraitement, le traitement et le post-traitement.

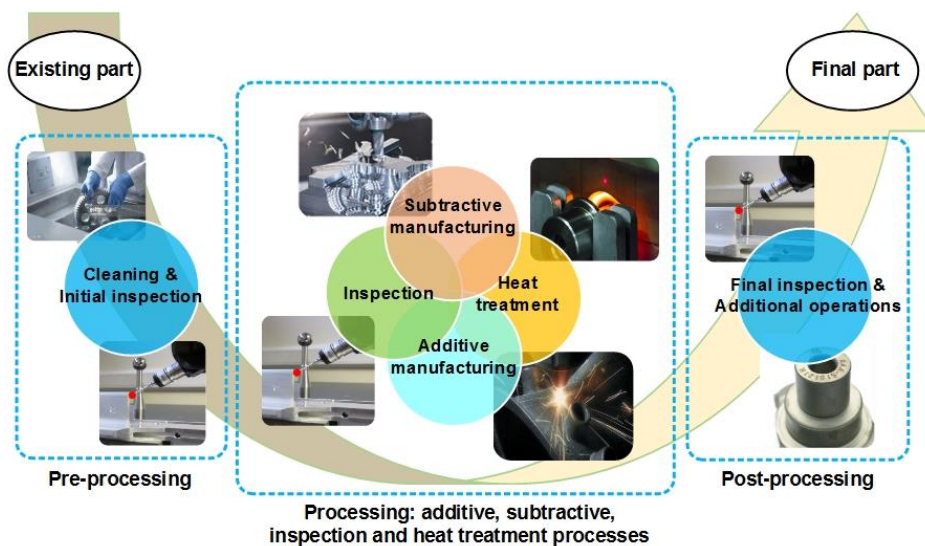


Figure 2.29. Vision du processus général de la stratégie.

2.6.2.1 Prétraitement. Dans cette phase, la pièce extraite à partir d'un produit en fin de vie (ou la pièce existante) est nettoyée. Puis, sa géométrie actuelle et ses dimensions sont obtenues par un système de mesure. Le modèle CAO de la pièce existante est alors généré à l'aide d'un logiciel CAO. Les informations disponibles et les modèles CAO de la pièce existante et de la pièce finale sont utilisés comme données entrées pour la phase de traitement.

2.6.2.2 Traitement. La phase de traitement est le cœur de la stratégie. Il s'agit de la conception de gammes de fabrication combinant des procédés additifs, soustractifs d'inspection, ainsi que le traitement thermique. A partir des informations disponibles, les gammes de fabrication sont conçues en s'appuyant sur les connaissances des procédés de

fabrication additive et soustractive, les exigences technologiques et les ressources disponibles (les machines-outils, les machines de fabrication additive, les dispositifs de posage et de bridage). La séquence des opérations additives, soustractives permet d'atteindre la géométrie et la qualité attendue de la pièce finale.

Les opérations d'inspection sont mises en place pour réhabiliter la séquence des opérations. Cela garantit les dimensions et la surface finie de la pièce fabriquée et évite ainsi les déchets.

Le traitement thermique est également considéré dans la phase de traitement. Dans certains cas, le traitement thermique est nécessaire pour atteindre la qualité attendue (par exemple, les microstructures, la densité et les propriétés mécaniques), ou pour réduire les contraintes résiduelles et la déformation thermique des pièces après les opérations additives.

2.6.2.3 Post-traitement. La phase de post-traitement comprend les opérations d'inspection finale et les opérations additionnelles (telles que le marquage, etc.). L'inspection finale garantit que toutes les spécifications requises de la pièce finale sont respectées.

2.6.3 Contour de l'étude et la procédure de recherche

2.6.3.1 Contour de l'étude. Dans le cadre de la thèse, nous nous concentrons particulièrement la phase de traitement (Figure 2.29). Nous supposons que ***la pièce existante a été identifiée et extraite à partir des produits en fin de vie pour produire la pièce visée (la pièce finale)***. C'est-à-dire que les informations sur la pièce existante et la pièce finale sont disponibles. La procédure et des critères pour déterminer les pièces en fin de vie les plus pertinentes pour produire la pièce finale sont hors du cadre de cette étude. Cela sera étudié dans les travaux futurs.

De plus, la stratégie vise à traiter des pièces/composants métalliques. Les procédés additifs métalliques (PBF et DED), qui utilisent de la poudre métallique comme la matière d'entrée, sont utilisés pour effectuer les opérations additives. Grâce à la performance de l'usinage à commande numérique (*CNC machining*), cette technique est souvent utilisée pour la finition des pièces réalisées par la fabrication additive (Gibson et al., 2010). Elle est donc appliquée dans cette étude pour obtenir la qualité surfacique et dimensionnelle de la pièce finale et pour enlever de la matière sur la pièce existante avant les opérations additives. Nous supposons également que les machines-outils à commande numérique, les machines de fabrication additive, ainsi que les dispositifs de posage et de bridage sont disponibles pour la conception de gammes de fabrication.

2.6.3.2 Procédure de recherche. Les travaux principaux menés dans la thèse se concentrent sur les questions de recherche soulignées dans le premier chapitre. Ils sont réalisés dans l'ordre suivant :

(1) Etude sur la faisabilité et la santé de matière des pièces obtenues par cette stratégie.

Cette étude expérimentale a pour objectif d'étudier la faisabilité et la santé de matière des pièces obtenues via la stratégie. Le matériau de ces pièces doit être « sain » et compatible avec les applications industrielles. C'est-à-dire que les microstructures et les propriétés mécaniques sont comparables ou meilleures par rapport à celles des pièces fabriquées par la stratégie conventionnelle (par exemple, l'usinage à partir des pièces brutes obtenues par fonderie ou forgeage).

La machine de fabrication additive EBM, le modèle A1, installée sur la plateforme GINOVA de l'AIP-PRIMECA Dauphiné Savoie à Grenoble, est utilisée pour ajouter des entités sur des pièces existantes. En s'appuyant sur la plateforme expérimentale du laboratoire SIMAP, les études sur les microstructures et les propriétés mécaniques des pièces obtenues sont effectuées.

(2) Conception de gammes de fabrication combinant les opérations additives et soustractives. La conception de gammes de fabrication combinant les opérations additives et soustractives pour transformer directement la pièce existante en pièce finale est le cœur de mes travaux de thèse. La gamme de fabrication est élaborée en deux étapes : (i) à partir des informations disponibles de la pièce existante et de la pièce finale, les entités de fabrication additive et soustractive sont identifiées et extraites ; et (ii) la séquence des opérations additives et soustractives sont élaborée à partir des entités extraites en respectant les relations entre les entités, les règles de fabrication, tout en allouant les ressources.

(3) Evaluation de performances environnementales. La dernière partie consiste à évaluer la performance environnementale de la stratégie et à comparer la stratégie attendue avec la stratégie de fabrication traditionnelle du point de vue environnemental et énergétique. Pour cela, une méthodologie d'évaluation des impacts environnementaux s'appuyant sur la méthode ACV est développée. Les guidelines pour choisir la stratégie raisonnable pour fabrication des pièces à partir des pièces existantes sont proposés en analysant des résultats de l'étude.

Ces travaux sont présentés concrètement dans les chapitres 3, 4 et 5 de ce manuscrit.

Chapitre 3 Faisabilité de l'ajout de nouvelles entités sur une pièce existante par les procédés additifs métalliques

3.0 Introduction

Le travail réalisé dans ce chapitre a pour objectif de répondre à la première question de recherche : « *Est-il possible de déposer de la matière sur une pièce existante en utilisant les techniques de fabrication additive pour obtenir la nouvelle pièce avec une bonne santé matière ?* »

Dans la première partie, les caractéristiques des matériaux fabriqués par les techniques de fabrication additive métallique sont synthétisées à partir des travaux existants dans la littérature. Ensuite, la deuxième partie introduit les travaux portant sur l'ajout de nouvelles entités sur un substrat existant via les techniques de fabrication additive. La troisième partie est consacrée à présenter notre étude expérimentale afin de confirmer la faisabilité du procédé EBM pour construire de nouvelles entités sur une base existante. Pour finir, la quatrième partie adresse la conclusion du chapitre.

Les résultats obtenus dans ce chapitre sont également présentés dans l'article suivant (Mandil et al., 2016) :



Mandil G., Le V.T., Paris H., Suard M. Building new entities from existing titanium part by electron beam melting: microstructures and mechanical properties. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2016; 85:1835–46. doi:10.1007/s00170-015-8049-3.

3.1 Caractéristiques des matériaux utilisés en fabrication additive métalliques

La métallurgie et les propriétés mécaniques du matériau sont les caractéristiques importantes d'une pièce fabriquée par un procédé de fabrication. Concernant les procédés additifs métalliques, de nombreuses études sont réalisées pour caractériser les matériaux utilisés par ces procédés. Dans cette partie, une synthèse sur les caractéristiques des matériaux utilisés par les procédés PBF et DED est présentée. Nous nous intéressons tout particulièrement aux revues publiées par (Herzog et al., 2016; Körner, 2016; Sing et al., 2016). Ces revues très intéressantes nous permettent d'explorer les caractéristiques de différents matériaux fabriqués par ces techniques. Cependant, nous focalisons notamment sur les caractéristiques de l'alliage Ti-6Al-4V. Ce matériau est utilisé largement dans les procédés additifs métalliques et dans notre étude expérimentale. Les données publiées dans la littérature sont très intéressantes car nous pouvons les utiliser comme références pour vérifier les résultats obtenus dans notre travail.

3.1.1 Microstructure des pièces fabriquées par fabrication additive

Généralement, la microstructure d'une pièce fabriquée par les procédés additifs métalliques est le résultat du cycle thermique complexe durant le processus de fabrication. Ce cycle thermique comprend :

- (i) le chauffage rapide au-dessus de la température de fusion due à l'absorption d'énergie du faisceau laser ou d'électrons et sa transformation en chaleur ;
- (ii) la solidification rapide de la matière fondue après le passage de la source de chaleur ;
- (iii) les cycles de réchauffage et de refroidissement correspondants à la réalisation des couches suivantes (Herzog et al., 2016).

En conséquence, la plupart des procédés additifs métalliques conduisent à des microstructures métastables. Indépendamment du matériau, une structure ayant des grains plus fins est habituellement observée pour les matériaux traités par ces procédés en comparaison avec les procédés conventionnels, par exemple la fonderie et le forgeage (Gong et al., 2014).

Le matériau utilisé durant les travaux de la thèse est l'alliage Ti-6Al-4V. Il est composé majoritairement de titane avec 6% en masse d'aluminium et 4% en masse de vanadium. Cet alliage permet une coexistence des phases α et β à la température ambiante. La généralité sur les microstructures de Ti-6Al-4V peut être trouvée dans l'Annexe B de ce manuscrit.

La Figure 3.1 présente les microstructures de cet alliage issues du forgeage (Figure 3.1a-b) et des procédés additifs métalliques EBM, SLM et DMD (Figure 3.1c-d-e). Nous constatons

que les procédés additifs permettent d'obtenir une microstructure avec des grains plus fins par rapport à celle du matériau issu du forgeage.

Le Ti-6Al-4V forgé à 640°C montre une microstructure présentant une phase α aciculaire avec de petite quantité de phase β dans les contours de la phase α (Figure 3.1a). Si le Ti-6Al-4V est forgé à 950°C puis refroidi à l'air et recuit à 700°C pendant deux heures, la microstructure présente un mélange ($\alpha + \beta$) équiaxe et un peu de phase α aciculaire grossière (Figure 3.1b). Tandis que la microstructure de Ti-6Al-4V obtenue en EBM présente des grains β grossiers transformés en une morphologie α lamellaire fine avec une faible fraction volumique de phase β restante (Figure 3.1c) (Murr et al., 2009a).

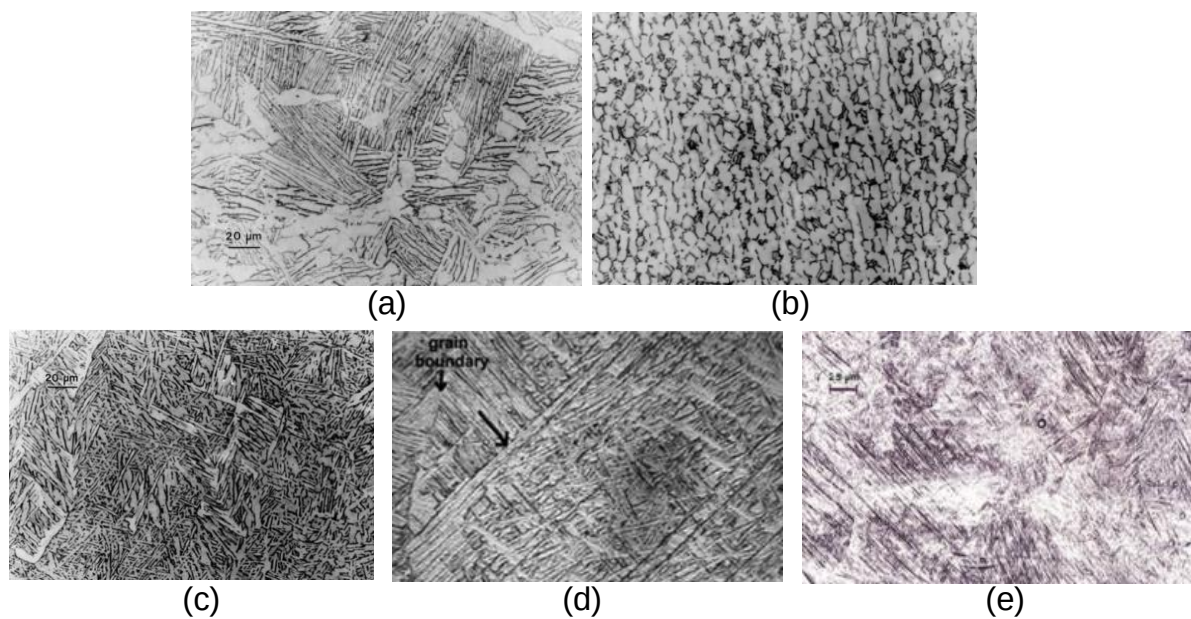


Figure 3.1. Microstructures des éprouvettes Ti-6Al-4V: (a) forgées à 640°C, (b) forgées à 950°C puis refroidi à l'air et recuit à 700°C, (c) obtenues en EBM, (d) en DMD (Herzog et al., 2016) et (e) en SLM (Murr et al., 2009a).

En EBM, l'alliage Ti-6Al-4V est maintenu à 700°C. On observe donc également une structure recuite ($\alpha + \beta$) assez fine. Au début, les grains colonnaires β sont formés soit à partir de la plaque de base, soit à la surface de la pièce pendant la solidification du matériau avec une taille beaucoup plus grande que l'épaisseur des couches de poudre. Comme la température de fabrication est du même niveau que la température de début de transformation martensitique (M_s), Figure 3.2, la phase β peut soit se transformer sans diffusion en phase martensitique α' (si au-dessous de M_s), qui ensuite se décompose en phase α , soit se transforme en phase α avec une diffusion (si au-dessus de M_s) (Antony et al., 2013).

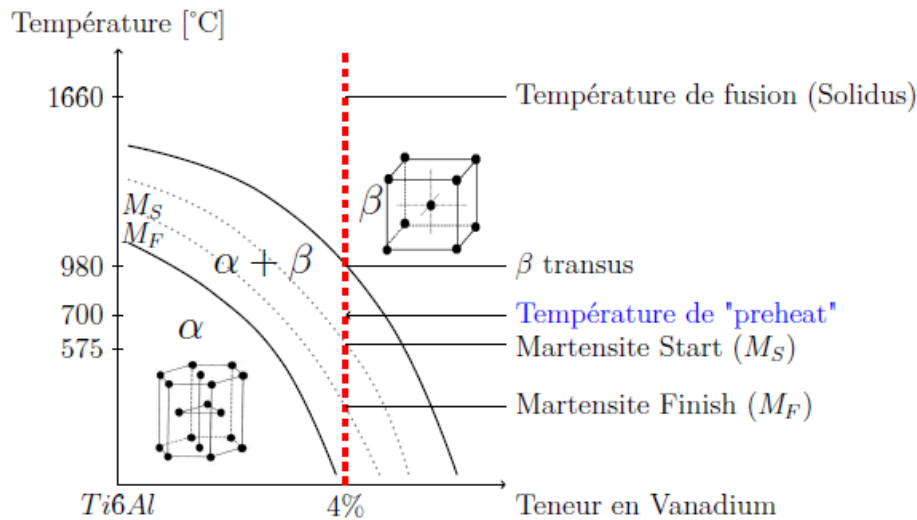


Figure 3.2. Diagramme de phase pseudo-binaire de l'alliage Ti-6Al-4V (Suard, 2015).

De même, la microstructure d'une pièce en Ti-6Al-4V obtenue en DED présente également des grains β colonnaires. Comme l'épaisseur des couches appliquées dans ce procédé est élevée, les grains β se développent naturellement sur des substrats cristallins et s'étendent sur plusieurs couches (Figure 3.1d).

En revanche, cet alliage obtenu en SLM présente une microstructure avec des plaques fines de martensite α' (Figure 3.1e). Avec ce procédé, le refroidissement plus rapide conduit à une transformation $\beta \rightarrow \alpha'$ (Murr et al., 2009a). La microstructure d'une pièce en Ti-6Al-4V obtenue en SLM a des grains plus fins par rapport à ceux obtenus en EBM et DMD.

Les paramètres des procédés additifs métalliques (PBF et DED) influencent fortement sur la microstructure du matériau. (Xu et al., 2015) étudient l'influence des paramètres du procédé SLM (tels que l'épaisseur des couches, la distance focale et la densité d'énergie) sur la microstructure des pièces en Ti-6Al-4V. Les auteurs trouvent qu'avec des paramètres optimisés, il est possible de décomposer la phase grossière de martensite α' en une microstructure beaucoup plus ductile ($\alpha + \beta$). Ceci permet d'éviter un traitement thermique ultérieur.

De plus, la microstructure des pièces fabriquées par les procédés additifs est anisotrope dans la direction de construction par rapport à sa direction orthogonale (Figure 3.3). Elle révèle souvent une anisotropie plus ou moins visible (Herzog et al., 2016; Thijs et al., 2010).

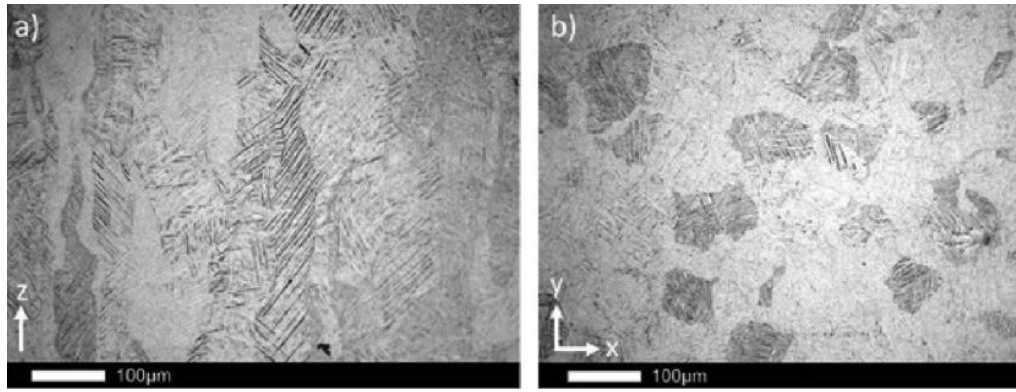


Figure 3.3. Microstructures d'une pièce en Ti-6Al-4V obtenue en SLM : (a) dans la direction de construction (Z), et (b) dans le plan perpendiculaire à la direction de construction (Herzog et al., 2016).

3.1.2 Propriétés mécaniques des matériaux

En général, les propriétés mécaniques du matériau dépendent de la densité des pièces (présence de porosité), ainsi que de la microstructure issue du processus de fabrication additive. Une densité de 99.5% peut être obtenue via les procédés additifs métalliques en optimisant et contrôlant les paramètres de ces procédés, en particulier l'énergie apportée par le faisceau laser ou d'électrons (Herzog et al., 2016).

Comme nous l'avons vu précédemment, la microstructure des pièces fabriquées par les procédés additifs métalliques est plus fine par rapport à celle des pièces fabriquées par les procédés conventionnels (la fonderie ou le forgeage). Par conséquent, les pièces fabriquées par les procédés additifs métalliques ont une résistance mécanique plus élevée.

En ce qui concerne la dépendance de la limite d'élasticité sur la taille moyenne des grains, on a constaté que la limite d'élasticité des éprouvettes fabriquées en fabrication additive métallique respecte la relation de Hall-Petch (Eq. 3-1).

$$\sigma_c = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}} \quad (\text{Eq. 3-1})$$

Où σ_c désigne la limite d'élasticité, d est la taille des grains, σ_0 et k sont des constantes. Une microstructure à grains fins conduit à de meilleures propriétés mécaniques. Ceci a été montré par (Xu et al., 2015) dans le cas de la microstructure lamellaire ($\alpha + \beta$) d'une pièce en Ti-6Al-4V fabriquée en SLM.

A partir des données issues de la littérature et synthétisées dans le Tableau 3.1, les éprouvettes (Ti-6Al-4V) fabriquées par les procédés additifs ont une résistance en traction plus élevée que celles obtenues par des procédés conventionnels (la fonderie ou le forgeage).

Les procédés SLM (ou LBM - *laser beam melting*), EBM et LMD (*laser metal deposition*, par exemple DMD) permettent d'atteindre ou même de dépasser la limite

d'élasticité (YS , *yield strength*) et la limite de la résistance à la traction (UTS , *ultimate tensile strength*) d'après la spécification ASTM des matériaux moulés ou forgés, qui sont habituellement appliqués dans l'industrie.

Tableau 3.1. Les propriétés mécaniques (issues d'essais de traction) du titane en fonction de la microstructure générées par les procédés additifs métalliques (Herzog et al., 2016).

Alloy	Process	Reported by	Condition	Microstructure	YS [MPa]	UTS [MPa]	EL [%]
cp Ti (grade 2)	Sheet metal	Bajoraitis [138]	AF	α	280	345	20
	LBM	Attar et al. [91]	AF	Refined α'	555 $\pm$ 3 ^a	757 $\pm$ 12.5 ^a	19.5 $\pm$ 1.8 ^a
		Barbas et al. [92]	AF	/	522 $\pm$ 18 ^a	654 $\pm$ 1.5 ^a	17.0 $\pm$ 3 ^a
Ti-6Al-4V	EBM	Yamanaka et al. [93]	AF	Lath-shaped α (decomposed α')	533 $\pm$ 2.1 ^b	617 $\pm$ 16.7 ^b	5.1 $\pm$ 2.1 ^b
		ASTM F1108 [139]	/	/	377 $\pm$ 10 ^b	475 $\pm$ 15 ^b	28.5 $\pm$ 0.5 ^b
		Donachie [140]	AF	/	758	860	>8
	Wrought	ASTM F1472 [141]	/	/	896	1000	8
		Donachie [140]	β -ST	$\alpha + \beta$ colony	860	930	>10
			STA	α +tempered α'	931	1055	9
	LBM	Facchini et al. [98]	AF	Acicular α'	1100	1170	12
		Koike et al. [99]	AF	$\alpha + \alpha'$	1040 $\pm$ 10 ^b	1140 $\pm$ 10 ^b	8.2 $\pm$ 0.3 ^b
		Rafi et al. [100]	AF	Fine α' in columnar prior- β	840 ^a	930 ^a	6.8 ^a
					1143 $\pm$ 30 ^a	1219 $\pm$ 20 ^a	4.89 $\pm$ 0.6 ^a
					1195 $\pm$ 19 ^b	1269 $\pm$ 9 ^b	5 $\pm$ 0.5 ^b
					1137 $\pm$ 20 ^a	1206 $\pm$ 8 ^a	7.6 $\pm$ 2 ^a
		Vilaro et al. [26]	AF	Fine acicular α'	962 $\pm$ 47 ^b	1166 $\pm$ 25 ^b	1.7 $\pm$ 0.3 ^b
			SR (730 °C/2 h)	$\alpha + \beta$ with residual α'	965 $\pm$ 16 ^a	1046 $\pm$ 6 ^a	9.5 $\pm$ 1 ^a
			HT< β_T + WQ (950 °C/1 h) + TE AC (700 °C/2 h)	Columnar $\alpha' + \beta_m + \alpha$	900 $\pm$ 101 ^b	1000 $\pm$ 53 ^b	1.9 $\pm$ 0.8 ^b
			HT> β_T + WQ (1050 °C/1 h) + TE AC (820 °C/2 h)	Equiaxed $\alpha' + \beta_T + \alpha$	944 $\pm$ 8 ^a	1036 $\pm$ 30 ^a	8.5 $\pm$ 1 ^a
					925 $\pm$ 14 ^b	1040 $\pm$ 4 ^b	7.5 $\pm$ 2 ^b
		Xu et al. [96]	AF	Acicular α'	1000 ^a	1150 ^a	8.5 ^a
			in-situ HT	Ultrafine lamellar $\alpha + \beta$	1160 ^a	1240 ^a	11.5 ^a
		Qiu et al. [97]	HIP (920 °C/103 MPa/4 h)	$\alpha + \beta$	980 $\pm$ 30 ^a	1040 $\pm$ 30 ^a	12.5 $\pm$ 0.5 ^a
					900 $\pm$ 5 ^b	990 $\pm$ 5 ^b	15.5 $\pm$ 2 ^b
	EBM	Wycisk et al. [95]	SR (650 °C/3 h)	Ultrafine lamellar $\alpha + \alpha'$ in prior- β	1076 $\pm$ 14 ^a	1189 $\pm$ 16 ^a	13.6 $\pm$ 1.3 ^a
			HIP (920 °C/100 MPa/2 h)	Fine $\alpha + \beta$	907 $\pm$ 4 ^a	1022 $\pm$ 5 ^a	17.7 $\pm$ 0.8 ^a
		Murr et al. [94]	AF	Coarse α -plates	1115 ^a	1120 ^a	25 ^a
			AF	Fine & coarse α -plates	1110 ^a	1115 ^a	16 ^a
		Rafi et al. [100]	AF	Lamellar α with β on the boundary	869 $\pm$ 7.2 ^a	928 $\pm$ 9.8 ^a	9.9 $\pm$ 1.7 ^a
					899 $\pm$ 4.7 ^b	978 $\pm$ 3.2 ^b	9.5 $\pm$ 1.2 ^b
		Tan et al. [35]	AF	Rods of retained β in continuous α	823.4 $\pm$ 0.1 ^c	940.5 $\pm$ 6.5 ^c	13.2 $\pm$ 0.7 ^c
					851.8 $\pm$ 5.8 ^d	964.5 $\pm$ 0.3 ^d	16.3 $\pm$ 0.8 ^d
		Zhai et al. [102]	AF	Fine $\alpha + \beta$ lamellae	1001 ^a	1073 ^a	11 ^a
					1006 ^b	1066 ^b	15 ^b
	LMD		STA	/	1039	1294	10
		Carroll et al. [2]	AF	Acicular α in columnar prior- β with grain boundary α	945 $\pm$ 13 ^c	1041 $\pm$ 12 ^c	18.7 $\pm$ 1.7 ^c
					970 $\pm$ 17 ^d	1087 $\pm$ 8 ^d	17.6 $\pm$ 0.7 ^d
Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si	LMD	Yu et al. [101]	AF	Acicular α'	960 $\pm$ 26 ^b	1063 $\pm$ 20 ^b	13.3 $\pm$ 1.8 ^b
		Zhai et al. [102]	AF	$\alpha' + \alpha$ in prior- β	976 $\pm$ 24 ^b	1099 $\pm$ 2 ^b	4.9 $\pm$ 0.1 ^b
		Ren et al. [104]	AF	α lath + α colony	990 ^b	1042 ^b	7 ^b

AF: as fabricated, HT: Heat treated, SR: Stress relieved, WQ: Water quenched, TE: Tempered, AC: Air cooled, ST: Solution Treated, STA: Solution treated and aged.

^a In build direction.

^b Orthogonal to build direction.

^c Upper part of graded structure.

^d Lower part.

Dans les conditions de fabrication normales et sans post-traitement thermique, les éprouvettes fabriquées par EBM montrent des valeurs plus élevées de l'allongement. Ceci est dû à la température du préchauffage pour assurer la consolidation de la poudre. Tandis que les éprouvettes obtenues en SLM ont une résistance mécanique très élevée et un allongement inférieur. Cependant, un traitement thermique adéquat peut transformer la microstructure et conduire à une ductilité améliorée. La limite élastique (YS) d'une éprouvette obtenue en LMD est inférieure par rapport à celle obtenue en SLM ou EBM. La raison est que la vitesse de refroidissement dans le procédé LMD est inférieure à celle des procédés SLM et EBM.

En plus de la microstructure, l'oxygène est connu comme un facteur important dans l'augmentation de la résistance et la réduction de la ductilité du matériau. Une petite variation de la composition chimique peut également conduire à une variation des propriétés mécaniques.

3.2 Ajout de nouvelles entités sur une pièce existante en fabrication additive métallique

Plusieurs études sont également réalisées sur l'observation des caractéristiques mécaniques et métallurgiques des pièces, qui sont le résultat de l'ajout de nouvelles entités sur une base existante via les procédés additifs métalliques. Ces études ont pour objectif de valider la faisabilité des techniques additives pour la réparation ou le remanufacturing des composants ou pour la fabrication de composants multi-matériaux. Nous citons dans cette partie certaines études qui nous permettent d'identifier les pistes pour notre étude expérimentale.

Dans le contexte de réparation/remanufacturing des composants par les procédés DED, (Cottam and Brandt, 2011) réalisent une étude sur la possibilité d'ajouter de nouvelles entités Ti-6Al-4V sur un substrat Ti-6Al-4V existant en utilisant le procédé CLAD. En observant les microstructures et la dureté des éprouvettes sur trois zones, c'est-à-dire la zone ajoutée par le procédé CLAD, la zone du substrat et la zone à l'interface affectée thermiquement, les auteurs déterminent les paramètres du procédé permettant d'obtenir une bonne liaison mécanique entre les entités ajoutées et le substrat existant.

De même, (Dutta and Froes, 2015) montrent la capacité du procédé DMD, qui offre une zone minimale affectée par la chaleur (ou *heat-affected zone*, HAZ) à réparer ou remanufacturer des composants métalliques. L'épaisseur de la zone HAZ est environ de 360 (μm) dans le cas de la réparation des aubes de turbine (Figure 3.4). Le procédé DMD produit aussi une microstructure plus fine dans la zone réparée par rapport à la zone originale de l'aube. Les auteurs concluent que les techniques DED sont particulièrement adaptées à la réparation, ainsi qu'au remanufacturing des composants de hautes valeurs (par exemple les aubes de turbines, les moules et les matrices). Grâce à la configuration flexible en utilisant une machine-outil 5 axes, ces techniques sont appliquées avec succès dans le contexte de la réparation et du remanufacturing.

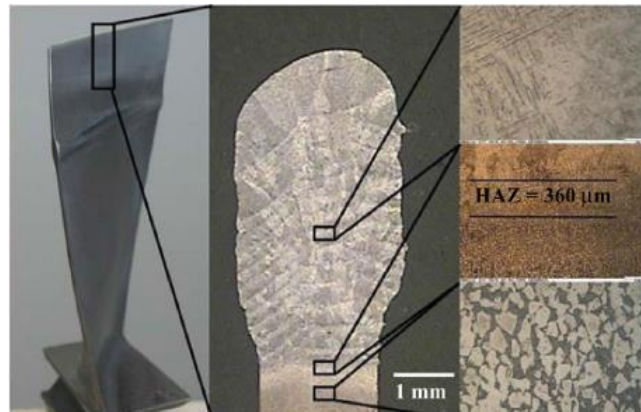


Figure 3.4. La réparation des aubes de turbine en Ti-6Al-4V en DMD : l'aube réparée (à gauche), la macro de la section (au milieu) et les microstructures dans les trois zones (à droite) : la zone réparée en haut, la HAZ au milieu et la microstructure d'origine de l'aube en bas (Dutta and Froes, 2015).

Dans le contexte de fabrication des composants multi-matériaux, (Terrazas et al., 2014) réussissent à construire un cylindre bi matière (en titane ou en cuivre) via le procédé EBM. En observant les microstructures et la micro-dureté des éprouvettes, les auteurs prédissent une bonne liaison métallurgique à l'interface entre la partie titane et le cuivre ajouté en EBM. Cependant, ces résultats ne sont pas encore validés par des essais permettant de déterminer les propriétés mécaniques.

(Liu et al., 2014a) et (Sing et al., 2015) utilisent le procédé SLM pour fabriquer des pièces multi-matériaux (par exemple, *316L stainless steel* et *C18400 copper alloy*). A travers les études sur les microstructures et les propriétés mécaniques (telles que les propriétés en traction et en flexion), les auteurs démontrent l'existence d'une bonne liaison mécanique à l'interface entre les deux matériaux.

A partir de ces travaux, nous pouvons conclure que les techniques additives métalliques montrent une faisabilité significative pour les applications dans le contexte de réparation/remanufacturing des composants, ainsi que pour ajouter de nouvelles entités sur une base existante pour obtenir une nouvelle pièce. Les pièces réparées ou remanufacturées par ces techniques présentent une bonne qualité métallurgique et comparable aux spécifications initiales.

3.3 Ajout de nouvelles entités sur un substrat existant par EBM

Dans cette partie, nous appliquons la même méthode expérimentale utilisée dans les travaux ci-dessus pour valider le principe de la stratégie en retenant le procédé EBM. Les éprouvettes sont fabriquées en ajoutant de nouvelles entités sur des pièces existantes. Les microstructures et la dureté des éprouvettes sont observées dans la zone fabriquée en EBM, la

zone de la pièce existante et la zone affectée par la chaleur (HAZ). Les essais de traction sont également réalisés pour vérifier les propriétés mécaniques. Ceux-ci nous permettent de confirmer que la liaison mécanique entre les entités ajoutées et la pièce existante est bonne et les caractéristiques de la nouvelle pièce obtenue d'après cette façon sont en adéquation avec les applications industrielles.

3.3.1 Matériaux et méthode expérimentale

Dans cette étude, la machine EBM (le modèle A1 de l'Arcam®) installée sur la plateforme GINNOVA de l'AIP-PRIMECA Dauphiné Savoie à Grenoble, est utilisée pour fabriquer les éprouvettes. Le système EBM et son principe de fabrication sont décrits en détail dans le chapitre 2.

L'alliage de titane (Ti-6Al-4V) sous forme de poudre est utilisé pour créer de nouvelles entités sur les bases existantes en titane. Cette poudre est fournie par la compagnie Arcam. Les compositions chimiques de la poudre correspondent à la spécification ASTM de l'alliage Ti-6Al-4V forgé (Tableau 3.2). La taille des particules est distribuée dans l'intervalle de 40 (μm) à 120 (μm), avec une taille moyenne de 70 (μm).

Tableau 3.2. Compositions chimiques de l'alliage Ti-6Al-4V d'après la spécification ASTM F1472.

Elément	Al	V	C	Fe	O	N	H	Ti
% en masse	5.5 - 6.75	3.5 - 4.5	< 0.1	< 0.3	< 0.2	< 0.05	< 0.015	restant

En outre, deux plaques laminées de Ti-6Al-4V ayant comme dimensions de (150 mm x 150 mm x 25 mm) sont utilisées comme pièces existantes, sur lesquelles les nouvelles entités sont ajoutées. Une plaque est utilisée pour fabriquer l'éprouvette pour observer les microstructures. Une autre est utilisée pour fabriquer l'éprouvette pour l'essai de traction.

3.3.2 Fabrication des éprouvettes

Afin d'étudier les microstructures et la dureté, cinq parallélépipèdes rectangles ayant comme dimensions 7 mm x 2 mm x 15 mm sont construits sur une plaque (Figure 3.5a). Pour l'essai de traction, une entité spécifique ayant une géométrie adaptée pour cet essai est ajoutée sur la deuxième plaque (Figure 3.5b). Les dimensions de l'entité pour l'observation des propriétés en traction sont 6 mm x 2 mm x 15 mm.

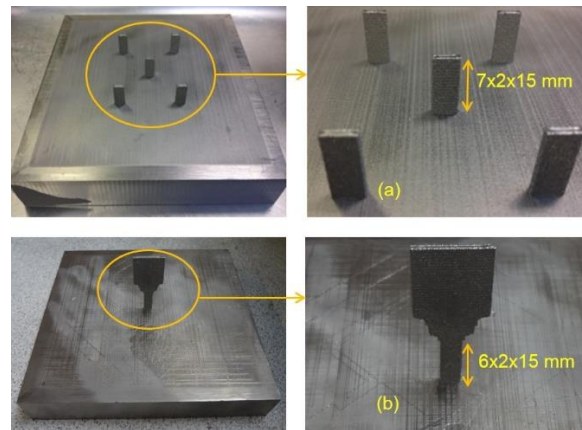


Figure 3.5. Eprouvettes pour (a) l'observation des microstructures et (b) pour l'essai de traction.

Dans cette étude, les paramètres usuels du procédé EBM sont utilisés pour fabriquer ces éprouvettes. Le processus de fabrication de ces éprouvettes est décrit comme le suivant.

Tout d'abord, une plaque est positionnée sur la table de fabrication. Avant de commencer le processus de fabrication, le faisceau d'électrons a balayé et chauffé la plaque jusqu'au moment où la température de la surface au-dessus de celle-ci atteint 740°C. Par la suite, le processus de fabrication des éprouvettes commence.

Pour identifier le moment pour commencer la fabrication, nous avons également réalisé une autre expérience. Dans la machine EBM, le capteur thermique est placé au-dessous de la plaque titane. Tandis que la température qui nous intéresse est au-dessus de la plaque (voir Figure 3.6a). Comme la plaque a une épaisseur importante (25 mm), la température au-dessus peut être déterminée à partir de la relation de conduction thermique en mesurant la température au-dessous. Pour observer cette relation, nous avons chauffé la plaque par le faisceau d'électrons jusqu'à la température de la surface au-dessous de la plaque atteint 550°C. A ce point, le faisceau d'électrons est arrêté et nous avons observé l'évolution de la température de la surface au-dessous de la plaque (Figure 3.6b). Après l'arrêt du chauffage, la température de la surface au-dessous de la plaque augmente et se stabilise à 567°C en environ une minute, et puis elle descend.

Dans une première approximation, en négligeant la dissipation thermique durant une minute, nous pouvons déterminer que le gradient linéaire de la température dans la plaque pendant le chauffage est environ de 17°C. Donc, pour obtenir la température de la surface au-dessus de la plaque titane à 740°C, le senseur thermique doit mesurer une valeur d'environ 720°C à la surface au-dessous de la plaque.

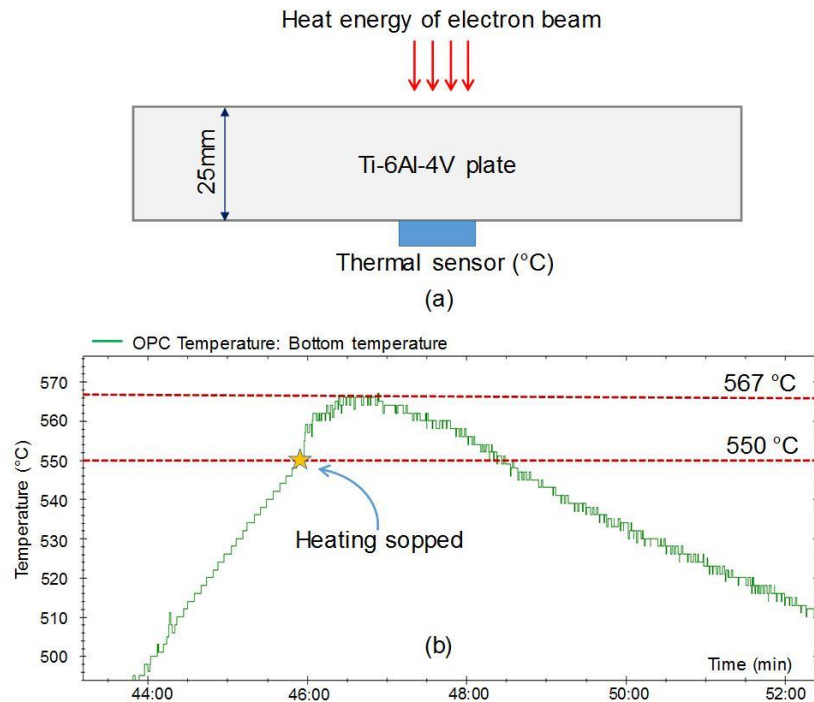


Figure 3.6. Expérience pour déterminer l'évolution de la température de la surface au-dessus de la plaque pendant le préchauffage : (a) la plaque de titane avec la sonde thermique placée sur la table de fabrication de la machine, (b) l'évolution de la température mesurée par la sonde thermique.

Avant de déposer la première couche de poudre, le faisceau d'électrons balaye la géométrie à ajouter en mode de fusion afin de mettre la plaque dans une configuration proche à celle d'une couche fondue standard.

La fabrication des éprouvettes est effectuée en deux étapes (Figure 3.7) :

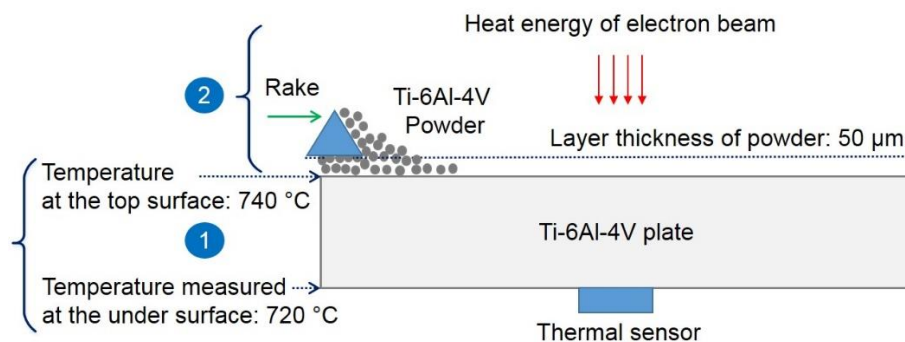


Figure 3.7. Processus de fabrication des éprouvettes : (1) chauffage de la plaque et (2) construction des entités.

Dans l'étape (1), la plaque de titane est chauffée par le faisceau d'électrons jusqu'au moment où la sonde thermique indique une valeur de 720°C (c'est-à-dire que la température de la surface au-dessus de la plaque est estimée à 740°C). Ensuite, la construction des entités commence en considérant la plaque comme une première couche de poudre. Dans l'étape (2),

la construction couche par couche de nouvelles entités est ensuite réalisée jusqu'à la fabrication complètes des entités.

3.3.3 Observation des microstructures et des propriétés mécaniques des éprouvettes

3.3.3.1 Métallographie. Pour observer les microstructures, une éprouvette est découpée par électro érosion à fil. Cette éprouvette comprend une partie des entités ajoutées par EBM et de la plaque de titane. L'électro érosion à fil permet une coupe sans effort et limite le chauffage du matériau. Ensuite, la surface affectée par la coupe est polie et attaquée chimiquement pour analyser la microstructure (Figure 3.8a). Les microstructures de l'échantillon sont observées à l'aide d'un microscope optique Olympus BX51M, qui est installée sur la plateforme expérimentale du laboratoire SIMAP à Grenoble. Nous avons également étudié les microstructures du matériau dans les trois zones : la zone fabriquée en EBM, la zone de la plaque titane, et la zone affectée par la chaleur (Figure 3.8b).

3.3.3.2 Mesure de la dureté. Afin de mesurer la dureté, une machine de miro-dureté Matsuzawa, installée sur la plateforme expérimentale du laboratoire SIMAP, est utilisée. La micro-dureté Vickers de l'échantillon est également mesurée dans les trois zones de l'échantillon (Figure 3.8b).

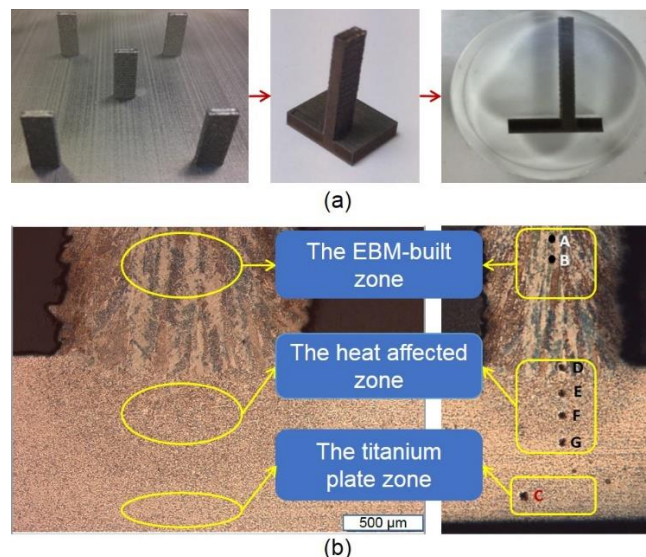


Figure 3.8. Eprouvette pour observer les microstructures et pour mesurer la dureté : (a) opérations de coupe, de polissage et d'attaque chimique ; (b) trois zones pour observer les microstructures et la dureté.

3.3.3.3 Essai de traction. L'essai de traction est effectué à la température ambiante. L'éprouvette (Figure 3.9a) est fixée sur la machine de traction en utilisant un système spécifique de fixation (Figure 3.9b). La partie supérieure de l'éprouvette est fixée par une attache standard

de la machine de traction (le modèle DY 35, 20 kN) (Figure 3.9c). Le capteur de force est fixé sur l'attache.

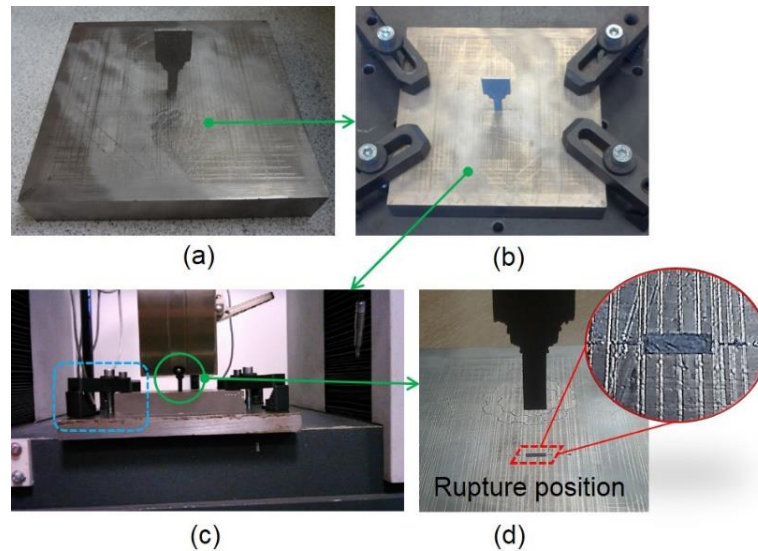


Figure 3.9. Installation de l'éprouvette sur la machine de traction et l'essai de traction : (a) l'éprouvette de traction, (b) serrage de l'éprouvette sur la table de la machine à l'aide de bride, (c) installation sur la machine de traction, et (d) la rupture de l'éprouvette.

L'essai de traction est effectué verticalement avec une vitesse de déplacement de la traverse de 1 ($\mu\text{m/s}$). Lorsque la force de traction atteint 6048 (N), l'éprouvette casse à l'interface entre la partie ajoutée par EBM et la plaque titane (Figure 3.9d).

3.3.4 Résultats et discussions

3.3.4.1 Microstructures. Les microstructures de l'échantillon sont observées dans les trois zones suivantes :

(i) Microstructures dans la zone de la plaque de titane.

La Figure 3.10a montre les microstructures de la plaque de titane. Elles sont de type duplex qui est une combinaison des microstructures lamellaires et équiaxes. Les phases α lamellaires sont intégrées dans une matrice de grains β . Les grains β sont entourés par des grains α équiaxes. Cette microstructure est typique de l'alliage de titane laminé au-dessous de la température de β *transus* - à cette température, il y a une transformation de phase α en phase β (Figure 3.2).

Les microstructures dans la zone de la plaque de titane après le processus EBM (Figure 3.10b) sont similaires à celles de la plaque initiale. Il n'y a pas de changement sur les microstructures du Ti-6Al-4V. Ceci peut s'expliquer par la température de construction de l'entité qui se situe entre 700°C et 740°C qui est inférieure à la température de β *transus*, environ

980°C (Suard, 2015). La microstructure de la plaque de titane après la fabrication des entités en EBM est encore bimodale, mais elle présente un plus grand nombre de phases lamellaires (Figure 3.10b) que celle de la plaque initiale (Figure 3.10a). Ceci peut être dû au chauffage de la plaque de titane pendant le processus EBM.

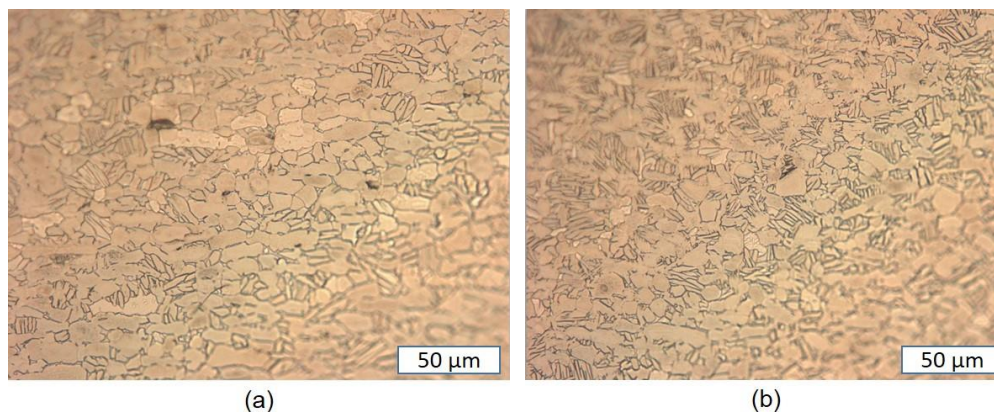


Figure 3.10. Microstructures de la plaque de titane initiale (a) et dans la zone de plaque sur laquelle les entités sont construites (b) : Microstructure duplex (α lamellaire intégrée dans une matrice de grains β et les grains β sont entourés par des grains α équiaxes).

(ii) Microstructures dans la zone fabriquée par EBM

Les micrographies de la zone construite par EBM (Figure 3.11) montrent une microstructure très fine par rapport à celles de la plaque initiale. La Figure 3.11a montre la microstructure qui se compose de grains β sous forme de colonne orientée le long de la direction de construction (Z) et délimités par des grains α . Les microstructures à l'intérieur des grains β colonnaires ont des structures typiques ($\alpha + \beta$) (Figure 3.11b). La microstructure ($\alpha + \beta$) est principalement composée d'une phase α et d'une petite quantité de phase β . La phase α a une morphologie lamellaire avec une phase β entourant la limite des lamelles α . On retrouve la microstructure présentée dans la littérature (Al-Bermani et al., 2010; Murr et al., 2012; Rafi et al., 2013).

La différence principale entre les microstructures dans la zone construite par EBM et dans la zone de la plaque est due à une vitesse de refroidissement élevée liée au procédé EBM, qui a lieu au-dessus de la température de β *transus*. De plus, la chambre de fabrication du système EBM est maintenue à une température de 700°C-740°C pendant le processus de fabrication (c'est-à-dire que le matériau est refroidi jusqu'à une température isotherme de 700°C à 740°C). Après la fabrication complète, l'ensemble est refroidi lentement de 740°C à la température ambiante dans la chambre de fabrication de la machine, ce qui entraîne la formation de la phase α et empêche la production de phase martensitique α' .

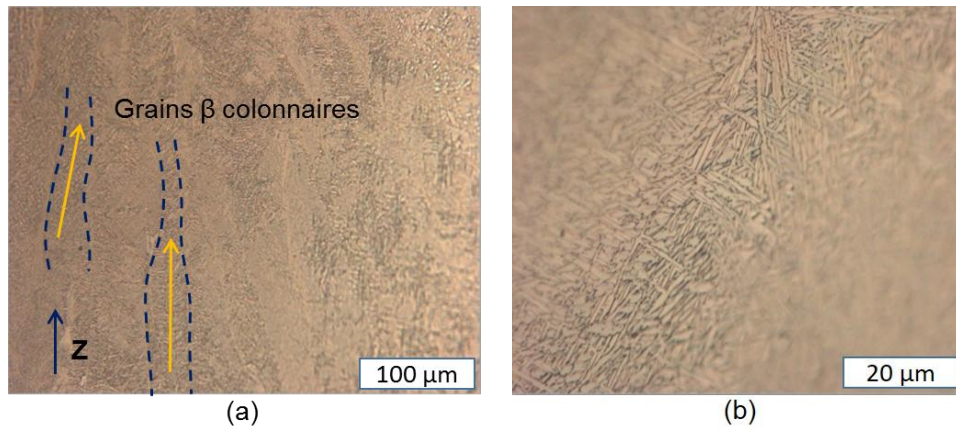


Figure 3.11. Microstructures dans la zone construite par EBM : (a) grains β colonnaires délimités par des grains α , (b) microstructures à l'intérieur des grains β colonnaires (structures $\alpha + \beta$).

(iii) Microstructures dans la zone affectée par la chaleur (HAZ)

La Figure 3.12a montre qu'il existe une zone limite entre la zone construite par EBM et la zone de la plaque affectée par la chaleur (HAZ).

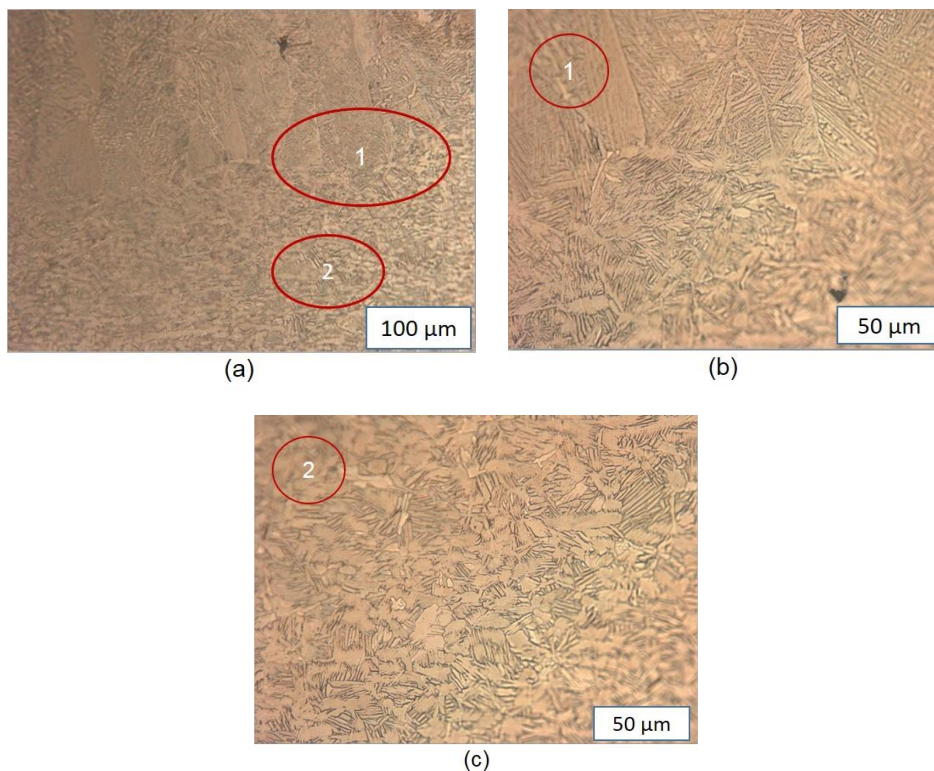


Figure 3.12. Microstructure dans la zone (HAZ): (a) grossissement à 100 μm ; (b) la structure lamellaire de la phase α dans les grains *prior* β en colonne près de la zone construite par EBM, zone limite (1); et (c) la microstructure duplex près de la zone de la plaque, zone (2).

La zone limite a également une structure lamellaire de la phase α dans les grains β colonnaires, en particulier dans la partie à proximité de la zone construite par EBM (Figure

3.12b). La zone HAZ présente un gradient de microstructures allant de la structure lamellaire à la structure duplex. En haut de la zone HAZ, la microstructure (auparavant duplex) est complètement changé en lamellaire car la température est suffisamment élevée pour permettre un recuit en phase β . Cependant, en sortant la zone limite (1) où la matière a été ajoutée, seule une fraction de la microstructure est changée en microstructure lamellaire, la zone (2). Lorsque la température n'atteint pas la température de β *transus*, il n'y a pas de transformation à partir de la microstructure duplex initiale (Figure 3.12c).

3.3.4.2 Propriétés mécaniques. Les propriétés mécaniques considérées dans cette étude sont obtenues par des essais de micro-dureté et de traction.

(i) La micro-dureté. Le Tableau 3.3 présente les valeurs de la dureté mesurées dans les trois zones de l'échantillon (Figure 3.8a). La dureté de la zone fabriquée par EBM, mesurée en deux points A et B, montre les valeurs les plus élevées. Ces valeurs sont comparables avec celles rapportées dans la littérature (Al-Bermani et al., 2010; Murr et al., 2012; Rafi et al., 2013). Alors que la dureté de la zone HAZ, mesurée à quatre points D, E, F et G, est plus petite et décroissante le long de la profondeur de la zone HAZ avec une valeur moyenne de 362 (HV). La dureté de la zone de la plaque, mesurée au point C, est similaire à celle de la plaque initiale (362 HV). Ces résultats semblent cohérents avec la microstructure observée dans la **partie 3.3.4.1** car la dureté Vickers diminue généralement lorsque la taille des grains augmente.

Tableau 3.3. Micro-dureté (HV) de l'échantillon.

Measure location	Vickers Hardness (HV)
The EBM-built zone	
A	393
B	387
Average value	390
The heat affected zone (HAZ)	
D	385
E	369
F	347
G	348
Average value	362
The titanium plate zone	
C	362

(ii) La propriété de traction. En raison de la déformation du système de fixation pendant l'essai de traction (Figure 3.9c), il n'est pas possible de mesurer l'allongement de l'éprouvette. Nous connaissons seulement la valeur de la force de traction (6048 N) au moment où

l'éprouvette casse. Pour bien expliquer les résultats de l'essai de traction, il faut examiner les contraintes normales dans l'éprouvette, ainsi que leur concentration dans la zone d'interface entre la partie ajoutée par EBM et la plaque durant l'essai de traction.

Dans cette étude, une simulation par éléments finis de l'essai de traction est menée. En fait, la rugosité totale des surfaces produites par EBM est significativement importante (Figure 3.13a). Par conséquent, elle doit être prise en compte dans le calcul des dimensions du modèle de simulation.

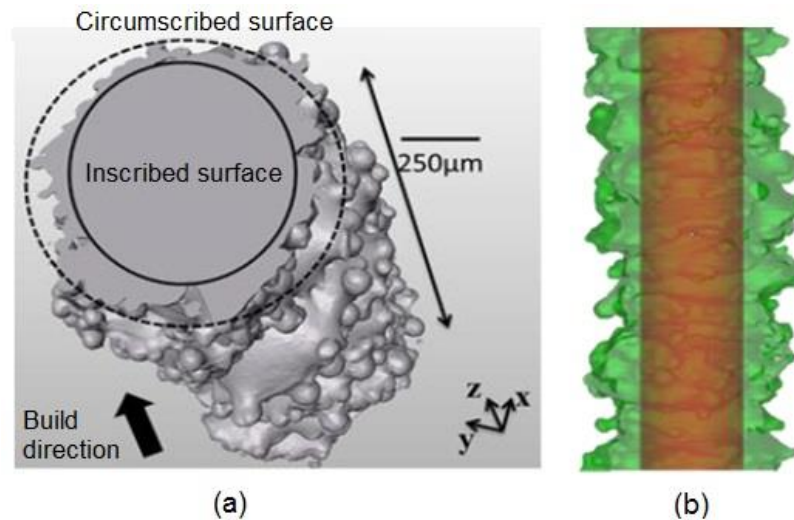


Figure 3.13. Apparence et volume efficace d'un cylindre construit par EBM : (a) la reconstruction tomographique du cylindre de 1 mm avec les paramètres de la surface inscrite et circonscrite; (b) la reconstruction du cylindre inscrit (rouge) à l'intérieur du cylindre réel (vert) (Suard et al., 2014).

D'après (Suard et al., 2014), le volume efficace (illustré par la zone rouge sur la Figure 3.13b) est supérieure à 80% du volume théorique lorsque le diamètre du cylindre construit EBM est supérieur à 2 (mm). Dans une autre étude, les auteurs montrent que la rugosité totale des surfaces construites en EBM à partir de poudre de Ti-6Al-4V présente une valeur de 213 (μm). A partir de cette valeur et des dimensions mesurées de l'entité ajoutée par EBM, les dimensions efficaces de cette entité (le petit parallélépipède rectangle représenté sur la Figure 3.14) sont calculées.

Durant l'essai de traction, la plaque de titane est serrée sur la table de la machine de traction. Les mêmes conditions limites sont utilisées pour la simulation. Par conséquent, pour réduire le temps de calcul, les dimensions du modèle de la plaque ont été réduites de (150 mm x 150 mm x 25 mm) à (20 mm x 20 mm x 10 mm).

De plus, un petit rayon de 80 (μm) entre l'entité ajoutée par EBM et la plaque est également modélisé (Figure 3.14). Cette valeur de 80 (μm) est estimée à partir de la

micrographie (Figure 3.8b) et de la taille de la poudre. Le modèle utilisé pour la simulation du test de traction est présenté sur la Figure 3.14.

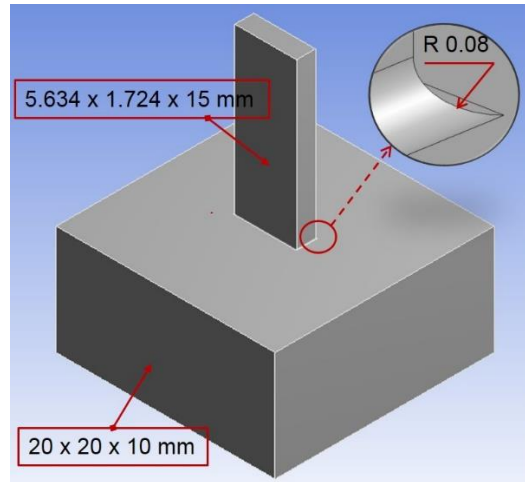


Figure 3.14. Le modèle CAO pour la simulation de l'essai de traction.

La simulation est effectuée en utilisant le logiciel ANSYS (*version 15.0 académique*). Une force de traction de 6048 (N) est appliquée sur la surface supérieure de l'entité construite par EBM selon la direction de traction. La surface inférieure de la plaque est encastree. L'alliage de titane, Ti-6Al-4V, ayant le module d'élasticité $E = 114$ (GPa) et un coefficient de Poisson $\nu = 0.34$ est utilisé pour le modèle de simulation.

Le maillage et les contraintes normales issues de la simulation sont présentés sur la Figure 3.15. On observe que les contraintes normales dans la zone à proximité de l'interface entre l'entité ajoutée par EBM et la plaque ont les valeurs les plus élevées (Figure 3.15b). Cette concentration de contrainte est due à la géométrie de l'éprouvette. La valeur maximale de la contrainte normale atteint 1284.7 (MPa). Elle est légèrement supérieure à la contrainte limite de la rupture (1200 MPa) de l'alliage Ti-6Al-4V. Ainsi, l'éprouvette casse à l'interface lorsque la force de traction atteint 6048 (N), comme montré sur la Figure 3.9d. La simulation nous permet de considérer qu'une liaison mécanique parfaite existe entre la plaque de titane et l'entité ajoutée par EBM.

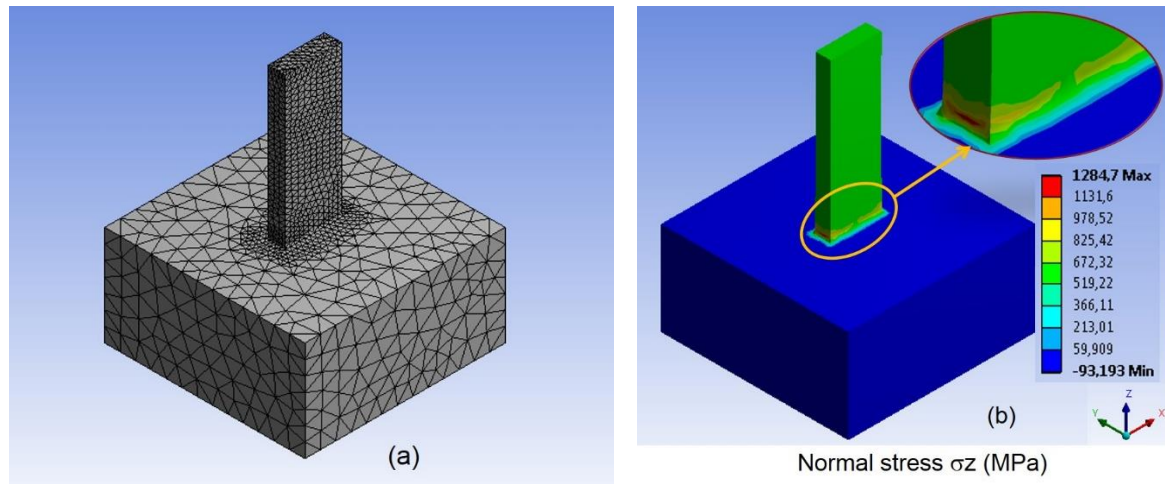


Figure 3.15. Le modèle du maillage (a), et les contraintes normales obtenues par la simulation (b).

La Figure 3.9d montre clairement qu'il y a une petite dépression sur la plaque au droit de la rupture. Cela signifie que l'entité construite en EBM possède une forte liaison avec la plaque, et que les caractéristiques obtenues sont équivalentes à une pièce unique. Plus important, cela démontre que nous pouvons créer de nouvelles entités sur une pièce existante pour obtenir une nouvelle pièce en utilisant la technologie EBM. Les pièces obtenues de cette façon ont des caractéristiques comparables à celles des pièces fabriquées par les procédés conventionnels (par exemple la fonderie, le forgeage et l'usinage) et en adéquation avec les applications industrielles.

3.4 Conclusion du chapitre

Les travaux expérimentaux menés dans ce chapitre montrent la faisabilité des techniques de fabrication additive métallique, en particulier la technique EBM, pour construire de nouvelles entités sur une pièce existante pour obtenir une nouvelle pièce.

Dans ce chapitre, les études concernant l'observation des microstructures et des propriétés mécaniques des pièces fabriquées par les procédés additifs métalliques sont d'abord présentées. Nous nous sommes concentrés sur les caractéristiques des pièces en titane (Ti-6Al-4V) fabriquées par ces procédés. La littérature apporte une compréhension et les données utiles sur les microstructures et les propriétés mécaniques de ce matériau et nous apporte les éléments pour construire notre étude expérimentale.

Le cœur de ce chapitre est consacré à présenter notre étude expérimentale pour confirmer le principe de la stratégie attendue dans le cas du procédé EBM. Dans cette étude, une machine EBM (le modèle A1 de l'Arcam®) est utilisée pour créer de nouvelles entités sur des plaques de Ti-6Al-4V, considérées comme des pièces existantes. Grâce à ce principe, nous

pourrons obtenir des nouvelles pièces à partir de pièces existantes. Les éprouvettes sont ensuite étudiées pour qualifier et quantifier leurs microstructures et de leurs propriétés mécaniques.

Les résultats obtenus démontrent que la technologie EBM est capable de construire de nouvelles entités sur une pièce existante avec de bonnes microstructures et propriétés mécaniques, qui sont également comparables à celles rapportées dans la littérature. De plus, les résultats d'observation sur les microstructures montre que le maintien de la température dans le processus EBM permet d'obtenir un gradient de microstructures de lamellaire à bimodale (phase α équiaxe dans une matrice lamellaire $\alpha + \beta$). C'est un résultat prometteur pour obtenir une liaison forte entre les nouvelles entités construites par EBM et la pièce initiale. Enfin, les résultats de l'essai de traction et de la simulation par éléments finis valident l'existence d'une liaison mécanique forte entre les nouvelles entités construites par EBM et la pièce existante.

En outre, les microstructures dans la zone de la plaque titane n'ont pas changé. Cela signifie que le procédé EBM n'a pas d'effet significatif sur les microstructures et les propriétés mécaniques de la plaque de titane (c'est-à-dire la pièce existante). Ainsi, les propriétés initiales de la pièce existante sont conservées.

Les résultats de notre étude expérimentale sont importants pour développer une stratégie soutenable, qui est capable de transformer une pièce en fin de vie ou une partie existante en une nouvelle pièce destinée à un autre produit sans passer par la phase de recyclage du matériau.

Chapitre 4 Conception de gammes de fabrication - une combinaison intelligente des opérations additives et soustractives

4.0 Introduction

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté notre étude expérimentale menée dans le cadre de la thèse. Elle nous a permis de valider le principe de la stratégie : obtenir une nouvelle pièce avec une bonne santé de matière en ajoutant de nouvelles entités sur la pièce existante. Ce chapitre porte sur la conception de gammes de fabrication pour répondre à la deuxième question de recherche : « **Comment concevoir des gammes de fabrication en combinant des opérations additives et soustractives pour obtenir la pièce attendue à partir de la pièce existante ?** »

Dans la première partie du chapitre, nous introduisons une vision de la méthodologie proposée pour concevoir une telle gamme de fabrication. La description des étapes de la conception de gammes est présentée de la deuxième partie à la quatrième partie. Pour illustrer et valider la méthodologie proposée, un cas d'étude est utilisé dans la cinquième partie. Pour finir, la sixième partie synthétise le contenu du chapitre.

Les résultats obtenus dans ce chapitre sont également présentés dans les articles suivants (Le et al., 2017a, 2017c, 2017e) :



Le V.T., Paris H., Mandil G. Process planning for combined additive and subtractive manufacturing technologies in a remanufacturing context. *Journal of Manufacturing systems* 2017; 44: 243-254. doi: 10.1016/j.jmsy.2017.06.003



Le V.T., Paris H., Mandil G. Extracting features for manufacture of parts from existing components based on combining additive and subtractive technologies. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing* 2017. doi: 10.1007/s12008-017-0395-y



Le V.T., Paris H., Mandil G. A direct material reuse approach based on additive and subtractive manufacturing technologies for manufacture of parts from existing components. *Procedia CIRP* 2017; 61: 229-234. doi:10.1016/j.procir.2016.11.190

4.1 Vision de la méthodologie proposée

Comme nous l'avons identifié précédemment, la conception de gammes de fabrication, ici une combinaison intelligente des opérations additives et soustractives s'appuie sur le concept d'entités (voir la partie 2.3.1, chapitre 2). Les gammes de fabrication sont conçues en utilisant les connaissances des techniques de fabrication additive et soustractive, les données disponibles de la pièce existante et de la pièce finale, ainsi que les ressources disponibles (par exemple, les machines-outils, les machines de fabrication additive, les outils de coupe, les dispositifs de posage et de bridage, etc.) (Figure 4.1).

Les connaissances des procédés de fabrication, en particulier les points suivants des procédés additifs métalliques, doivent être pris en compte dans la conception de gammes :

- la capacité de fabrication,
- les qualités dimensionnelles et surfaciques,
- les contraintes résiduelles et de déformations,
- l'accessibilité des outils dans les processus de fabrication,
- le dé-poudrage dans les procédés PBF.

Ces facteurs ont été identifiés et présentés dans la partie 2.1, chapitre 2.

La conception de gammes de fabrication s'appuie sur les deux grandes étapes suivantes :

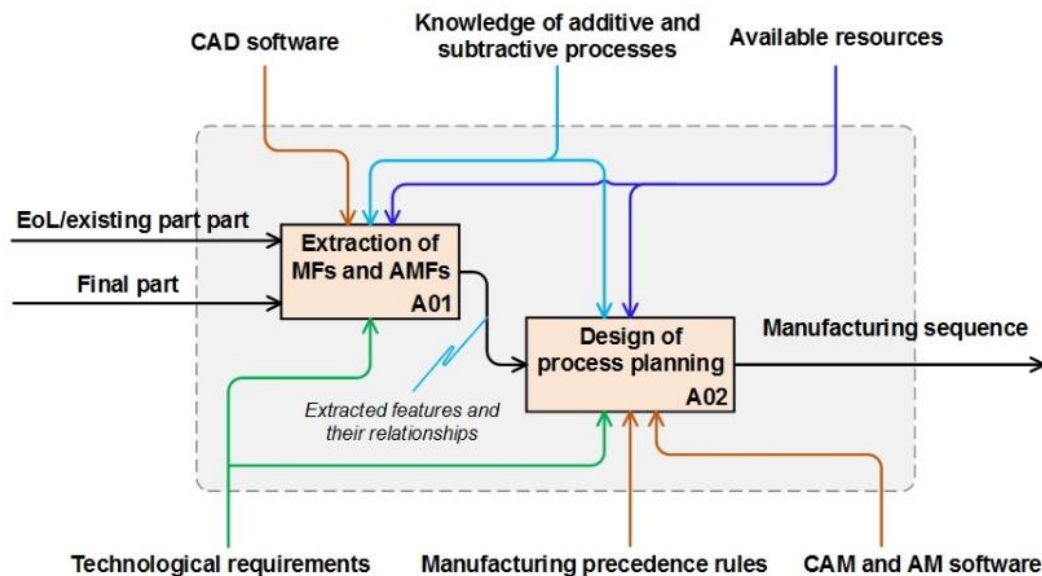


Figure 4.1. Les étapes principales de la conception de gammes de fabrication.

Dans la première étape (A01), les entités d'usinage et les entités de fabrication additive sont extraites à partir des informations disponibles et des modèles CAO de la pièce existante et de la pièce finale. Les relations entre les entités sont également déterminées dans cette étape (la partie 4.2).

Dans la deuxième étape (A02), les entités et leurs relations sont utilisées comme entrées pour concevoir les phases de fabrication comportant une séquence d'opérations. Les règles heuristiques de fabrication sont également définies pour enchaîner les opérations additives et soustractives (la partie 4.3).

Notez que les hypothèses soulignées dans la partie 2.6.3.1 « **Contour de l'étude** », chapitre 2, sont appliquées dans nos travaux. **Nous avons supposé que la pièce existante est identifiée et extraite à partir des produits en fin de vie pour produire la pièce visée (la pièce finale). C'est-à-dire que les informations sur la pièce existante et la pièce finale sont disponibles. Les machines-outils à commande numériques, les machines de fabrication additive, ainsi que les outils et les dispositifs de posage et de bridage sont également supposés disponibles pour la conception de gammes de fabrication.**

4.2 Extraction des entités additives et soustractives

Comme nous l'avons vu sur la Figure 4.1, à partir des connaissances des procédés additifs et soustractifs, les exigences technologiques, les ressources disponibles, les entités d'usinage et les entités de fabrication additive seront extraites dans l'étape A01.

La Figure 4.2 montre la procédure d'extraction de ces entités additives et d'usinage. Ce processus est effectué manuellement en utilisant les fonctions Booléennes du logiciel CAO. A partir des informations et des modèles CAO de la pièce existante et de la pièce finale, les entités d'usinage et de fabrication additive sont extraites via les étapes A01-1 à A01-5 en considérant les critères suivants :

(i) le volume de matière de la pièce existante est conservé le plus grand possible. Ce critère permet de conserver un maximum de matière de la pièce existante.

(ii) les entités sont extraites indépendamment. Ceci permet de définir un processus de fabrication pour chaque entité qui est indépendant par rapport aux processus de toutes les autres entités ;

(iii) l'attribut volumique des entités doit être compatible avec les qualités requises. Si une entité de fabrication additive doit être reprise en usinage pour obtenir les surfaces finales, son attribut volumique correspond à l'état brut des entités d'usinage associées.

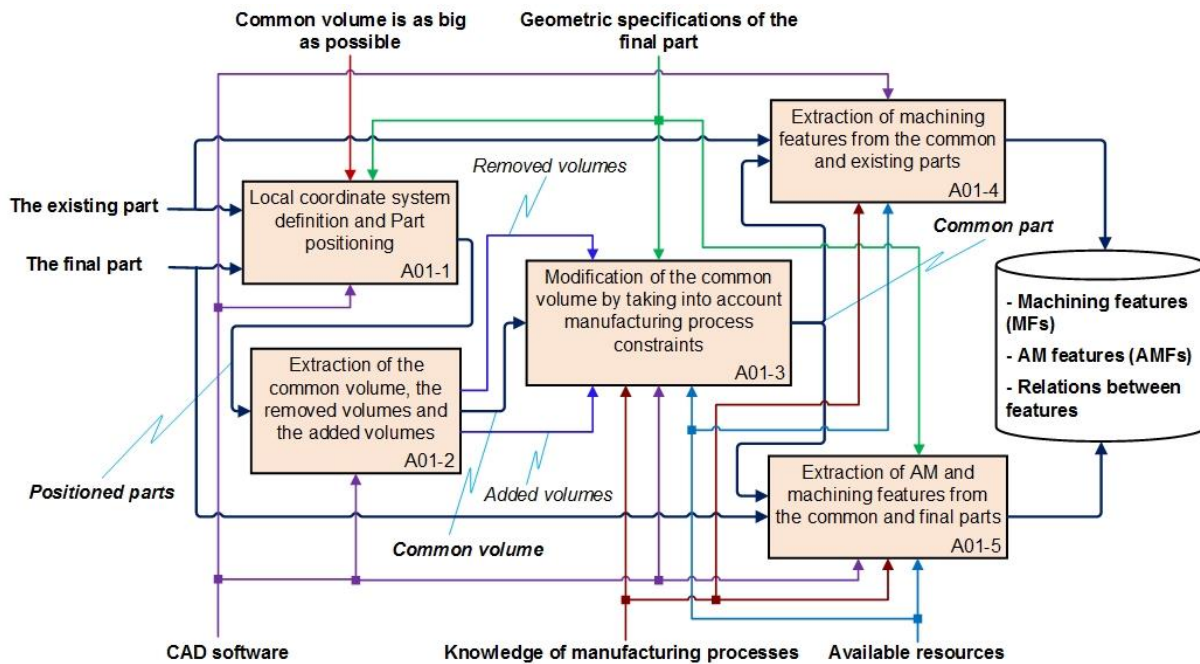


Figure 4.2. La procédure pour extraire les entités d’usinage et les entités de fabrication additive.

4.2.1 Définition des repères locaux et positionnement des deux modèles CAO (pièce existante et pièce finale) (A01-1)

Dans cette étape (A01-1), un système de coordonnées est défini pour chaque modèle CAO de la pièce existante et de la pièce finale. Ensuite, ces deux systèmes de coordonnées sont positionnés de manière à obtenir le volume commun entre la pièce existante et la pièce finale le plus grand possible. Ceci permet de respecter le critère (i) sur la réutilisation efficace de la matière de la pièce existante. Cependant, en considérant le critère (iii), si possible, une surépaisseur suffisante pour les opérations de finition doit être laissée sur les surfaces fonctionnelles de la pièce finale.

4.2.2 Extraire la partie commune, la partie à enlever et la partie à ajouter (A01-2)

Une fois que les modèles CAO de la pièce existante et de la pièce finale ont été positionnées, le volume commun est extrait à l’aide de la fonction intersection disponible dans le logiciel CAO (Eq. 4-1) :

$$\{Common\ volume\} = \{Existing\ part\ volume\} \text{ INTERSECT } \{Final\ part\ volume\} \text{ (Eq. 4-1)}$$

Par la suite, les volumes à enlever (ou les volumes à ajouter) sont obtenus à partir du volume de la pièce existante (ou du volume de la pièce finale) et du volume commun en utilisant la fonction soustractive disponible dans le logiciel CAO (Eq. 4-2 et Eq. 4-3).

$$\{Removed\ volumes\} = \{Existing\ part\ volume\} \text{ SUBTRACT } \{Common\ volume\} \text{ (Eq. 4-2)}$$

$$\{\text{Added volumes}\} = \{\text{Final part volume}\} \text{ SUBTRACT } \{\text{common volume}\} \quad (\text{Eq. 4-3})$$

4.2.3 Modification du volume commun en prenant en compte les contraintes de fabrication (A01-3)

Le volume commun obtenu n'est généralement pas adapté pour le dépôt de la matière à l'aide de procédés additifs métalliques. Pour les procédés PBF (par exemple EBM et SLM), la surface de départ de la construction doit être plane pour éviter les collisions entre les distributeurs de la poudre et la pièce (voir les Figures 2.3 et 2.4, chapitre 2). Dans les procédés DED (par exemple DMD et CLAD), les buses de dépôt de la matière peuvent rentrer en collisions avec la pièce (voir la Figures 2.5, chapitre 2). Par conséquent, pour respecter les contraintes d'accessibilité des outils liés aux procédés additifs, il est nécessaire de modifier la géométrie du volume commun. La nouvelle géométrie du volume commun après modification est appelée la partie commune.

4.2.4 Extraction des entités d'usinage et de fabrication additive (A01-4 et A01-5) et relations entre entités

Dans les étapes A01-4 et A01-5, les entités d'usinage et les entités de fabrication additive sont extraites de la partie commune, de la pièce existante et de la pièce finale. De plus, les relations de précédence entre ces entités sont créées pour respecter les contraintes d'accessibilité des outils et la qualité.

En prenant en compte les contraintes d'accessibilité des outils, des relations de précédence entre les entités sont également créées. Par exemple, si l'entité d'usinage (MF1)⁵ fournit une surface plane pour construire l'entité de fabrication additive (AMF1)⁶ en utilisant les procédés PBF, la réalisation de l'entité MF1 précède la réalisation de l'entité AMF1. Si l'état brut de MF1 est l'état actuel de la pièce existante, l'entité MF1 doit d'abord être usinée.

En outre, pour éviter une collision des outils de coupe avec la pièce lors de l'usinage de l'entité d'usinage (MF1), les entités AMF1 et AMF2 doivent alors être extraites indépendamment bien qu'elles puissent être construites dans une seule phase de fabrication additive. Dans ce cas, les relations de précédence entre ces entités sont identifiées : AMF1 → MF1 → AMF2.

Par ailleurs, les contraintes de précision doivent également être prises en compte dans le processus d'extraction des entités. Pour obtenir les qualités requises de la pièce finale, les

⁵ MF – Machining feature

⁶ AMF – Additive manufacturing feature

entités de fabrication additive doivent généralement être usinées. Elles deviennent l'état brut des entités d'usinage. Ainsi, une surépaisseur suffisante doit être ajoutée aux entités de fabrication additive. Cette épaisseur est estimée en fonction des spécifications technologiques de la pièce finale, de la rugosité des surfaces construites par les procédés additifs, des erreurs dues à la distorsion thermique ou des contraintes résiduelles, ainsi que des conditions de coupe en usinage. Dans ce cas, les entités de fabrication additive qui fournissent l'état brut des entités d'usinage associées doivent être réalisées avant les entités d'usinage.

En plus des relations de précédence, les relations topologiques et les relations géométriques sont également assignées aux entités. Les relations topologiques présentent l'associativité d'une entité avec ses entités voisines. Pour les entités d'usinage, ces relations sont classiquement définies en termes de 'débouche dans' ou 'débouche sur' lorsqu'une entité d'usinage 'débouche dans (ou sur)' une autre entité d'usinage, ou 'intersecte avec' lorsque deux entités se croisent (Paris and Brissaud, 2000). Pour les entités de fabrication additive, une entité additive peut 'commencer sur' une entité d'usinage, ou une entité additive fournit l'état brut d'entités d'usinage.

Les relations géométriques sont directement définies à partir des spécifications technologiques de la pièce finale (c'est-à-dire les tolérances dimensionnelles ou de position).

4.3 Identification des états intermédiaires dans le processus de fabrication

Dans le processus de fabrication, l'état d'une entité peut être changé à partir de l'état brut à l'état final via certains états intermédiaires. L'identification des états intermédiaires est encore un problème majeur à résoudre dans la planification des processus de fabrication.

Dans cette étude, la pièce peut passer par différentes phases de fabrication additives et d'usinage, ainsi que le traitement thermique potentiel. En effet, l'influence thermique dans les procédés additifs, en particulier les procédés PBF, ou dans la phase de traitement thermique sur la qualité de surfaces usinées est importante. Par conséquent, si les surfaces fonctionnelles sont obtenues par les opérations de finition avant les phases de fabrication additive ou de traitement thermique, la qualité de ces surfaces peut ne pas satisfaire les spécifications technologiques requises.

Afin d'identifier les états intermédiaires, les contraintes suivantes doivent être prises en compte :

- (1) la contrainte sur la qualité : Dans la conception de gammes de fabrication, il faut assurer qu'un maximum de spécifications requises de la pièce finale soit atteint.
- (2) la productivité. Il s'agit de réduire le temps et les coûts de fabrication.

(3) la contrainte d'utilisation efficace de la matière. Cette contrainte vise à réutiliser au maximum la matière de la pièce existante afin de réduire la quantité de poudre pour construire les nouvelles entités et la quantité de copeaux.

La Figure 4.3 présente un exemple qui montre l'identification des états intermédiaires, l'extraction des entités et l'incidence de cette extraction sur la planification des processus de fabrication, en considérant les contraintes ci-dessus. Dans cet exemple, étant donné que la longueur et la largeur de la pièce existante sont identiques à celles de la pièce finale. Nous nous concentrons sur la construction de l'entité cylindrique de la pièce finale. La pièce finale peut être obtenue à partir de la pièce existante via le scénario 1 ou le scénario 2.

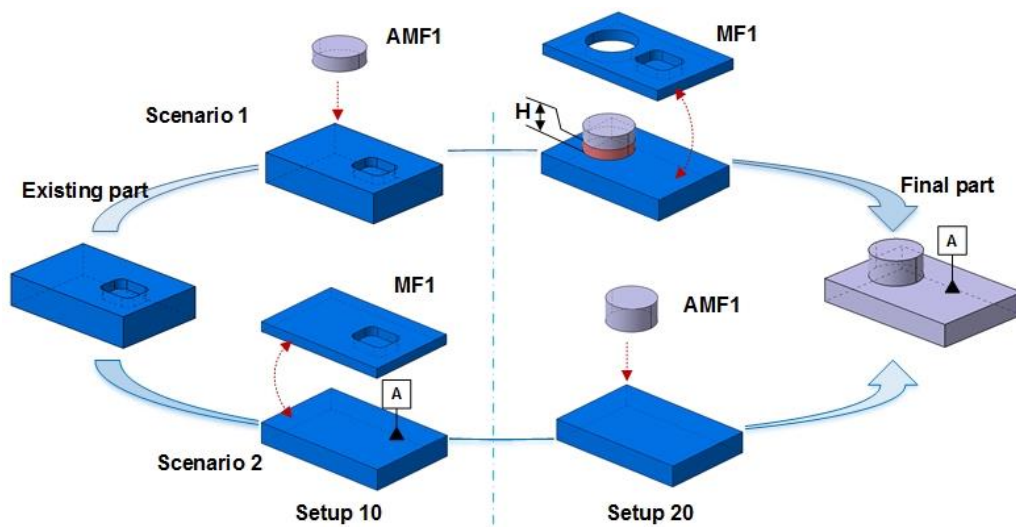


Figure 4.3. La prise en compte des contraintes (1), (2) et (3) dans la conception de gammes de fabrication.

Dans le premier scénario, le volume de matière (en orange avec la hauteur (H)) de la pièce existante est supposé important. Alors, l'entité cylindrique est obtenue en ajoutant l'entité additive (AMF1) dans la phase 10; puis son état final est atteint dans la phase 20 en usinant l'entité d'usinage (MF1). En conséquence, la matière de la pièce existante est réutilisée efficacement (le volume orange est conservé et réutilisé). De plus, la quantité de poudre requise pour construire l'entité cylindrique dans la phase 10 et les copeaux (les déchets) générés dans la phase 20 sont minimisées. La qualité de la surface (A), étant reprise en usinage, n'est pas directement affectée par les cycles thermiques du procédé additif qui construit l'entité AMF1 dans la phase 10.

D'autre côté, le deuxième scénario est appliqué lorsque le volume orange avec la hauteur H est faible et la rugosité de la surface (A) est compatible avec les procédés additifs. Dans ce cas, l'entité MF1 est usinée avant la construction de l'entité AMF1 en utilisant une fraise à

surfacier. Ainsi, le temps pour usiner l'entité MF1 est réduit par rapport à celui du premier scénario.

La Figure 4.4 présente un autre exemple montrant une entité de fabrication additive (AMF) avec un trou borgne qui doit être repris en usinage (entité d'usinage MF). La qualité du trou impose une reprise en usinage. La Figure 4.4a présente le cas où le trou borgne a un grand diamètre, par exemple $D > 8$ mm et un rapport $H/D < 3$. Dans ce cas, Il est suggéré de construire l'entité AMF avec le trou borgne. Une épaisseur suffisante (correspondant à l'entité d'usinage MF) est également ajoutée pour les opérations de finition. Alors, la quantité de poudre requise pour construire l'entité AMF et les déchets générés lors l'usinage du trou borgne sont minimisés.

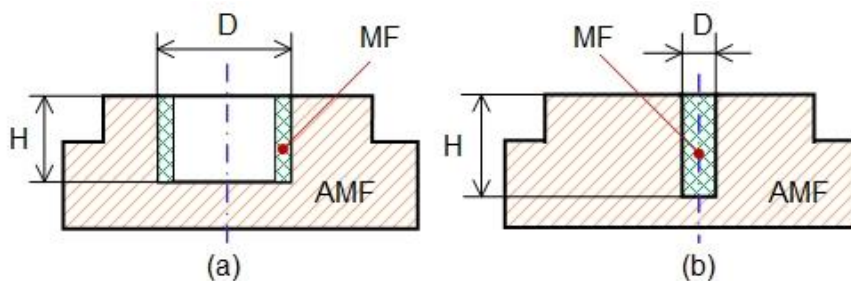


Figure 4.4. Impact de la contrainte utilisation efficace de matière sur l'identification des entités.

D'autre part, sur la Figure 4.4b, le trou borgne a un diamètre plus petit, par exemple $D < 8$ mm et un rapport $H/D > 3$ (Vayre et al., 2013). Il est préférable de construire l'entité additive AMF sans le trou borgne. Le trou sera usiné après la phase de fabrication additive. Bien que cela nécessite plus de poudre pour construire l'entité AMF et génère une petite quantité de déchets lors de l'usinage (c'est-à-dire des copeaux lors du perçage du trou borgne), cette solution permet non seulement d'atteindre la qualité du trou, mais aussi d'éviter les difficultés de dépoudrage des poudres non fondues et partiellement fondues dans le trou borgne après la phase additive (Vayre et al., 2013).

4.4 Elaboration de gammes de fabrication combinant des opérations additives et soustractives

À partir des entités extraites et de leurs relations (la partie 4.2), la planification des processus de fabrication est conçue en suivant les deux étapes suivantes :

- Dans la première étape, un processus de fabrication (une séquence d'opérations ordonnées) est défini pour chaque entité en fonction des attributs de l'entité (la partie 4.4.1).

- Dans la deuxième étape, les opérations sont regroupées dans les phases de fabrication. Une phase est une séquence ordonnée d'opérations effectuées entièrement sur une même machine-outil avec la même prise de pièce. Différentes règles sont également définies et appliquées dans cette étape pour respecter les relations entre les entités et les contraintes de précédence de fabrication (la partie 4.4.2).

Notez que dans le cadre de nos travaux, nous nous concentrons notamment sur l'enchaînement des opérations additives et soustractives. D'autres tâches dans la conception de gammes de fabrication, telles que la sélection des systèmes de fixation et la génération des trajectoires en usinage sont discutés dans les travaux publiés précédemment (Lee et al., 2013; Paris and Brissaud, 2004, 2000). En particulier, les liens entre les éléments liés à la conception de gammes de fabrication, y compris les opérations d'usinage, les machines-outils, le système de posage et de bridage, sont profondément discutés dans les travaux de (Paris and Brissaud, 2004, 2000).

Le posage et le bridage de la pièce dans les phases additives sont aussi des éléments à prendre en considération. Dans les procédés DED, la stratégie est similaire à celle de l'usinage car la buse de dépôt de la matière est souvent intégrée sur une machine à commande numérique 3 axes ou 5 axes. D'autre part, le posage et le bridage des pièces dans les procédés PBF doivent assurer les deux conditions suivantes: (i) la construction doit commencer sur une surface plane horizontale et (ii) il n'y a pas de collisions entre le distributeur de la poudre et le système de fixation. Certains systèmes de fixation possibles pour positionner et fixer les pièces dans les procédés PBF sont représentés dans la littérature (Liu et al., 2014b; Terrazas et al., 2014). Dans le cadre de la thèse, les problèmes concernant le posage et le bridage lié aux procédés additifs et d'usinage sont pris en compte lors de la conception de gammes de fabrication. Cependant, la conception de ces systèmes de fixation n'est pas abordée dans nos travaux.

4.4.1 Définition d'un processus de fabrication associé à chaque entité

En considérant les attributs des entités d'usinage, une séquence d'opérations pour chaque entité est définie, en appliquant des règles comme par exemple **la règle 1**. De plus, une machine-outil, un système de fixation et des outils correspondant à chaque opération sont également sélectionnés à partir des ressources disponibles pour réaliser chaque entité d'usinage.

Règle 1 : Selon les spécifications géométriques (les tolérances dimensionnelles et la rugosité de la surface) et l'état brut des entités d'usinage, une séquence d'opérations est définie pour chaque entité d'usinage, comme indiqué dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1. Exemple de règle pour définir une séquence des opérations pour chaque entité d'usinage.

Eléments	Intervalle de tolérance (IT)			Qualité			Rugosité de la surface		
Spécifications géométriques	IT ≥ 0.3	0.05 < IT < 0.3	IT ≤ 0.05	≥ 12	9, 10, 11	≤ 8	Ra ≥ 6.3	0.8 < Ra < 6.3	Ra ≤ 0.8
Opérations ^a	F	R F	R SF F	F	R F	R SF F	F	R F	R SF F

(^a R: *Roughing*; SF: *Semi-Finishing*; and F: *Finishing*)

Pour une entité de fabrication additive, au moins un procédé additif est connu pour la construire, et elle est construite dans une seule phase. Par conséquent, la définition d'un processus pour une entité additive signifie la sélection d'une technique de fabrication additive (DED ou PBF) la plus compatible en considérant les machines de fabrication additive disponibles.

4.4.2 Elaboration des phases

4.4.2.1 Groupement des opérations dans les phases. Dans cette partie, différentes règles sont appliquées pour ordonnancer les opérations et respecter les relations entre entités et les contraintes de fabrication.

(a) Les règles pour respecter les relations topologiques et de précédence entre entités.

En considérant les relations topologiques entre entités d'usinage et de fabrication additive, la précédence des entités peut être déterminée. Si une entité d'usinage fournit la surface de départ pour la construction d'une entité additive, la réalisation de l'entité d'usinage précède la réalisation de l'entité additive. En revanche, une entité additive précède les entités d'usinage si elle fournit l'état brut de ces entités d'usinage. Afin de respecter la précédence des entités, la règle suivante doit être appliquée lors de la planification des opérations.

Règle 2 : Si l'entité (F1) est précédente à l'entité (F2), alors le processus de (F1) doit être effectué avant le processus de (F2).

(b) Les règles pour respecter les relations géométriques entre entités. Comme les entités additives deviennent généralement l'état brut des entités d'usinage, les relations géométriques (les tolérances de positionnement) lient habituellement les entités d'usinage. Lors de l'élaboration des phases, ces relations doivent être assurées. S'il existe une tolérance serrée entre deux entités d'usinage, ces entités doivent être usinées dans la même phase pour éliminer

les erreurs du système de prise de pièce. Si cela n'est pas possible, les surfaces usinées d'une entité d'usinage doivent être utilisées comme références (posage) pour usiner l'autre. Ces exigences peuvent être résumées par la règle suivante:

Règle 3 : Si deux entités d'usinage (MF1 et MF2) sont liées par une relation serrée, alors les opérations de finition de MF1 et de MF2 doivent être réalisées dans la même phase. Si cela est impossible, réaliser l'entité MF1 (respectivement MF2) dans une phase, en utilisant les surfaces usinées de l'entité MF2 (respectivement MF1) comme surfaces pour positionner la pièce.

(c) **Les contraintes de qualité.** Comme nous l'avons discuté dans la partie 4.3, l'état de la pièce passe de l'état brut à l'état final avec certains états intermédiaires. Alors, la déformation liée à la chaleur dans les phases additives (en particulier dans les procédés PBF) peut dégrader la qualité de surfaces usinées. Par conséquent, si une entité d'usinage est réalisée avant les phases de fabrication additive, ses surfaces ne peuvent plus répondre à la qualité requise. Pour éviter ce problème, la règle suivante devrait être appliquée.

Règle 4 : Si les spécifications d'une entité d'usinage (c'est-à-dire la rugosité des surfaces) sont serrées, alors ses opérations de finition doivent être planifiées le plus tard possible après les opérations additives.

Un exemple illustrant cette règle est présenté Figure 4.5, où le processus de l'entité d'usinage (MF2) est particulièrement discuté. Etant donné que l'entité de fabrication additive (AMF1) est construite par les techniques PBF et ne nécessite pas de reprise en usinage après le processus de fabrication additive, il y a deux scénarios potentiels pour atteindre la pièce finale (les scénarios 1 et 2).

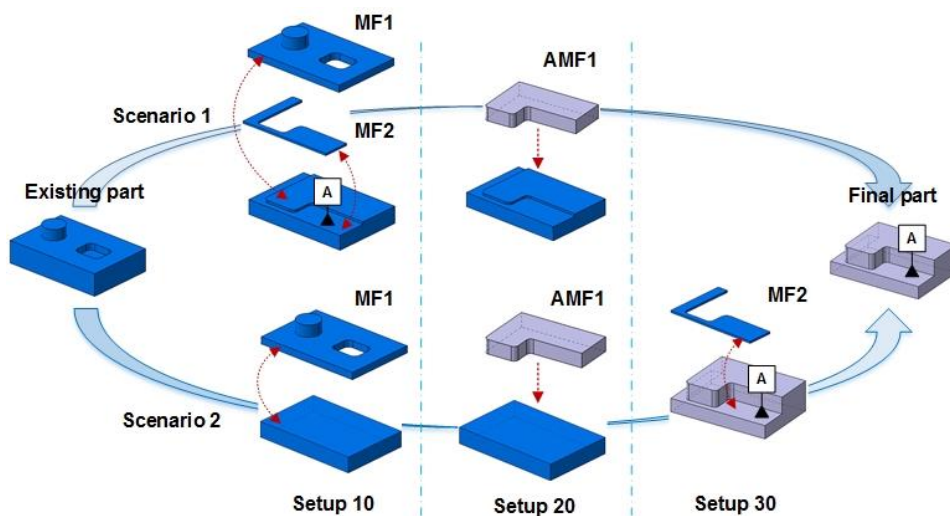


Figure 4.5. Exemple illustrant la règle 4.

Si la qualité requise de la surface (A) est compatible avec le procédé additif, la pièce finale peut être obtenue via le scénario 1. Dans ce scénario, l'entité MF2 et l'entité d'usinage (MF1) sont usinées dans la phase 10 et avant la construction de l'entité AMF1. En conséquence, une phase (c'est-à-dire la phase 30) peut être éliminée par rapport au scénario 2. Le temps de production est donc réduit. En revanche, si la qualité requise de la surface (A) est serrée, l'entité MF2 doit être usinée après la construction de l'entité AMF1 selon le deuxième scénario pour assurer la qualité finale.

Le problème de la bavure en usinage est un facteur important, qui doit être pris en considération. En fait, une bavure typique se forme sur les pièces métalliques en raison de la sortie des arêtes de l'outil de coupe. Les bavures peuvent varier en forme et en taille, de la petite taille et uniforme à une taille importante et non uniforme. Elles ont un effet significatif sur la qualité de la surface usinées, en particulier lorsqu'il existe une intersection entre deux entités d'usinage. De plus, pour enlever les bavures, des opérations de finition supplémentaires sont nécessaires (c'est-à-dire l'ébavurage), ce qui entraîne une augmentation considérable des coûts de fabrication (Kim and Dornfeld, 2001). Les bavures en usinage doivent donc être éliminées ou minimisées. Pour cela, la règle suivante peut être appliquée dans la planification des processus de fabrication.

Règle 5 : Dans le cas de deux entités d'usinage ayant une intersection, il faut soit usiner en premier l'entité qui a des exigences de tolérance les plus serrées ; soit l'entité qui permet des opérations d'ébavurage plus facilement accessibles doit être usinée après l'autre.

Par exemple, dans le cas de deux trous, le trou $\Phi 10H8$ coupe partiellement le trou $\Phi 28$ et l'axe du trou $\Phi 10H8$ est perpendiculaire à celui du trou $\Phi 28$ (Figure 4.6a). D'après la règle 5, le trou $\Phi 10H8$ doit être réalisé avant le trou $\Phi 28$. Lorsqu'un trou se croise avec une marche (Figure 4.6b), il est préférable d'usiner la marche avant de percer le trou.

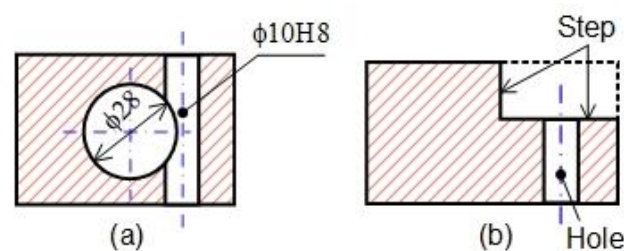


Figure 4.6. Exemples illustrant la règle 5.

(d) Les contraintes de stabilité de posage et de bridage. Le posage et le bridage de la pièce ont une influence notable sur la qualité des pièces fabriquées. Fondamentalement, le posage des pièces nécessite trois entités de positionnement pour supprimer les six degrés de liberté et au moins une entité de bridage (Paris and Brissaud, 2004). L'entité principale de positionnement doit assurer la stabilité de la pièce. La seconde permet l'orientation de la pièce; et la troisième est une butée. Ainsi, dans les premières phases, les opérations d'usinage doivent fournir les surfaces de posage pour les prochaines phases. Pour respecter ces exigences, la règle suivante doit être considérée.

Règle 6 : Il faut usiner dans les premières phases les entités d'usinage qui permettent une mise en position la plus stable possible et un bon ablocage de la pièce dans les phases suivantes.

De plus, l'usinage d'une entité peut détruire accidentellement les éléments nécessaires et suffisants (les surfaces de posage et de bridage, ainsi que les surfaces de support), pour le processus d'une autre entité. Ceci cause des difficultés et une instabilité à mise en position de la pièce dans la phase ultérieure. Dans ce cas, la règle 7 devrait être appliquée.

Règle 7 : Si la réalisation de l'entité d'usinage (MF1) détruit les surfaces de reprise nécessaires et suffisante à la mise en position de la pièce dans la phase suivante de fabrication additive (AMF1) ou d'usinage (MF2), alors l'entité MF1 doit être réalisée après AMF1 ou MF2.

La Figure 4.7 présente un exemple pour illustrer les règles 6 et 7. Dans ce cas, l'entité d'usinage MF1 est d'abord usinée dans la première phase - la phase 10, et l'entité d'usinage MF2 doit être usinée dans la phase 30 et après la construction de l'entité de fabrication additive AMF1 – dans la phase 20. Cela assure la stabilité de la pièce dans la phase 20.

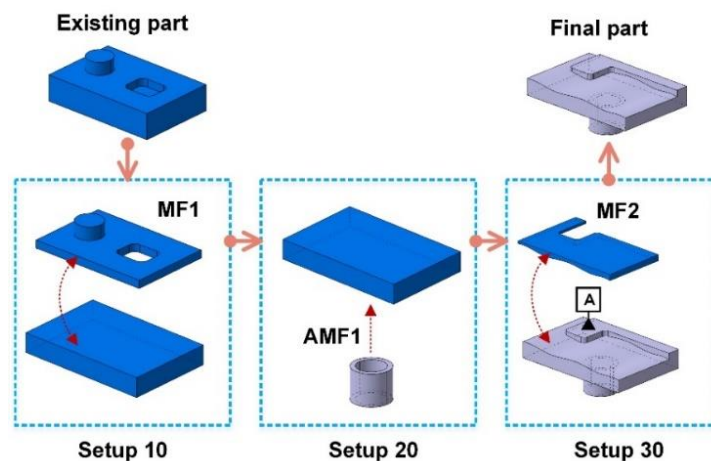


Figure 4.7. Exemple illustrant les règles 6 et 7.

Si l'entité MF2 est usinée avec l'entité MF1 dans la phase 10, le positionnement et l'ablocage de la pièce dans la phase 20 n'est pas stable car la surface (A) n'est pas suffisante pour positionner la pièce.

Dans les procédés PBF, le dépôt de la matière doit être effectué sur une surface plane horizontale. Alors, le positionnement de la pièce doit être compatible avec une telle configuration. Si la construction d'une entité de fabrication additive sur la pièce cause des difficultés de posage et de bridage de la pièce, la règle suivante doit être prise en compte pour la prochaine phase additive.

Règle 8 : Si les techniques PBF sont sélectionnées pour construire deux entités de fabrication additive, il faut d'abord construire l'entité qui assure la mise en position de la pièce dans la phase additive suivante la plus stable et la plus facile.

(e) *Les contraintes en usinage.* De nombreuses règles heuristiques basées sur les connaissances de l'usinage sont présentées dans les travaux publiés (Ji et al., 2016; Liu and Wang, 2007). Par exemple, si un trou débouchant est divisé par une rainure, le processus du trou doit être terminé avant la réalisation de la rainure. De plus, la mise en position de la pièce dans une phase doit permettre l'accessibilité des outils (Paris and Brissaud, 2000). Ces règles sont également prises en compte pour élaborer la séquence des opérations d'usinage.

Après avoir appliqué ces règles (**les règles 2 à 8**), les opérations des entités sont ordonnées et groupées en différentes phases. Les dernières opérations qui ne sont pas contraintes peuvent être assignées aux phases existantes, **la règle 9 :**

Règle 9 : Si possible, les opérations qui ne sont pas encore assignées à une phase sont assignées à une phase existante.

4.4.2.2 Ordonnancement des opérations dans une phase. Dans une phase, les opérations sont d'abord ordonnées en respectant les contraintes de précédence. De plus, les opérations nécessitant le même outil de coupe doivent être ordonnées les unes derrière les autres pour réduire le nombre de changement des outils.

Règle 10: Dans une phase, les opérations réalisées par le même outil de coupe doivent être ordonnées les unes derrière les autres.

Une phase peut comporter plusieurs opérations : certaines de ces opérations ont un ordre imposé, par exemple les opérations d'usinage d'un trou (perçage → semi-alésage → alésage),

et les autres opérations n'ont aucun ordre de précedence. Dans ce cas, la **règle 11** peut être utilisée.

Règle 11: Dans une phase, l'opération qui enlève un volume de matière le plus important doit être effectué avant les autres.

Cette règle est couramment utilisée par les usineurs car la coupe d'un volume plus important conduit généralement à des efforts de coupe élevés et un dégagement de chaleur important. Cela peut entraîner une plus grande déformation et réduire la précision des surfaces (Liu and Wang, 2007).

4.5 Cas d'étude

4.5.1 Présentation du cas d'étude

Dans cette partie, la méthodologie proposée est illustrée à l'aide d'un cas d'étude où la pièce existante identifiée est utilisée pour fabriquer la pièce finale (Figure 4.8).

Pour la pièce finale, la poche (P) et les surfaces (fS1 à fS7) sont de bonne qualité. Deux trous débouchant (H1 et H2) de qualité H8 sont positionnés par une tolérance serrée de X6 (IT = 0.06 mm). Les surfaces fS4 de la marche sont liées avec les surfaces fS6 et fS7 par la tolérance sur les dimensions X4, X3 et X5 (IT = 0.06 mm). La position de la poche (P) est définie par les dimensions X1 et X2 avec une tolérance serrée (IT = 0.06 mm). L'état des surfaces (eS1, eS2 et eS3) de la pièce existante est compatible avec la qualité des surfaces finales (fS1, fS2 et fS3).

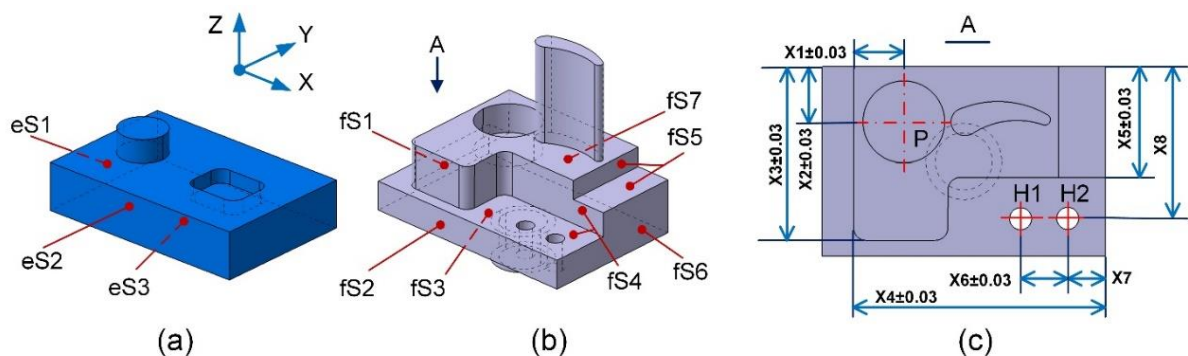


Figure 4.8. Les pièces utilisées dans le cas d'étude : (a) la pièce existante, (b) la pièce finale, et (c) la vue de dessus de la partie finale et certaines dimensions importantes discutées dans le cas d'étude.

4.5.1 Extraction des entités additives et soustractives

La Figure 4.9 illustre les trois premières étapes (A01-1 à A01-3) dans le processus d'extraction des entités additives et soustractives. A partir de l'hypothèse mentionnée ci-dessus,

un système de coordonnées est assigné à chaque modèle CAO de la pièce existante et de la pièce finale. Ensuite, les pièces sont positionnées en alignant les surfaces eS1, eS2 et eS3 avec les surfaces fS1, fS2 et fS3, respectivement. Il existe des épaisseurs suffisantes sur les surfaces fonctionnelles (fS5 et fS7) de la pièce finale (Figure 4.9a). Par la suite, le volume commun, le volume à enlever et le volume à ajouter sont extraits en utilisant les fonctions Booléennes du logiciel CAO (Figure 4.9b).

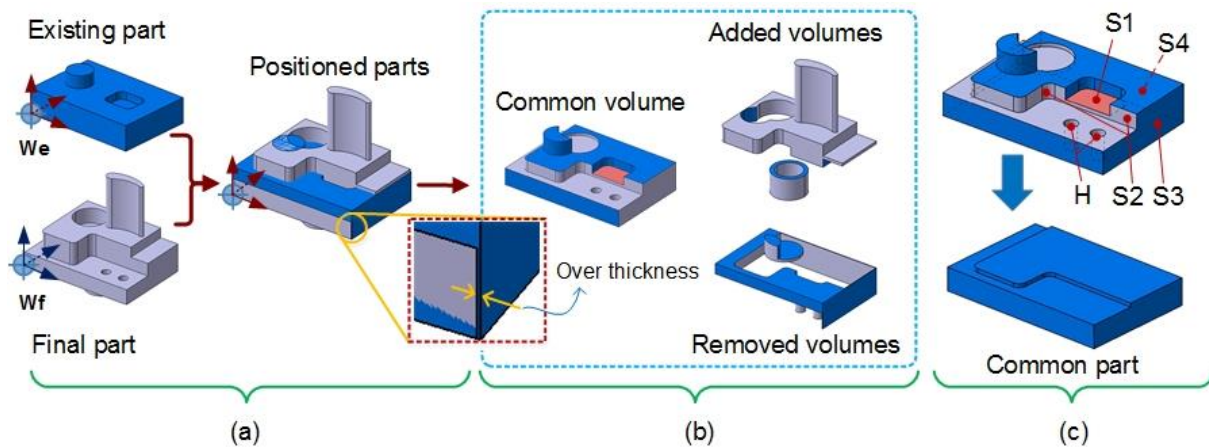


Figure 4.9. Illustration de l'étape A01-1 (a), de l'étape A01-2 (b), et de l'étape A01-3 (c).

Dans l'étape A01-3, la Figure 4.9c, le volume commun est modifié pour s'adapter à la configuration du dépôt de matière des procédés additifs et aux contraintes de précision. Tout d'abord, le volume au-dessus du plan ($S1$) doit être enlevé pour obtenir une surface plane, sur laquelle la matière sera déposée par les procédés PBF ou DED. Cela permet d'éviter les collisions entre les distributeurs de la poudre ou les buses de dépôt de matière et la pièce pendant ces processus de fabrication. De plus, les trous (H) qui n'existent pas sur la pièce existante seront usinés après les phases de fabrication additive pour éviter la difficulté de dé-poudrage. Enfin, des surépaisseurs suffisantes sont laissées sur les surfaces ($S3$ et $S4$), qui correspondent respectivement aux surfaces ($fS6$ et $fS7$), pour les opérations de finition en usinage. Cette épaisseur est une partie de matière de la pièce existante. La géométrie du volume commun après la modification s'appelle la partie commune.

Une fois que la partie commune est obtenue, les entités d'usinage et les entités de fabrication additive sont extraites dans les étapes A01-4 et A01-5 (Figure 4.10). Dans ce cas d'étude, nous avons trois entités de fabrication additive (AMF1, AMF2 et AMF3), qui sont extraites à partir de la partie commune, de la pièce finale et de la pièce existante (Figure 4.10b).

Les entités (AMF2 et AMF3) sont décomposées indépendamment pour respecter les contraintes d'accessibilité des outils. Si ces entités sont construites ensemble dans une phase de

fabrication additive, l'outil de coupe qui usine la poche (P) - correspondant à l'entité d'usinage MF4, rentre en collision avec l'entité AMF3. Une fois que l'entité AMF2 est construite, sa surface supérieure (correspondant à l'entité d'usinage MF3) doit être usinée pour obtenir une surface plane pour la construction de l'entité AMF3. Ainsi, les relations de précédence entre ces entités sont également créées : $AMF2 \rightarrow \{MF3, MF4\} \rightarrow AMF3$.

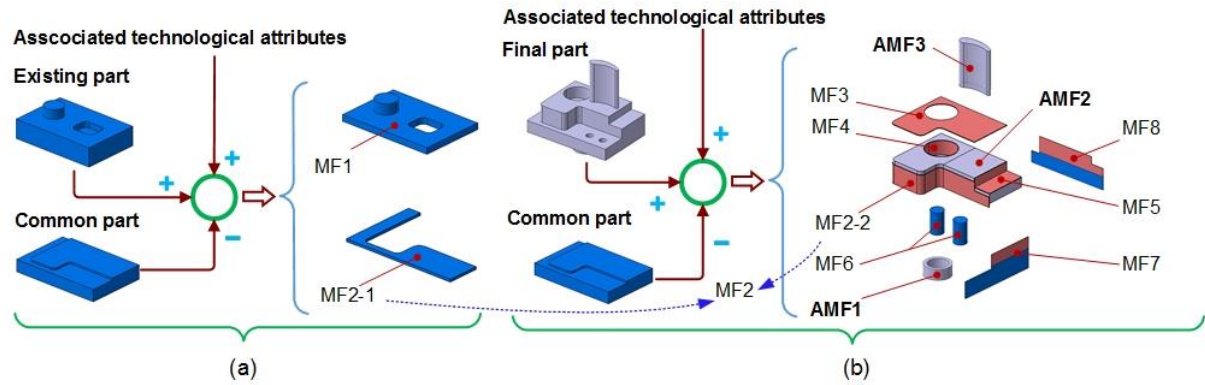


Figure 4.10. Illustration de l'étape A01-4 (a), et de l'étape A01-5 (b).

L'entité d'usinage MF1 correspond à la surface supérieure de la partie commune, sur laquelle l'entité AMF2 est construite. D'où, l'entité MF1 est également une précédence de l'entité AMF2 : $MF1 \rightarrow AMF2$. De plus, l'entité MF1 ayant comme état brut de la pièce existante est extraite à partir de la partie commune et de la pièce existante (Figure 4.10a).

L'entité AMF1 est construite sur la surface inférieure de la partie commune. L'entité AMF1 et l'entité AMF3 deviennent les entités finales. Elles ne nécessitent pas de reprise en usinage après leurs constructions. D'autre part, l'entité AMF2 fournit l'état brut des entités d'usinage (MF2 à MF8).

La géométrie de l'entité d'usinage MF5 est la marche (fS5) de la pièce finale. Son état brut vient de la construction de l'entité AMF2. La géométrie de l'entité d'usinage MF2 est la marche « irrégulière » (fS4) de la partie finale. Son attribut volumique comprend une partie issue de la partie commune (MF2-1) et une partie issue de l'entité AMF2 (MF2-2). Les entités d'usinage MF7 et MF8, correspondant respectivement aux surfaces finales fS6 et fS7, ont également un attribut volumique et un état brut, issus de la partie commune (partie bleue) et de l'entité AMF2 (partie orange). Dans ce cas, l'entité AMF2 a également une relation de précédence avec les entités d'usinage MF2, MF3, MF4, MF5, MF7 et MF8 : $AMF2 \rightarrow \{MF2 \text{ à } MF8\}$.

Les deux trous débouchant (H1 et H2) ont les mêmes caractéristiques et une tolérance de position serrée X6 ($IT = 0.06 \text{ mm}$), ils peuvent donc être considérés comme une entité d'usinage (MF6).

Notez que l'attribut volumique de l'entité AMF2 comprend le volume de l'entité finale correspondante et les attributs volumiques des entités MF2, MF3, MF4, MF5, MF7 et MF8 (parties orange sur la Figure 4.10b). Les attributs volumiques de ces entités (parties orange) sont les surépaisseurs qui sont estimées en fonction de la rugosité des surfaces générées par les procédés additifs, de la qualité requise de la surface finale et des conditions de coupe.

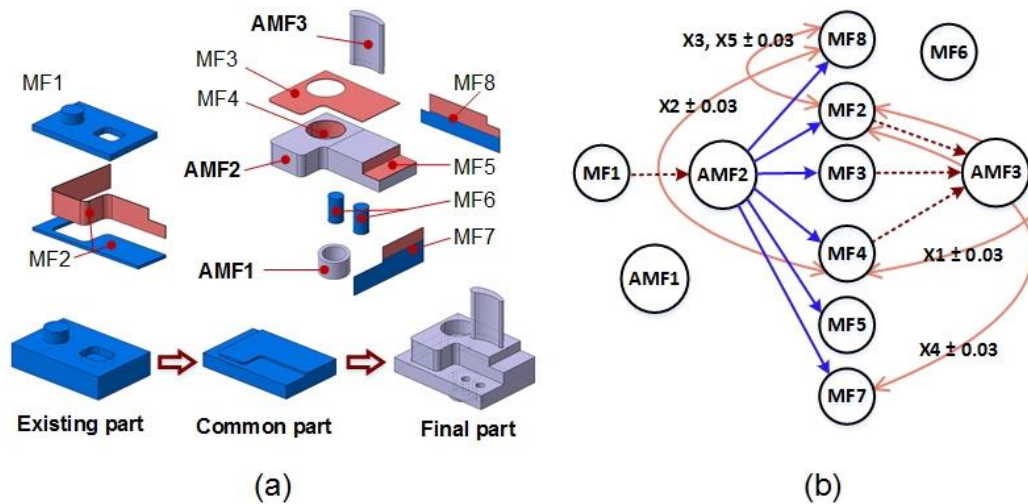


Figure 4.11. Les entités extraites (a) et leurs relations (b).

Enfin, toutes les entités d'usinage et de fabrication additive extraites sont affichées sur la Figure 4.11a. Les relations entre ces entités sont décrites à la Figure 4.11b :

- les flèches bleues présentent les relations topologiques entre entités. Par exemple, l'entité AMF2 devient l'état brut des entités MF2 à MF5, MF7 et MF8.

- les flèches en orange représentent les relations géométriques entre entités d'usinage. L'entité MF2 est en relation avec les entités MF7 et MF8 par les tolérances serrées de X4, X3 et X5 (IT = 0.06 mm). L'entité MF4 est contrainte en position avec les entités MF2 et MF8 par les tolérances X1 et X2 (IT = 0.06 mm).

- les flèches rouges représentent les relations de précédence des entités. L'entité d'usinage MF1 précède l'entité AMF2. Ainsi, il faut d'abord usiner MF1 pour obtenir la surface plane (la surface supérieure de la partie commune) pour la construction de l'entité AMF2. Les entités d'usinage (MF2, MF3 et MF4) doivent être traitées avant l'entité AMF3 pour éviter la collision entre les outils de coupe et l'entité AMF3.

4.5.2 Elaboration de gammes de fabrication

À partir des informations des entités extraites (c'est-à-dire les attributs associés des entités), un processus de fabrication associé à chaque entité est défini. D'après la **règle 1**, un

processus d'usinage a été défini pour chaque entité d'usinage, comme indiqué dans le Tableau 4.2. Les procédés de fabrication additive sont également sélectionnés pour créer les entités additives.

Tableau 4.2. Définition d'un processus de fabrication pour chaque entité.

Entité d'usinage	Qualité requise	Etat brut	Opération d'usinage
MF1	normale	Etat réel de la pièce existante	R – F
MF2	haute	Etat de surface près avoir usiné MF1 et construit l'entité AMF2	R – F
MF3, MF4, MF5, MF7 and MF8	haute	Etat de surface après avoir construit l'entité AMF2	F
MF6	qualité H8	Plein	R – SF – F
Entité de fab. additive	Caractéristiques	des opérations de finition sont-elles nécessaires?	Techniques de fab. additive
AMF1	paroi mince	Non	PBF
AMF2	block solide	Oui	PBF or DED
AMF3	block solide	Non	PBF

Après avoir défini un processus de fabrication pour chaque entité, les phases sont élaborées en prenant en compte des relations entre les entités (Figure 4.11b) et en appliquant les règles définies (dans la partie 4.4).

D'après **les règles 2 et 6**, l'entité MF1 doit être usinée dans la première phase. L'entité AMF1 précède l'entité AMF2 (**la règle 8**) ; elle est donc construite avant l'entité AMF2. Par la suite, les entités MF2, MF3 et MF4 doivent être usinées après la construction de l'entité AMF2 et avant la construction de l'entité AMF3 (**la règle 2**).

D'après **la règle 4**, les opérations des entités MF7 et MF8 sont réalisées après la construction de l'entité AMF3, si possible. Cependant, afin d'assurer les tolérances serrées des dimensions (X1 à X5), ces entités (MF7 et MF8) doivent être usinées dans la même phase que les entités (MF2 et MF4) (**la règle 3**).

L'entité d'usinage MF5 a deux directions d'usinage (+ Z ou + X). D'où, elle peut être usinée dans la même phase avec les entités (MF2, MF3 et MF4), qui ont la même direction d'usinage (+ Z). Cela permet de minimiser les temps de fabrication (**la règle 9**).

Pour l'entité d'usinage MF6, elle a deux directions d'usinage (+ Z ou -Z) et une qualité H8 est requise. Si la tolérance des dimensions X7 et X8 est serrée (par exemple, IT = 0.06 mm), cette entité doit être usinée dans la même phase que les entités MF7 et MF8 (selon **la règle 3**).

Sinon, il est préférable d'usiner l'entité MF6 après la construction de l'entité AMF3 pour éviter l'influence de la chaleur sur la qualité finale (**la règle 4**).

La Figure 4.12 présente la séquence des opérations de fabrication après avoir appliqué les règles. Dans la phase 4, les entités d'usinage (MF2 à MF8) sont usinées ensemble. Les opérations dans cette phase sont ordonnées en utilisant **les règles 10 et 11**. Comme nous l'avons indiqué précédemment, l'entité MF6 peut être usinée dans la phase 4 ou dans la phase 6 ; cela dépend de la tolérance des dimensions (X7 et X8).

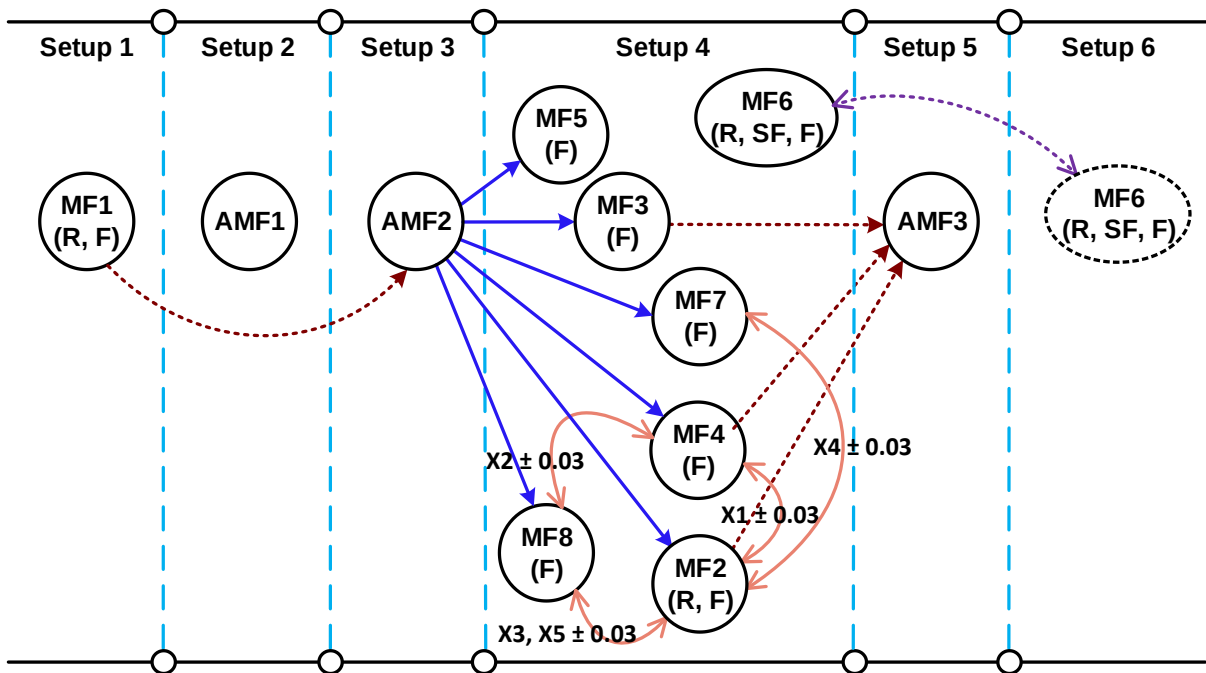


Figure 4.12. La séquence des processus de fabrication.

4.6 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, la deuxième question de recherche, qui porte sur la conception de gammes de fabrication combinant des opérations soustractives et additives est résolue. Le concept d'entités d'usinage et de fabrication additive est utilisé.

La conception de gammes de fabrication est effectuée en deux étapes :

- (i) les entités d'usinage et les entités de fabrication additive sont extraites à partir des informations et des modèles CAO des pièces existantes et finales.
- (ii) les entités extraites et leurs relations sont ensuite utilisées pour la conception de gammes de fabrication.

De plus, afin de respecter les contraintes de précédence, les contraintes d'accessibilité et de qualité, différentes règles sont définies et appliquées pour concevoir les différentes phases de fabrication.

Enfin, la méthodologie proposée pour la conception de gammes de fabrication est démontrée et illustrée grâce à un cas d'étude.

En comparaison avec les approches développées dans les travaux publiés (Newman et al., 2015) et (Zhu et al., 2017), la méthodologie peut être appliquée dans le cas de la fabrication des pièces métalliques. Les connaissances des procédés additifs métalliques (c'est-à-dire les procédés PBF et DED) sont exploitées pour la conception de gammes de fabrication. Les attributs des entités sont également évalués dans l'étape de l'extraction des entités. Ensuite, ils sont utilisés pour la conception de gammes de fabrication.

La limitation des travaux représentés dans ce chapitre est que la méthodologie proposée nécessite encore une intervention humaine, en particulier dans l'étape d'extraction des entités; Par conséquent, il serait intéressant d'intégrer les éléments dans un outil numérique CAPP (*Computer-Aided Process Planning*) pour générer la conception de gammes de fabrication de manière semi automatiquement dans le futur.

Chapitre 5 Evaluation des performances environnementales

5.0 Introduction

Les travaux menés dans ce chapitre visent à résoudre la troisième question de recherche :
« **La stratégie présente-t-elle des avantages par rapport à la stratégie conventionnelle en termes d'impacts environnementaux ? Et quelles méthodes d'évaluation utiliser ?** »

Pour répondre à cette question, dans la première partie de ce chapitre, une méthodologie d'évaluation des impacts environnementaux est proposée. Elle est développée en s'appuyant sur la méthode ACV (Analyse du Cycle de Vie), comme nous l'avons identifiée dans le chapitre 2.

L'évaluation des impacts environnementaux est réalisée en utilisant un cas d'étude, dans lequel le procédé EBM est combiné avec l'usinage à commande numérique pour fabriquer la pièce finale à partir de la pièce existante. La performance environnementale de la stratégie soutenable est également comparée avec celle de la stratégie conventionnelle, qui utilise les procédés traditionnels pour fabriquer la pièce (par exemple, le recyclage de matière, la production des pièces brutes et l'usinage).

Dans la deuxième partie, l'inventaire et la méthode de calcul des impacts environnementaux liés aux deux stratégies sont présentés. Ensuite, les résultats obtenus et la comparaison de performances environnementales entre deux stratégies sont présentés et discutés concrètement dans la troisième partie.

Pour finir, la quatrième partie conclut le contenu du chapitre.

Les résultats obtenus dans ce chapitre sont également présentés dans l'article suivant (Le et al., 2017d) :



Le V.T., Paris H., Mandil G. Environmental impact assessment of an innovative strategy based on an additive and subtractive manufacturing combination. *Journal of Cleaner Production* 2017; 164: 508-523. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.06.204.

5.1 Méthodologie d'évaluation des impacts environnementaux

5.1.1 Définition des objectifs et de l'unité fonctionnelle

L'objectif de l'étude est de comparer les impacts environnementaux générés par la fabrication de la pièce finale, d'une part en utilisant la stratégie soutenable ou, d'autre part, en utilisant une stratégie conventionnelle.

Dans cette étude, selon la stratégie soutenable, la pièce finale est fabriquée directement à partir de la pièce existante et de la poudre métallique en utilisant la combinaison des procédés de fabrication additive et d'usinage. Alors que, selon la stratégie conventionnelle, la pièce existante est recyclée pour produire un brut dans lequel la pièce finale est ensuite usinée. Il faut noter que la géométrie (et la masse) de la pièce finale fabriquée par les deux stratégies est identique. A partir des résultats présentés dans le chapitre 3, nous considérons également que la durée de vie de la pièce finale obtenue par ces stratégies est équivalente.

Afin de comparer les impacts environnementaux entre les deux stratégies, une **unité fonctionnelle** est utilisée. Elle est définie de la manière suivante : « **fabrication d'une pièce finale de masse M_f (kg) à partir d'une pièce existante précédemment identifiée** ».

Dans cette étude, la masse de la pièce finale est supposée plus grande que celle de la pièce existante. Le matériau des pièces est l'alliage de titane Ti-6Al-4V. Les compositions chimiques de l'alliage Ti-6Al-4V sont indiquées dans le Tableau 3.2, chapitre 3.

5.1.2 Frontières du système

Généralement, l'évaluation des impacts environnementaux d'un produit ou d'un processus de fabrication est réalisée en prenant en compte le cycle entier des produits, qui consiste en cinq étapes principales : l'extraction des matières premières, la production, le transport, l'utilisation et la fin de vie des produits.

Cependant, dans le cadre de cette étude, nous nous concentrons particulièrement sur l'évaluation des impacts environnementaux liés aux processus de fabrication de la pièce et aux transports associés. Le cas d'étude utilise une machine EBM, le modèle A1 du constructeur Arcam®, pour effectuer des opérations additives dans la stratégie soutenable et une machine-outil à commande numérique 3 axes (Fadal VMC 4020) pour les opérations soustractives dans les deux stratégies soutenable et conventionnelle. De plus, le nettoyage des pièces existantes et le traitement thermique potentiel (Figure 2.29, chapitre 2) ne sont pas inclus dans l'évaluation des impacts environnementaux.

La Figure 5.1 présente les processus de fabrication de la stratégie soutenable (Figure 5.1a) et de la stratégie conventionnelle (Figure 5.1b), qui sont pris en compte pour évaluer les impacts environnementaux. Les flèches rouges représentent le flux de la matière. Les flèches bleues représentent le flux de l'énergie électrique et des ressources (l'argon, l'eau et l'huile) consommées.

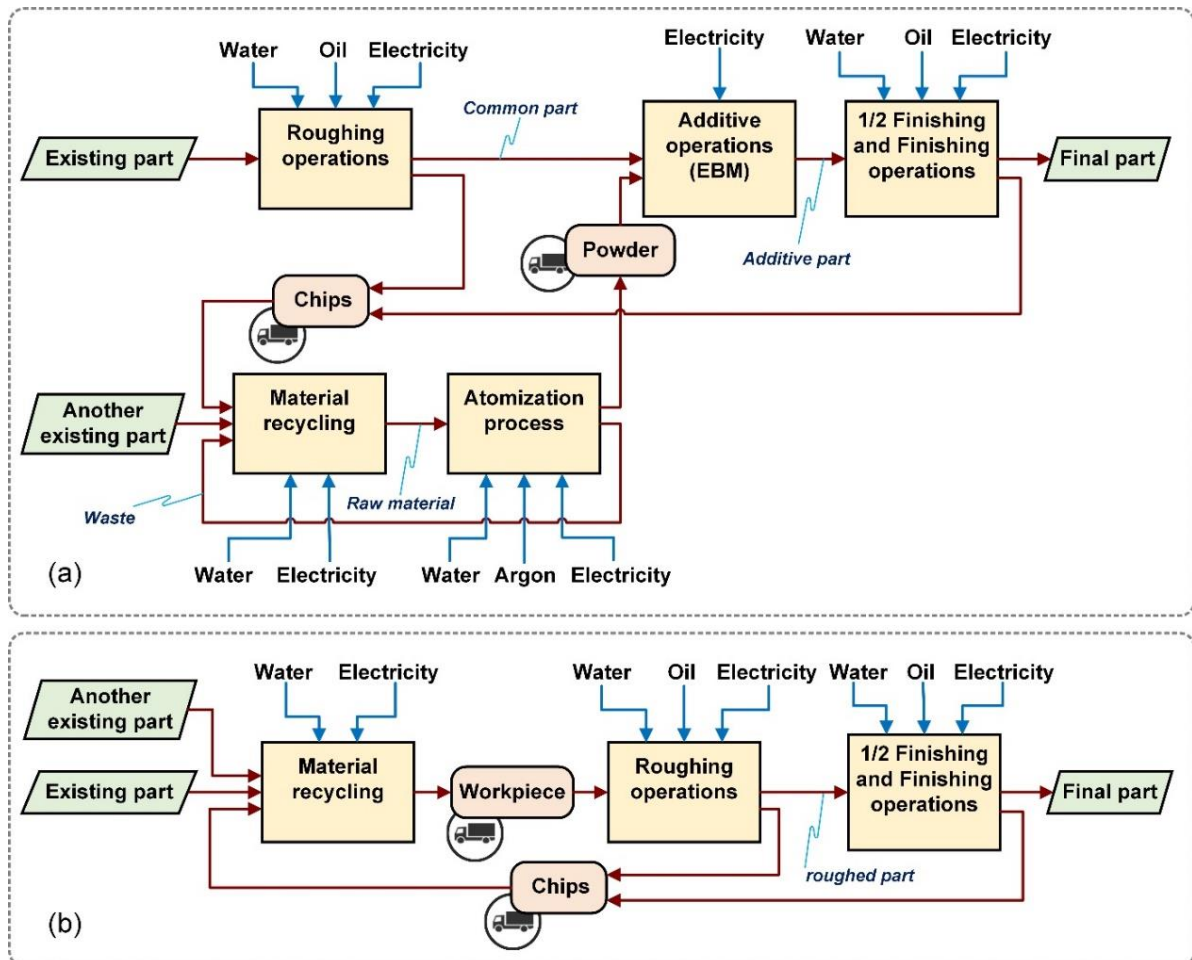


Figure 5.1. Le contour de l'étude d'analyse d'impacts environnementaux : (a) la stratégie soutenable et (b) la stratégie conventionnelle.

La Figure 5.1a présente les étapes pour fabriquer la pièce finale directement à partir de la pièce existante via la stratégie soutenable. Tout d'abord, la pièce existante est usinée sur la machine-outil à commande numérique afin d'obtenir une surface plane horizontale pour le dépôt de matière dans le procédé EBM. La pièce après cette étape s'appelle la partie commune. Elle représente le volume de matière de la pièce existante réutilisé pour fabriquer la pièce finale.

Par la suite, les nouvelles entités sont ajoutées sur la partie commune par le procédé EBM afin d'obtenir une géométrie proche de la pièce finale. La poudre de titane utilisée dans les opérations additives est produite par le procédé d'atomisation sous flux gazeux (Yolton and Froes,

2015). Les opérations de demi-finition et de finition sont ensuite réalisées sur la machine-outil pour atteindre la pièce finale avec les spécifications technologiques requises.

Les copeaux produits dans les opérations d'ébauche, de demi-finition et de finition (y compris des supports pour la construction des pièces en EBM), ainsi que les déchets de matière dans le procédé d'atomisation sont recyclés en matières premières par le procédé de fusion en creuset froid "*4C Process - Cold Crucible Continuous Casting Process*" (Durand, 2005). Lorsque la masse de la pièce finale est plus grande que celle de la pièce existante, une quantité supplémentaire de titane, qui est prise à partir d'une autre pièce existante (Recyclage), est également requise. Les matières premières obtenues à partir de la phase du recyclage sont, entre autre, utilisées pour produire de la poudre de titane dans le cycle de fabrication suivant. Dans ce cas, nous supposons que les transports des copeaux et de la poudre de titane sont effectués par le même type de camion.

La Figure 5.1b décrit la fabrication de la pièce finale via la stratégie conventionnelle. La même technique "*4C process*" est utilisée pour produire des pièces brutes à partir de la pièce existante, des copeaux générés dans les opérations d'ébauche, de demi-finition et de finition du cycle de fabrication précédent et d'une quantité supplémentaire de titane, qui est prise à partir d'une autre pièce existante. Ensuite, la pièce finale est obtenue à partir de la pièce brute par usinage. Nous supposons également que les transports des copeaux et des pièces brutes dans ce cas sont effectués par le même type de camion.

5.2 Inventaire du cycle de vie (ICV) et méthode de calcul

Pour évaluer les impacts environnementaux, les entrées et les sorties de chaque processus unitaire de fabrication associés aux deux stratégies (Figure 5.1) sont évaluées. Ensuite, les processus unitaires des deux stratégies sont modélisés dans le logiciel SimaPro (*version 8.0.4.30*).

Les paramètres utilisés pour calculer les consommations énergétiques et matérielles de ces stratégies sont résumés dans le Tableau 5.1. Dans le cas d'étude, nous supposons que la masse de la pièce existante est de 1 (kg). La masse des copeaux générés par les opérations de demi-finition et de finition dans la stratégie soutenable et la stratégie conventionnelle est également fixée à une valeur de 0.04 kg (c'est-à-dire $M_{finishing\ chip\ (a)} = M_{finishing\ chip\ (b)} = 0.04\text{ kg}$, Tableau 5.1).

Tableau 5.1. Paramètres utilisés pour calculer la consommation de l'énergie et des ressources.

Paramètre commun	Symbole	Unité
Masse de la pièce existante	$Me = 1$ (fixée)	kg
Masse de la pièce finale	Mf	kg
Masse de la partie commune	Mc	kg
Masse additionnelle requise pour fabriquer la pièce finale	M_{add}	kg
Masse de copeaux (chip) dans les opérations d'usinage	M_{chip}	kg
Profondeur axiale de coupe dans les opérations de fraisage (Fig. 5.6)	ap	mm
Profondeur radiale de coupe dans les opérations de fraisage (Fig. 5.6)	ae	mm
Vitesse d'avance dans les opérations d'usinage	Vf	mm/min
Vitesse de coupe dans les opérations d'usinage	Vc	m/min
Avance par dent dans les opérations d'usinage	fz	mm/dent
Diamètre de l'outil de coupe	D	mm
Nombre de dents de l'outil de coupe	z	-
Temps de coupe dans les opérations d'usinage	$t_{cutting}$	s
Débit d'enlèvement de matière en usinage (<i>Material Removal Rate</i>)	MRR	cm ³ /s
Consommation d'énergie spécifique en usinage (<i>Specific Energy Consumption</i>)	SEC	kJ/cm ³
Densité (masse volumique) de matériaux	ρ	g/cm ³
Capacité thermique de matériaux	C_p	J/g.K
Paramètre utilisé dans la stratégie soutenable (a)		
Masse de copeaux dans les opérations d'ébauche en usinage	$M_{roughing\ chip\ (a)}$	kg
Masse de copeaux dans les opérations de demi-finition et de finition en usinage	$M_{finishing\ chip\ (a)} = 0.04$ (fixée)	kg
Hauteur de la partie commune selon la direction de fabrication en EBM	Hc	mm
Hauteur de la pièce finale selon la direction de fabrication en EBM	Hf	mm
Hauteur de la plaque en acier selon la direction de fabrication en EBM	$H_{plate} = 10$ (fixée)	mm
Hauteur totale de fabrication des pièces en EBM	$H_{total\ build}$	mm
Masse de la poudre requise pour fabriquer la pièce en EBM	M_{powder}	kg
Masse de déchet de titane dans le procédé d'atomization	M_{waste}	kg
Paramètre utilisé dans la stratégie conventionnelle (b)		
Masse de copeaux dans les opérations d'ébauche en usinage	$M_{roughing\ chip\ (b)}$	kg
Masse de copeaux dans les opérations de demi-finition et de finition en usinage	$M_{finishing\ chip\ (b)} = 0.04$ (fixée)	kg
Masse de la pièce brute	Mw	kg

5.2.1 Recyclage de la matière

Dans cette étude, le procédé du recyclage, “4C process” (Durand, 2005), est utilisé pour recycler les copeaux et les déchets de titane dans la stratégie soutenable (Figure 5.1a) et pour produire les pièces brutes dans la stratégie conventionnelle (Figure 5.1b). Ce procédé se déroule sous vide. Le métal fondu dans un creuset froid passe dans une filière pour obtenir une barre. Le creuset et la filière sont refroidis par de l’eau, qui circule dans le mur du creuset. Ce procédé permet de recycler 100% des copeaux et des déchets de titane en matière première ou en pièces brutes. La pièce brute obtenue par cette technique est dense et directement adaptée à l’usinage (Durand, 2005). Les consommations de matière et de l’énergie pour recycler 1 kg de titane sont indiquées dans le Tableau 5.2.

Tableau 5.2. Consommations d’énergie et des ressources dans le processus du recyclage du titane et de production de poudre de titane (Paris et al., 2016).

Process Elément	Recyclage de 1 kg de déchet de titane	Atomisation: pour produire 1 kg de poudre de titane
Electricité	4.08 (kWh)	6.6 (kWh)
Eau	155 (l)	155 (l)
Argon	- (sous vide)	3.5 (m ³)
Titane	1 (kg)	1.03 (kg)

Comme nous l’avons indiqué précédemment, dans la stratégie soutenable, les copeaux et les déchets générés dans les phases d’usinage et d’atomisation et une quantité supplémentaire de matière issue d’une autre pièce existante ($M_{add} = M_f - M_e$) sont recyclés en matières premières. Ces matières sont ensuite utilisées pour produire la poudre de titane. La masse totale de titane à recycler est calculée par l’Eq. 5-1 :

$$M_{\text{titanium chips and waste}} = M_{add} + M_{\text{roughing chip (a)}} + M_{\text{finishing chip (a)}} + M_{\text{waste}} \quad (\text{Eq. 5-1})$$

Dans la stratégie conventionnelle, la pièce brute est produite directement à partir de la pièce existante, des copeaux générés par les opérations d’usinage et d’une quantité supplémentaire de titane ($M_{add} = M_f - M_e$), qui est issue d’une autre pièce existante. La masse de la pièce brute est calculée par l’Eq. 5-2 :

$$M_w = M_e + M_{add} + M_{\text{roughing chip (b)}} + M_{\text{finishing chip (b)}} \quad (\text{Eq. 5-2})$$

5.2.2 Production de la poudre

Plusieurs techniques existent pour produire des poudres métalliques. Nous pouvons citer le procédé d'électrode rotative au plasma (*plasma rotating electrode process, PREP*), l'atomisation sous flux gazeux (*gas atomization, GA*), et l'atomisation par plasma (*plasma atomization*). Le procédé d'atomisation sous flux gazeux est principalement utilisé (Yolton and Froes, 2015).

Le principe d'atomisation sous flux gazeux est présenté dans la partie 2.1.1, chapitre 2. Pour les alliages à base de titane, ce procédé permet une production de poudre avec une efficacité élevée - environ 97% de titane est transformé en poudre de titane (Khatim, 2011). Les consommations d'énergie et de matières pour produire 1 kg de la poudre de titane sont données dans le Tableau 5.2.

Dans notre étude, la masse de poudre requise pour fabriquer la pièce finale est calculée par l'Eq. 5-3 :

$$M_{\text{powder}} = M_f + M_{\text{finishing chip (a)}} - M_c \quad (\text{Eq. 5-3})$$

5.2.3 Consommation énergétique en EBM

Les opérations additives dans la stratégie soutenable sont effectuées sur la machine EBM, modèle A1 d'Arcam®. Les informations détaillées et le principe de fabrication sont présentés dans la partie 2.1.2.2 du chapitre 2.

La Figure 5.2 présente l'évolution de la température de la surface au-dessous de la plaque de construction pendant les quatre étapes de fabrication en EBM (c'est-à-dire, le vide, le préchauffage, la fusion et le refroidissement). Ces étapes sont brièvement décrites dans les paragraphes suivants :

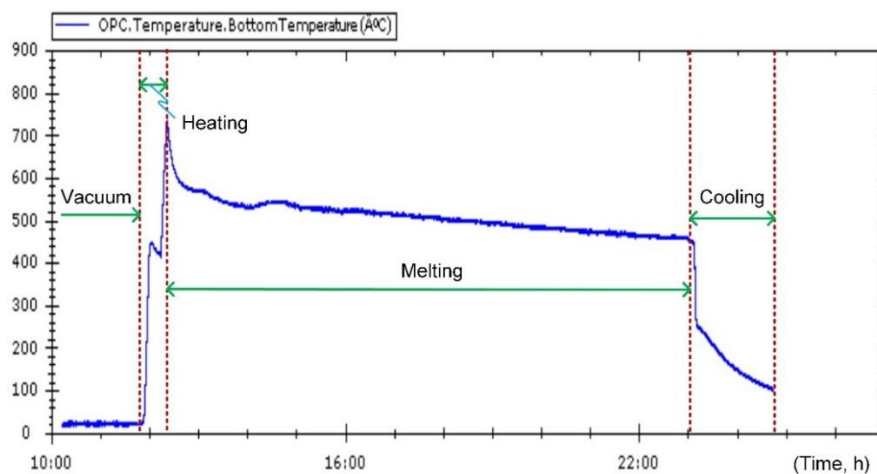


Figure 5.2. Evolution de la température de la surface au-dessous de la plaque de construction.

- Tout d’abord, une plaque en acier inoxydable 316L (ayant comme dimensions 210 mm x 210 mm x 10 mm) est placée sur la table de fabrication de la machine. La poudre de titane chargée dans les deux conteneurs est étalée sur la plaque par le râteau. Par la suite, le vide est effectué jusqu’au moment où la pression de la chambre de fabrication atteint 10^{-5} (mbar). Notez que dans cette étude, la partie commune obtenue à partir de la pièce existante est également positionnée sur la plaque en acier et immergée dans la poudre. La surface de départ de la construction est la surface supérieure de la partie commune.

- Lorsque le vide est atteint, le préchauffage est effectué. La plaque, la partie commune et la poudre autour de la partie commune sont chauffées par le faisceau d’électrons jusqu’au moment où la température de la surface supérieure de la partie commune atteint la température initiale de fabrication (750°C dans le cas de l’alliage Ti-6Al-4V). À ce moment-là, la construction de la première couche peut commencer. La fabrication des pièces est effectuée couche par couche.

- Lorsque les pièces sont terminées, l’étape de refroidissement sous vide est exécuté jusqu’au moment où la température de la surface au-dessous de la plaque atteint 100°C. À partir de ce moment, le bloc de poudre, y compris les pièces construites, peut être retiré de la machine. Les pièces fabriquées sont ensuite extraites du bloc de poudre.

Dans le procédé EBM, on considère que toute la poudre non utilisée est réutilisée pour produire les pièces suivantes. Ainsi, la quantité de poudre consommée dans cette phase est égale à la poudre utilisée pour construire les pièces et les supports nécessaires (Vayre et al., 2013).

La consommation d’énergie électrique est l’énergie totale utilisée pendant les quatre étapes (Figure 5.2). Afin de mesurer l’énergie consommée dans le procédé EBM, un appareil de mesure d’énergie est utilisé (Figure 5.3a). Le principe de cet appareil est de mesurer les valeurs de la tension et du courant à l’entrée de la machine-outil ou de ses composants. Cet appareil peut enregistrer automatiquement les résultats de la mesure, tels que les valeurs et le profil de la puissance consommée pendant tout le temps du travail de la machine-outil.

Pour effectuer les mesures d’énergie consommée par la machine EBM (Figure 5.3c), les câbles et les pinces crocodiles sont utilisés pour mesurer la tension. Les pinces ampérométriques mesurent l’intensité. Les câbles et les pinces de différentes couleurs sont branchés sur les trois phases au niveau des fusibles d’entrées de la machine (Figure 5.3b). La puissance consommée par la machine, qui est fonction de la tension et de l’intensité, est ainsi mesurée.

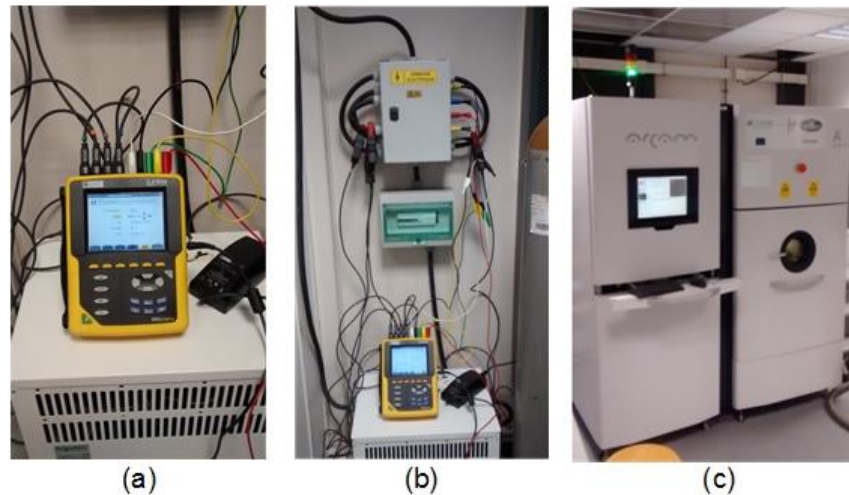


Figure 5.3. Mesure de la consommation de l'énergie électrique: (a) l'appareil pour mesurer l'énergie consommée ; (b) le branchement des câbles de l'appareil ; et (c) la machine EBM.

A partir des mesures d'énergie consommée, on constate que l'énergie consommée dans l'étape de création du vide peut être considérée comme une valeur indépendante des pièces fabriquées. Le vide est effectué en environ 1 heure 15 minutes, et consomme environ 1.78 (kWh) d'électricité (Tableau 5.3). L'énergie consommée dans la phase de préchauffage dépend de la taille de la plaque en acier utilisée. Dans la fabrication normale de l'EBM où une plaque en acier inoxydable ayant pour dimensions 210 mm x 210 mm x 10 mm, la phase de préchauffage se déroule en 40 minutes et consomme environ 2.02 (kWh) d'électricité (Tableau 5.3). Cependant, dans cette étude, il faut également tenir compte de l'énergie consommée pour chauffer la partie commune et la poudre remplie autour d'elle, comme illustré sur la Figure 5.4.

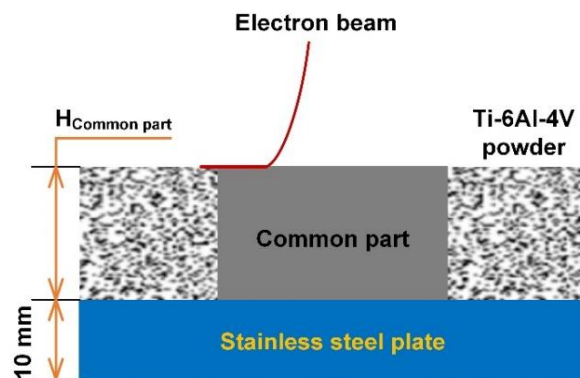


Figure 5.4. Préchauffage de la partie commune, la plaque et la poudre remplie autour de la partie commune.

En fait, le ratio de porosité de la poudre de titane présente une valeur de 0.39. La capacité thermique et la densité des matériaux (l'alliage Ti-6Al-4V et l'acier inoxydable) dépendent de la température des matériaux (Arce, 2012). Cependant, pour simplifier le calcul de l'énergie consommée pour chauffer la partie commune et la poudre, nous supposons que la poudre et la

partie commune ont les mêmes propriétés physiques. Ainsi, la partie commune et la poudre, qui est remplie autour de la partie commune sur la plaque acier inoxydable (Figure 5.4), sont considérées comme une plaque solide en titane. Elle a la même surface comme celle de la plaque en acier inoxydable. La capacité thermique de l'alliage de Ti-6Al-4V ($C_{p(Ti-6Al-4V)}$) et la plaque en acier inoxydable ($C_{p(316L\ steel)}$) sont également fixées à 0.553 (J/g.K) et 0.44 (J/g.K), respectivement. En se basant sur ces hypothèses, le rapport ($RE_{titanium/steel}$) entre l'énergie requise pour chauffer la partie commune et la poudre et l'énergie requise pour chauffer la plaque en acier inoxydable, de $T_0 = 20^\circ\text{C}$ (la température ambiante) à $T_b = 750^\circ\text{C}$, est calculé par l'Eq. 5-4 :

$$RE_{titanium/steel} = E_{heating}^{common\ part\ and\ powder} / E_{heating}^{steel\ plate} = \frac{C_{p(Ti-6Al-4V)} * m_{(Ti-6Al-4V)} * \Delta T}{C_{p(316L\ steel)} * m_{plate} * \Delta T}$$

$$= \frac{C_{p(Ti-6Al-4V)} * \rho_{(Ti-6Al-4V)} * H_c}{C_{p(316L\ steel)} * \rho_{(316L\ steel)} * H_{plate}} = 0.07 * H_c \quad (\text{Eq. 5-4})$$

Où $\rho_{(Ti-6Al-4V)} = 4.43 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ et $\rho_{(316L\ steel)} = 7.87 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ correspondant à la densité de l'alliage Ti-6Al-4V et de l'acier inoxydable 316L ; $H_{plate} = 10 \text{ (mm)}$ et $H_c \text{ (mm)}$ sont respectivement la hauteur de la plaque et de la partie commune ; $\Delta T = T_b - T_0$.

Alors, l'énergie consommée pour chauffer la partie commune et la poudre est approximativement calculée par l'Eq. 5-5:

$$E_{heating}^{common\ part\ and\ powder} = 0.07 * H_c * E_{heating}^{steel\ plate} = 0.14 * H_c \quad (\text{Eq. 5-5})$$

L'énergie consommée dans les phases de fusion et de refroidissement est estimée à l'aide de trois cas de fabrication. La hauteur totale de fabrication varie selon les trois valeurs suivantes : {10 mm ; 35 mm ; et 59.25 mm}, tandis que la section transversale des pièces est du même ordre de grandeur et la même plaque en acier inoxydable est utilisée. Les consommations d'énergie mesurées sont données dans le Tableau 5.3.

Tableau 5.3. Consommation de l'énergie mesurée dans les trois cas de fabrication.

	Consommation d'énergie (kWh)			Valeur estimée (kWh)
	Fab. (1) (10 mm)	Fab. (2) (35 mm)	Fab. (3) (59.25 mm)	
Vide	1.78	1.78	1.78	$E_{vacuum} = 1.78$
Chauffage	2.02	2.02	2.02	$E_{heating}^{steel\ plate} = 2.02$
Fusion	7.10	19.20	31.51	$E_{melting} = 0.4956 * H_{total\ build} + 2.0488$
Refroidissement	0.494	1.6	2.42	$E_{cooling} = 0.0391 * H_{total\ build} + 0.1448$

On constate que l'énergie électrique consommée dans les phases de fusion et de refroidissement est linéaire avec la hauteur totale de construction des pièces (Figure 5.5), même si les contours des sections transversales des pièces dans les trois cas de fabrication sont différents. Ceci est compatible avec l'observation faite dans le travail de (Baumers et al., 2016), dans lequel les auteurs ont démontré que les consommations de l'énergie du système EBM n'est pas liée à la complexité de forme des pièces.

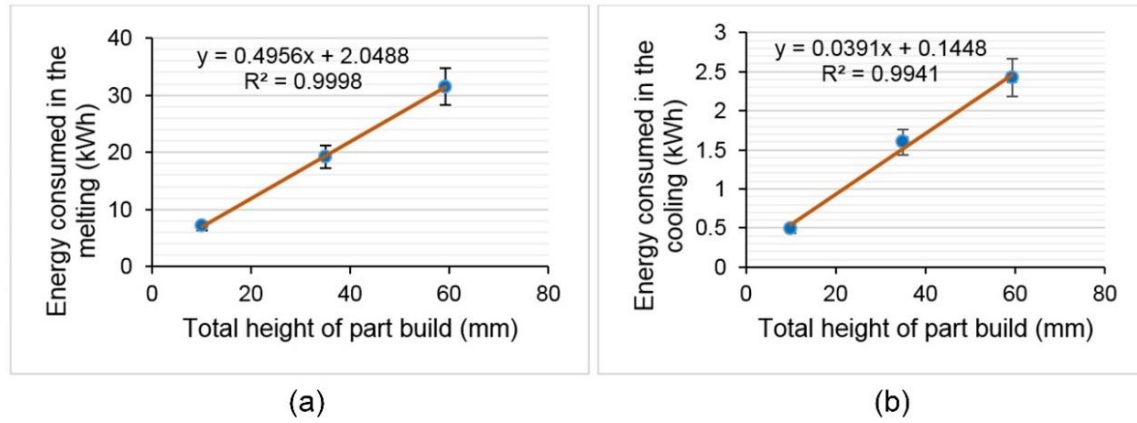


Figure 5.5. Consommation d'énergie dans les phases de fusion (a) et de refroidissement (b) en fonction de la hauteur totale de fabrication.

A partir de ces résultats, la consommation totale d'énergie dans notre cas d'étude peut être déterminée par l'Eq. 5-6 :

$$\begin{aligned}
 E_{\text{energy consumption (EBM)}} &= E_{\text{vacuum}} + E_{\text{heating}}^{\text{steel plate}} + E_{\text{heating}}^{\text{common part and powder}} \\
 &\quad + E_{\text{melting}} + E_{\text{cooling}} \\
 &= 1.78 + 2.02 + 0.14 * Hc + 0.4956 * (Hf - Hc) + 2.0488 \\
 &\quad + 0.0391 * Hf + 0.1448 \\
 &= 5.9936 + 0.5347 * Hf - 0.3556 * Hc \quad (\text{Eq. 5-6})
 \end{aligned}$$

5.2.4 Consommation d'énergie et de ressources en usinage

Comme nous l'avons introduit précédemment, la machine-outil à commande numérique 3 axes est utilisée pour exécuter des opérations soustractives dans la stratégie soutenable et la stratégie conventionnelle.

Les opérations d'ébauche dans la stratégie soutenable visent à obtenir une surface plane horizontale de la partie commune pour le dépôt de matière en utilisant le procédé EBM. Les opérations de demi-finition et de finition sont exécutées après les opérations additives pour atteindre la géométrie et la qualité requise de la pièce finale (Figure 5.1a). Alors que les opérations

d'ébauche et de finition dans la stratégie conventionnelle permettent d'obtenir la pièce finale à partir de la pièce brute (Figure 5.1b).

Pendant les opérations d'usinage, le fluide de refroidissement - un mélange d'huile et d'eau (environ 70% à 90% d'eau), est utilisé pour améliorer la qualité des surfaces usinées et la durée de vie des outils. Les éléments à calculer dans les opérations d'usinage sont l'électricité, l'eau et l'huile consommés, ainsi que les copeaux produits.

Dans cette étude, nous retenons le modèle empirique développé par (Kara and Li, 2011), Eq. 5-7, pour calculer la consommation d'énergie spécifique (*Specific Energy Consumption, SEC*) des machines-outils :

$$SEC = C_0 + \frac{C_1}{MRR} \quad (\text{Eq. 5-7})$$

Où le SEC (kJ/cm^3) présente la consommation totale d'énergie de la machine-outil pour enlever 1 (cm^3) de matière; C_0 and C_1 sont les coefficients spécifiques de la machine. Pour la machine à commande numérique 3 axes (Fadal VMC 4020), en utilisant un fluide de coupe, les coefficients spécifiques de cette machine sont $C_0 = 3.082$ (kJ/cm^3) et $C_1 = 1.396$ (kW) (Kara and Li, 2011). MRR (*Material Removal Rate*, cm^3/s) présente le débit d'enlèvement de matière, qui dépend des paramètres de coupe. Il est calculé à partir des paramètres de coupe (Eq. 5-8) :

$$MRR = \frac{ap \cdot ae \cdot Vf}{60 \cdot 10^3} \quad (\text{Eq. 5-8})$$

Où ap (mm) est la profondeur axiale de coupe; ae (mm) est la profondeur radiale de coupe (Figure 5.6). Vf (mm/min) est la vitesse d'avance, qui peut être déterminée à partir de la vitesse de coupe Vc (m/min), de l'avance par dent fz (mm/dent), du nombre de dents (z) et du diamètre D (mm) de l'outil de coupe, l'Eq. 5-9 :

$$Vf = \frac{1000 \cdot Vc \cdot fz \cdot z}{\pi \cdot D} \quad (\text{Eq. 5-9})$$

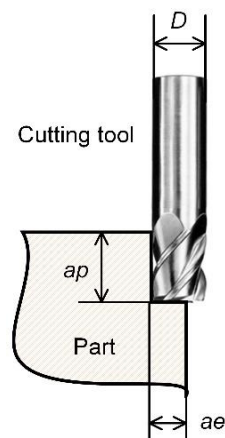


Figure 5.6. Illustration de la profondeur axiale (ap) et de la profondeur radiale (ae) de coupe dans les opérations de fraisage.

En utilisant les données précisées dans le Tableau 5.4, qui sont utilisées pour les opérations d'usinage dans le cas de notre étude, le SEC pour les opérations d'ébauche et les opérations de demi-finition et de finition est calculé : $SEC_{(roughing)} = 10.39$ (kJ/cm³) and $SEC_{(finishing)} = 44.83$ (kJ/cm³).

Tableau 5.4. Paramètres de coupe pour les opérations d'ébauche, de demi-finition et de finition.

Paramètre de coupe	ap (mm)	ae (mm)	fz	Vc	D (mm)	z	MRR
Opération			(mm/dent)	(m/min)			(cm ³ /s)
Ebauche	4	15	0.075	40	20	4	0.1911
½ Finition et Finition	0.5	7.5	0.070	60	10	4	0.0334

A partir de SEC , la consommation d'énergie (kWh) des opérations d'usinage peut être calculée par l'Eq. 5-10 :

$$E_{electricity\ consumption\ (machining)} = \frac{1000 * SEC * M_{chip}}{3600 * \rho} = \frac{SEC * M_{chip}}{3.6 * \rho} \quad (\text{Eq. 5-10})$$

Où M_{chip} (kg) est la masse de copeaux enlevés dans les opérations d'ébauche ou de demi-finition et de finition ; ρ (g/cm³) est la masse volumétrique de la matière. Dans notre étude, le matériau des pièces est l'alliage Ti-6Al-4V ; alors $\rho = 4.43$ (g/cm³).

D'après (Kellens et al., 2012a), une partie du fluide de refroidissement (l'eau et l'huile) est perdue pendant l'usinage. Le débit de pertes de l'huile et de l'eau est estimé à environ 0.042 (g/s) et 0.238 (g/s), respectivement. Le temps de coupe des opérations, $t_{cutting}$ (s), peut être calculé approximativement à partir de la masse de copeaux à enlever (M_{chip}) et du MRR par l'Eq. 5-11 :

$$t_{cutting} = \frac{1000 * M_{chip}}{\rho * MRR} \quad (\text{Eq. 5-11})$$

Alors, la consommation d'eau et d'huile dans les opérations d'usinage, $M_{water\ consumption}$ (g) et $M_{oil\ consumption}$ (g), peut être calculée par l'Eq. 5-12 et l'Eq. 5-13, respectivement :

$$M_{water\ consumption} = 0.238 * t_{cutting} = \frac{238 * M_{chip}}{\rho * MRR} \quad (\text{Eq. 5-12})$$

$$M_{oil\ consumption} = 0.042 * t_{cutting} = \frac{42 * M_{chip}}{\rho * MRR} \quad (\text{Eq. 5-13})$$

Dans la stratégie soutenable, la quantité de copeaux produits dans les opérations d'ébauche, $M_{roughing\ chip\ (a)}$ (kg), peut être calculée à partir de la masse de la pièce existante (Me , kg) et de la masse de la partie commune (Mc , kg), l'Eq. 5-14:

$$M_{roughing\ chip\ (a)} = Me - Mc \quad (\text{Eq. 5-14})$$

Dans la stratégie conventionnelle, la quantité des copeaux produits dans les opérations d'ébauche est déterminée par l'Eq. 5-15 :

$$M_{roughing\ chip\ (b)} = Mw - (Mf + M_{finishing\ chip\ (b)}) = (K - 1) * Mf - M_{finishing\ chip\ (b)} \quad (Eq. 5-15)$$

Où Mw est la masse de la pièce brute, K est le ratio du volume de matière à enlever en usinage (Eq. 5-16), et le terme $(K - 1)*Mf$ présente la quantité totale de copeaux à enlever.

$$K = \frac{Mass\ of\ the\ workpiece\ (Mw)}{Mass\ of\ the\ final\ part\ (Mf)} \quad (Eq. 5-16)$$

La consommation d'énergie et de ressources (l'eau et l'huile) dans les opérations d'ébauche dépend soit de Mc dans la stratégie soutenable, soit de Mf et de K dans la stratégie conventionnelle (voir les Eq 5-7 à Eq. 5-16).

Comme la masse de copeaux générée dans les opérations de demi-finition et de finition est fixée ($M_{finishing\ chip\ (a)} = M_{finishing\ chip\ (b)} = 0.04\ kg$), l'électricité, l'eau et l'huile consommées dans les deux stratégies sont estimées à 0.112 (kWh) de l'électricité, 643 (g) de l'eau et 113 (g) de l'huile.

5.2.5 Calcul des impacts environnementaux et comparaison des stratégies de fabrication

Pour comparer les performances environnementales entre la stratégie soutenable et la stratégie conventionnelle, les scénarios suivants sont proposés (Tableau 5.5) :

- Dans le premier scénario, la masse de la partie commune (Mc) prend les valeurs {0.4 ; 0.6 ; et 0.8 kg} et pour hauteurs {8; 12; et 16 mm}, respectivement. La masse de la pièce finale et sa hauteur le long de la direction de construction en EBM sont fixées ($Mf = 1.2\ kg$ et $Hf = 20\ mm$). La valeur de K dans la stratégie conventionnelle varie et prend les valeurs {3; 5; et 7}.
- Dans le deuxième scénario, la masse de la partie commune, la valeur de K et la masse de la pièce finale sont fixées ($Mc = 0.8\ kg$; $K = 7$ et $Mf = 1.6\ kg$), tandis que la hauteur de la pièce finale (Hf) varie et prend les valeurs suivantes : {20; 40; 60; et 80 mm}.

Tableau 5.5. Deux scénarios pour comparer la performance environnementale entre les deux stratégies.

Scénario 1: $Mf = 1.2\text{ kg}$; $Hf = 20\text{ mm}$; $K = \{3; 5; 7\}$				
$Mc\text{ (kg)}$	0.4	0.6	0.8	
$Hc\text{ (mm)}$	8	12	16	
Scénario 2: $Mc = 0.8\text{ kg}$; $Mf = 1.6\text{ kg}$; $K = 7$				
$Hf\text{ (mm)}$	20	40	60	80

Le premier scénario nous permet d'étudier le rôle de Mc (c'est-à-dire la quantité de matière de la pièce existante à réutiliser) et la quantité d'enlèvement de matière, $(K - 1)*Mf$, sur la comparaison de performance environnementale entre les deux stratégies. D'autre part, le deuxième

scénario permet d'étudier l'influence de la hauteur de la pièce finale sur les impacts environnementaux.

Après avoir déterminé les entrées et les sorties pour chaque processus unitaire dans les deux stratégies, ces scénarios sont modélisés dans le logiciel SimaPro (version 8.0.4.30) avec la base de données Ecoinvent (version 3.1). Pour calculer les impacts environnementaux, les méthodes CExD (version 1.04) et CML 2 Baseline 2000 (version 2.05) sont utilisées. La méthode CExD a été développée afin de quantifier la demande d'exergie du cycle de vie d'un produit ou d'un procédé de fabrication. Cette méthode est définie comme la somme d'exergie de toutes les ressources requises pour un processus de fabrication ou un produit (Bösch et al., 2007). D'autre part, dans la méthode CML 2 Baseline 2000, les indicateurs sont agrégés en fonction de leurs contributions relatives aux impacts environnementaux qu'ils peuvent causer.

Le rapport R calculé par l'Eq. 5-17 pour chaque indicateur d'impact environnemental est utilisé pour comparer les impacts environnementaux entre deux stratégies.

$$R = \frac{\text{Environmental impact of the sustainable strategy}}{\text{Environmental impact of the conventional strategy}} \quad (\text{Eq. 5-17})$$

Pour chaque indicateur, si la valeur R est inférieure à 1, la stratégie soutenable est moins impactante sur l'environnement que la stratégie conventionnelle. Dans le cas où R est supérieur à 1, la stratégie soutenable est plus impactante sur l'environnement pour produire la pièce. Si R est égal à 1, les deux stratégies sont similaires en termes d'impacts environnementaux.

5.3 Résultats et les discussions

Dans cette étude, les résultats obtenus correspondent aux dix indicateurs d'impacts environnementaux, qui sont choisis à partir des méthodes CExD et CML 2 Baseline 2000. Quatre indicateurs viennent de la méthode CExD : *non-renewable fossil* (1), *non-renewable nuclear* (2), *renewable potential* (3), *renewable water* (4). Et six indicateurs sont issus de la méthode CML 2 Baseline 2000 : *abiotic depletion* (5), *acidification* (6), *global warming* (7), *human toxicity* (8), *fresh water aquatic ecotox* (9), et *marine aquatic ecotoxicity* (10). Ces indicateurs présentent des impacts environnementaux relativement variés et ils sont largement utilisés dans les études identifiées dans la littérature (Carvalho et al., 2014; Paris et al., 2016; Peng et al., 2017; Serres et al., 2011; Tang et al., 2016).

La Figure 5.7 présente, pour les deux stratégies, la contribution des éléments de l'inventaire sur les impacts environnementaux. Tout d'abord, on constate que les consommations d'énergie et d'argon provoquent principalement des impacts environnementaux dans la stratégie soutenable.

Alors que la consommation d'énergie et des liquides de coupe en usinage sont les éléments principaux qui causent des impacts environnementaux dans la stratégie conventionnelle.

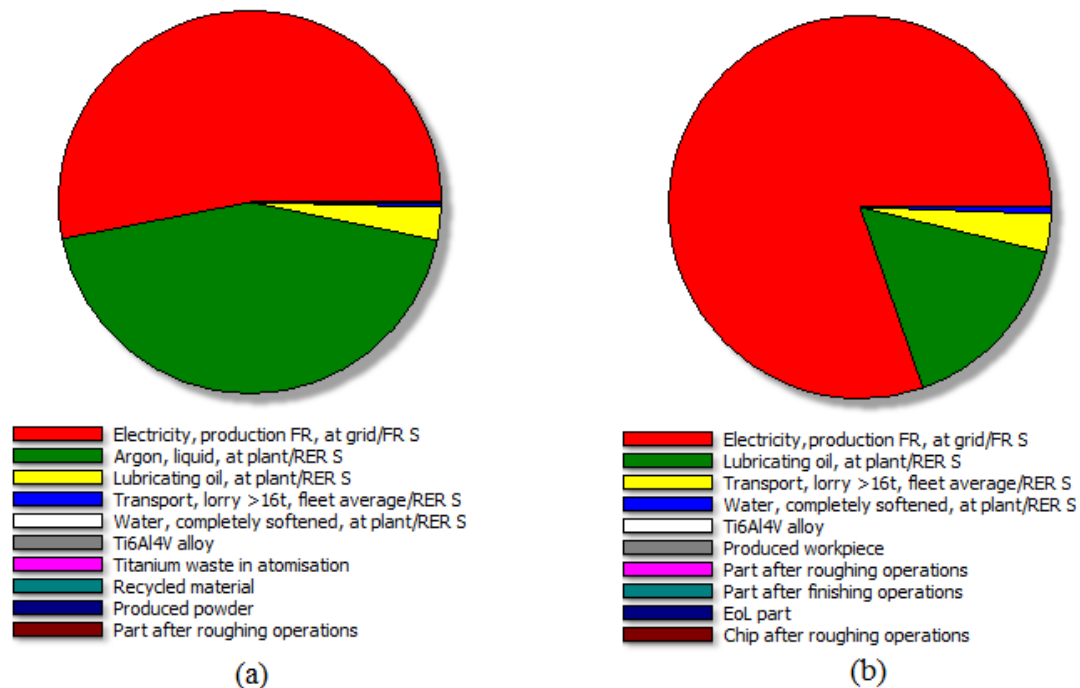


Figure 5.7. Contribution des éléments de l'inventaire sur les impacts environnementaux dans le cas $Mc = 0.6$ kg ; $K = 5$, d'après la méthode CML 2 Baseline 2000 : (a) la stratégie soutenable et (b) la stratégie conventionnelle.

La Figure 5.8 montre l'évolution de R dans le premier scénario selon les indicateurs sélectionnés en fonction de K et de Mc . On constate que la tendance d'évolution de R est similaire pour tous ces indicateurs. La valeur de R diminue lorsque Mc ou K augmente. En particulier, la valeur de R est toujours inférieure à 1 pour $Mc = 0.8$ (kg) et K est supérieur à 5 (Figure 5.8a et Figure 5.8b). Cela signifie que la stratégie soutenable devient plus respectueuse de l'environnement que la stratégie conventionnelle dans le cas où la masse de matière de la pièce existante à réutiliser (Mc) et le rapport d'enlèvement de matière par l'usinage dans la stratégie conventionnelle (K , Eq. 5-16) augmentent.

Nous pouvons remarquer que la compétition entre les deux stratégies sur l'aspect environnemental peut être évaluée en utilisant l'indicateur (10) car la valeur de R d'après cet indicateur est la plus importante. La Figure 5.8c montre l'évolution de R en fonction de Mc et de K selon cet indicateur. Dans ce cas, la stratégie soutenable est plus respectueuse de l'environnement lorsque K est supérieur à 4.6 ; ou 6.2 ; ou 7.6 lorsque Mc correspond à 0.8 ; ou 0.6 ; ou 0.4 (kg), respectivement.

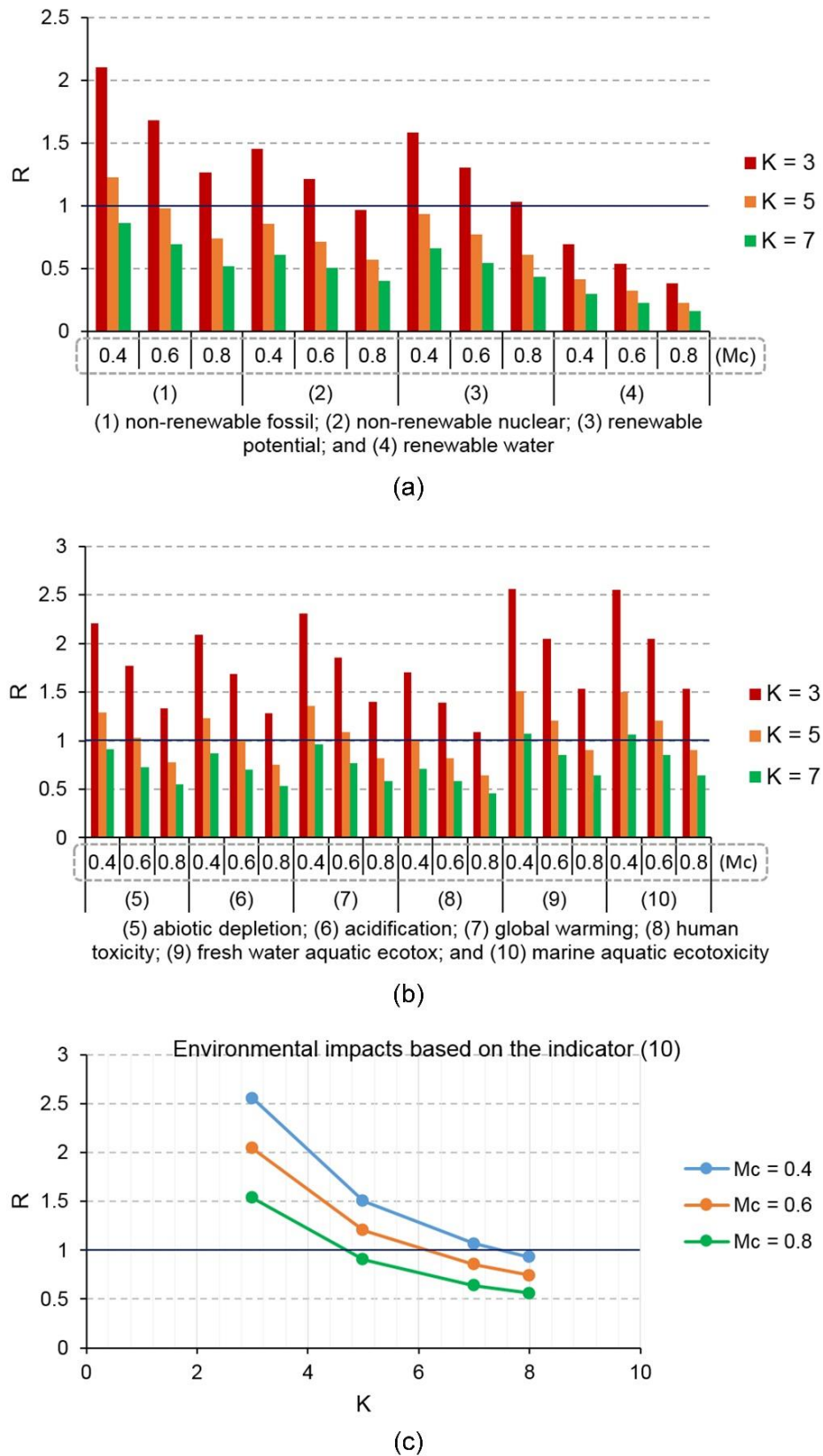


Figure 5.8. Evolution de R en fonction de Mc et K dans le cas $Mf = 1.2$ kg, d'après (a) quatre indicateurs provenant de la méthode CExD, (b) six indicateurs provenant de la méthode CML 2 Baseline 2000, et (c) l'évolution de R en fonction de K pour $Mc = \{0.4 ; 0.6 ; \text{et } 0.8\}$ d'après l'indicateur (10).

A partir de cette observation, la stratégie soutenable devient la meilleure option du point de vue environnemental lorsque K est supérieur à 4.6 et Mc est égal ou supérieur à 80% de la masse de la pièce existante. La raison est que la quantité de poudre requise pour construire la pièce finale est minimisée lorsque la masse de la pièce existante est réutilisée au maximum. Tandis que, dans la stratégie conventionnelle, au niveau des valeurs de K élevées ($K > 5$), une quantité significative d'énergie et de fluide de coupe est consommée pour enlever un volume important de copeaux en usinage et pour les recycler. Dans ce cas, $K > 5$, le volume de copeaux enlevés présente une valeur 4 fois plus grande que celui de la pièce finale⁷. Comme la consommation d'énergie et de fluide de coupe sont les deux éléments principaux générant des impacts environnementaux dans la stratégie conventionnelle (Figure 5.7), cette stratégie génère donc beaucoup plus d'impacts environnementaux que la stratégie soutenable.

La Figure 5.9 montre les avantages environnementaux de la stratégie soutenable par rapport à la stratégie conventionnelle dans le cas de $Mc = 0.8$ (kg) et $K = 7$.

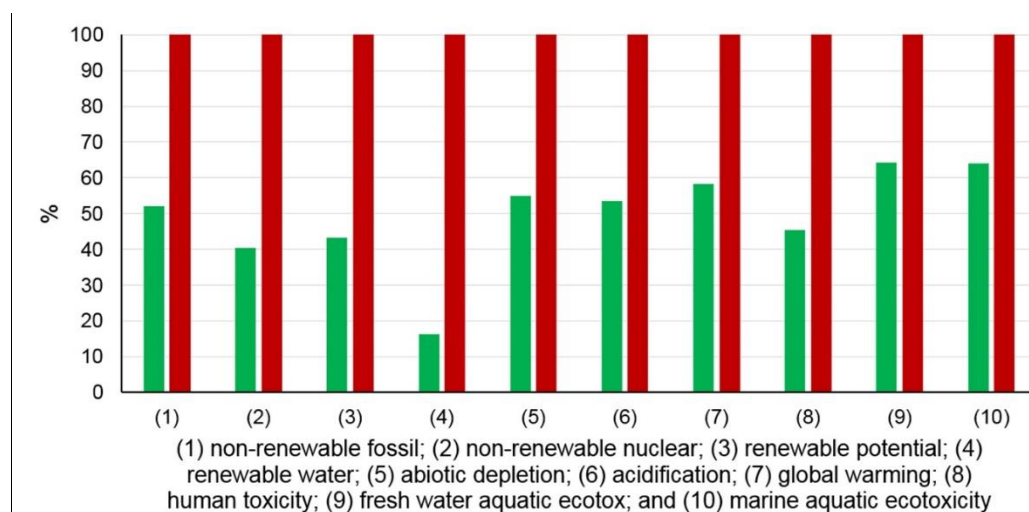


Figure 5.9. Impacts environnementaux de la stratégie soutenable (en verte) et de la stratégie conventionnelle (en rouge) dans le cas $Mc = 0.8$ (kg) et $K = 7$.

En considérant les indicateurs (1) à (4), qui sont issus de la méthode CExD, il est démontré que la stratégie soutenable est beaucoup plus efficace en termes d'énergie et de ressources consommées pour fabriquer les pièces. La stratégie soutenable génère également moins d'impacts environnementaux d'après les indicateurs (5) à (10) issus de la méthode CML 2 Baseline 2000. En regardant l'impact sur le réchauffement climatique, l'indicateur (7), on constate que la fabrication

⁷ Notez que $K = \text{masse de la pièce brute } (Mw) / \text{masse de la pièce finale } (Mf)$, la quantité de copeaux à enlever est donc $M_{\text{copeaux}} = Mw - Mf = (K-1) \cdot Mf$.

des pièces par la stratégie soutenable produit moins de 42% d'équivalent CO₂ par rapport à la stratégie conventionnelle. Il est également intéressant d'observer la toxicité humaine résultant dans ce cas selon l'indicateur (8). La fabrication des pièces par la stratégie soutenable produit moins de 55% d'équivalent 1,4-DB (*dichlorobenzene*). La stratégie soutenable est donc nettement meilleure pour la santé humaine que la stratégie conventionnelle.

La Figure 5.10 présente l'évolution de R selon Hf dans le deuxième scénario. Les résultats montrent que la valeur de R augmente lorsque la hauteur de la pièce finale le long de la direction de construction en EBM augmente. D'après trois indicateurs issus de la méthode CExD, les indicateurs (1), (2) et (3), la stratégie soutenable est beaucoup plus respectueuse de l'environnement que la stratégie conventionnelle lorsque la hauteur de la pièce finale (Hf) est inférieure à 76 ; 78 ; et 82 (mm), respectivement. En particulier, la stratégie soutenable est toujours la meilleure option en se basant sur l'indicateur (4).

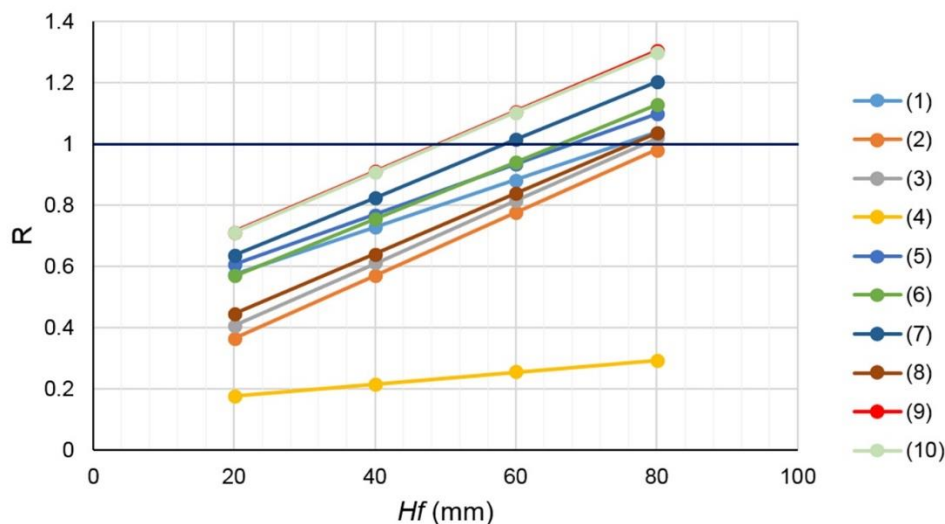


Figure 5.10. Evolution de R en fonction de Hf dans le cas $Mc = 0.8$ (kg) ; $Mf = 1.6$ (kg) ; $K = 7$, d'après dix indicateurs choisis.

En considérant les indicateurs (9-10), (7), (6), (5) et (8), la stratégie soutenable est plus intéressante en termes d'impacts environnementaux lorsque la hauteur de la pièce finale (Hf) est inférieure à 50 ; 58 ; 66 ; et 68 (mm), respectivement. En respectant tous ces indicateurs, la stratégie soutenable est la meilleure option pour $Hf < 50$ (mm). Dans les cas restants, la stratégie conventionnelle est encore intéressante pour fabriquer la pièce finale à partir de la pièce existante ou de la pièce en fin de vie.

Les résultats obtenus dans les deux scénarios ci-dessus suggèrent que la stratégie soutenable est la meilleure option en termes d'impacts environnementaux lorsque la quantité de

matière de la pièce existante réutilisée est supérieure à 60% de la masse de la pièce existante et la quantité de copeaux enlevés dans la stratégie conventionnelle est quatre fois plus grand que celui de la pièce finale (c'est-à-dire $K > 5$). Dans ces cas, les avantages des techniques additives métalliques pour fabriquer des formes complexes sont également démontrés. D'autre part, la stratégie conventionnelle reste une option intéressante quand la pièce finale a un rapport d'enlèvement de matière (K) inférieur à 3, ou la quantité de matière de la pièce existante réutilisée est inférieure à 40% de la masse de la pièce existante. Ces résultats sont conformes à l'observation dans les travaux publiés précédemment (Morrow et al., 2007; Paris et al., 2016; Serres et al., 2011).

De plus, dans le cas où la technique EBM est utilisée pour effectuer les opérations additives dans la stratégie soutenable, cette stratégie est plus respectueuse de l'environnement lorsque la hauteur des pièces le long de la direction de construction est inférieure à 50 (mm), dans le deuxième scénario. Si la hauteur de construction de la pièce finale est supérieure à ce seuil, la stratégie soutenable génère plus d'impacts environnementaux, même si la pièce finale présente une valeur élevée du rapport d'enlèvement de matière ; et la quantité de matière de la pièce existante est réutilisée jusqu'à 80%. La raison est que, avec une hauteur de construction élevée, le procédé EBM consomme une quantité importante d'énergie électrique (voir la partie 5.2.3). Cependant, il est important de noter que, dans le deuxième scénario, la masse de la partie à ajouter sur la pièce commune est fixée à une valeur de 0.8 (kg). Donc, il faut considérer la hauteur et la masse (ou la forme) des pièces simultanément pour sélectionner la stratégie la plus adéquate.

5.4 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons proposé une méthodologie pour évaluer la stratégie soutenable et la comparer avec la stratégie conventionnelle en termes d'impacts environnementaux. Cette méthodologie est développée en s'appuyant sur la méthode ACV.

La consommation de l'énergie et des ressources de chaque processus unitaire dans les deux stratégies ont été calculées. Par la suite, l'inventaire du cycle de vie est complété pour évaluer les impacts environnementaux du processus de fabrication en utilisant un cas d'étude. Dans notre cas d'étude, le procédé EBM est combiné avec l'usinage à commande numérique pour fabriquer la pièce selon la stratégie soutenable. La comparaison environnementale entre la stratégie soutenable et la stratégie conventionnelle est également réalisée en utilisant le ratio d'impact environnemental (R) et le ratio d'enlèvement de matière (K).

Les résultats montrent que la stratégie soutenable est plus respectueuse de l'environnement et devient la meilleure solution lorsque la quantité de la pièce existante est réutilisée à plus de 80%

du volume de la pièce existante, et la pièce finale introduit un rapport d'enlèvement de matière $K > 4.6$ (c'est-à-dire que le volume de copeaux enlevés à partir de la pièce brute par l'usinage présente une valeur de 3.6 fois plus grand que celui de la pièce finale). En revanche, dans le cas de la fabrication des pièces avec des valeurs de K inférieures ($K < 4.6$), ou la quantité de matière de la pièce existante à réutiliser est faible (inférieure à 40% en masse de la pièce existante), la stratégie conventionnelle produit moins d'impacts environnementaux.

La compétition entre les deux stratégies sur l'aspect environnemental est principalement liée à la production de la poudre et au processus EBM dans la stratégie soutenable, et liée aux opérations d'ébauche et à la production des pièces brutes (c'est-à-dire le recyclage de la matière) dans la stratégie conventionnelle. Ces phases consomment une quantité importante d'énergie et de ressources (eau, huile et argon) et génèrent des impacts importants sur l'environnement. De plus, les impacts environnementaux liés au procédé EBM sont principalement dus à l'énergie consommée par ce procédé et à la consommation d'argon pour produire la poudre. En outre, la hauteur de la pièce finale le long de la direction de construction en EBM est également un facteur qui a une influence importante sur la performance environnementale de la nouvelle stratégie.

La méthodologie proposée dans ce chapitre peut être appliquée à d'autres techniques de fabrication additive métallique avec l'usinage. Elle peut aider les concepteurs et les fabricants à sélectionner la stratégie la plus appropriée pour fabriquer la pièce finale à partir de la pièce existante ou en fin de vie. Cependant, dans ce travail, l'hypothèse clé est que la pièce finale fabriquée par les deux stratégies a la même géométrie et la même masse. Alors, la capacité de production des formes libres des techniques additives n'est pas encore prise en compte. La géométrie des parties à ajouter sur la partie commune peut être optimisée. Par conséquent, la masse de poudre requise pour construire la pièce finale peut être réduite. Cela peut avoir un effet sur la comparaison de performance environnementale entre la stratégie soutenable et la stratégie conventionnelle, comme démontré dans les travaux de (Tang et al., 2016). Cet aspect est donc intéressant à prendre en compte dans les travaux futurs et permettrait d'étendre le domaine dans lequel la stratégie soutenable est pertinente du point de vue environnemental.

Chapitre 6 Conclusions et perspectives

Conclusion

Les travaux que nous avons présentés dans ce manuscrit visent à développer une stratégie soutenable en s'appuyant sur les techniques de fabrication additive et soustractive. L'objectif de la stratégie est de réutiliser directement la matière d'une pièce métallique en fin de vie (ou existante) pour fabriquer la pièce visée, sans passer au niveau du recyclage de la matière. La pièce finale est destinée à un autre produit, c'est-à-dire que la pièce en fin de vie ou la pièce existante a une nouvelle vie et de nouveaux usages.

Dans le cadre de la thèse, notre stratégie est développée en regardant les deux aspects technologiques et environnementaux. Nous avons identifié au début de cette étude trois questions de recherche à résoudre (chapitre 1). La première est liée à la faisabilité des techniques de fabrication additive métallique pour ajouter de nouvelles entités sur une pièce existante. Ce principe nous permet d'obtenir une nouvelle pièce à partir de la pièce existante. La deuxième question de recherche porte sur la conception de gammes de fabrication en combinant les techniques de fabrication additive métallique avec l'usinage à commande numérique. Les gammes de fabrication permettent d'obtenir la pièce finale avec la qualité attendue à partir de la pièce existante. Enfin, la troisième question est liée à l'évaluation des performances environnementales.

A partir de l'étude bibliographique (chapitre 2), nous avons noté que :

- Les techniques de fabrication additive métalliques, telles que PBF et DED, nous permettent de concevoir et fabriquer des produits innovants grâce à leurs principes de fabrication couche par couche. Elles ouvrent également de nouvelles pistes pour développer les nouvelles stratégies dans le contexte de fabrication durable. De nombreuses études ont montré que ces techniques permettent l'obtention de pièces métalliques denses avec une bonne métallurgique et des propriétés mécaniques comparables ou supérieures à celles des pièces fabriquées par les procédés conventionnels. Certaines études ont également confirmé la faisabilité de ces techniques, en particulier les techniques DED, pour remanufacturer ou restaurer les composants de hautes valeurs en fin de vie (les aubes de turbines, les matrices et les moules). Cependant, les études menées sur la faisabilité de ces techniques pour ajouter de nouvelles entités sur un substrat existant restent limitées.

- En ce qui concerne la conception de gammes de fabrication, la plupart des études se sont concentrées sur la conception de gammes en usinage ou la planification du processus de fabrication additive. En particulier, la conception de gammes assistée par ordinateur (*CAPP - Computer-Aided Process Planning*) en usinage ont été développés dans les années 1990s. Ces outils logiciels permettent de générer des gammes d'usinage de façon semi-automatique. Les systèmes CAPP sont généralement développés en s'appuyant sur le concept d'entité d'usinage. Cependant, la conception de gammes de fabrication en combinant des procédés additifs et soustractifs est encore peu abordée.

- Plusieurs études ont été réalisées pour évaluer les procédés d'usinage ou de fabrication additive sur l'aspect environnemental. La plupart de ces approches ont été développées en s'appuyant sur la méthode d'Analyse du Cycle de Vie (ACV). Aujourd'hui, l'outil ACV est très connu et appliqué efficacement par les secteurs académiques et industriels.

A partir de ces observations, nos travaux de thèse ont été identifiés et réalisés afin de répondre aux questions de recherche identifiées. Les apports de ces travaux peuvent être résumés de la manière suivante :

- Dans le chapitre 3, nous avons présenté l'étude expérimentale sur la faisabilité de la technique EBM pour ajouter de nouvelles entités sur une pièce existante. D'après ce principe, la nouvelle pièce peut être obtenue à partir de la pièce existante. Les résultats obtenus sur l'observation de la métallurgie et des propriétés mécaniques des éprouvettes permettent de confirmer que la nouvelle pièce obtenue a également des propriétés mécaniques comparables avec celles fabriquées de façon traditionnelle. Elle est donc appropriée pour les applications réelles dans l'industrie. De plus, des résultats présentés dans les travaux existants, qui ont confirmé ce principe de fabrication pour les autres techniques additives (par exemple SLM et DMD), le principe de la stratégie envisagée a été validé.

- Dans le chapitre 4, nous avons ensuite développé la conception de gammes de fabrication en combinant les procédés additifs et soustractifs. Cette gamme permet de transformer directement la pièce en fin de vie (ou la pièce existante) en la nouvelle pièce avec les spécifications technologiques requises, en combinant les opérations additives et soustractives de façon intelligente. L'apport principal de ce travail est de proposer une méthodologie pour développer une telle gamme de fabrication. Elle est élaborée en deux étapes en considérant les connaissances des procédés de fabrication additive et soustractive, les informations disponibles des pièces existante et finale, ainsi que les ressources disponibles. La première étape consiste en identifier et extraire les entités de fabrication additive et les entités

d'usinage. A partir de ces entités et leurs relations, dans la deuxième étape, la séquence des opérations additives et soustractives est élaborée en respectant les règles de fabrication. Ces règles sont définies en s'appuyant sur les contraintes de précedence en fabrication, de qualité, d'accessibilité et de stabilité. Les règles heuristiques utilisées par les gammistes en usinage sont également prises en compte.

- Dans le chapitre 5, la stratégie soutenable a été évaluée sur l'aspect environnemental. Nous avons proposé une méthodologie d'évaluation des impacts environnementaux en se basant sur la méthode ACV. La performance environnementale de la stratégie est également comparée avec celle de la stratégie conventionnelle via un cas d'étude. Pour généraliser les résultats, nous avons également défini le ratio de comparaison (R) pour chaque indicateur d'impact environnemental. Dans le cas d'étude, la stratégie soutenable combine le procédé additif (EBM) avec l'usinage à commande numérique (*CNC machining*) pour fabriquer la pièce finale. Alors que la stratégie conventionnelle consiste à fabriquer la pièce finale de façon traditionnelle. Les résultats obtenus des différents scénarios montrent que la stratégie soutenable est plus respectueuse de l'environnement quand la matière de la pièce existante est réutilisée à plus de 60% en masse. Ces résultats nous permettent de sélectionner la stratégie la plus respectueuse de l'environnement pour fabriquer la pièce finale à partir de la pièce existante ou en fin de vie. La méthodologie proposée dans ce chapitre peut être appliquée pour évaluer la combinaison d'autres procédés additifs métalliques avec l'usinage.

Les contributions de ces travaux dans le cadre de la thèse sont également valorisées dans les revues internationales et dans les conférences internationales et nationales (Annexe A).

Perspectives

Les travaux réalisés dans cette thèse nous permettent d'envisager les développements suivants :

- **Lever les hypothèses** : Dans notre étude, nous avons supposé que les informations de la pièce en fin de vie (ou existante) et de la pièce finale sont disponibles. C'est-à-dire que la pièce en fin de vie est identifiée pour fabriquer la pièce finale. A partir de ces hypothèses, la gamme de fabrication est élaborée. Pour lever cette hypothèse, il est donc nécessaire d'analyser les caractéristiques des différentes pièces potentielles en fin de vie afin de choisir la meilleure pour produire la pièce finale. La typologie des produits en fin de vie qui donnent les composants potentiels pour la stratégie, ainsi que toute la chaîne logistique est aussi un problème intéressant à considérer dans les travaux futurs. De plus, la classification de produits en fin de vie dans un

contexte d'économie circulaire (par exemple, la réutilisation, la réparation, le remanufacturing et le repurposing) est aussi intéressante à étudier.

- **Améliorer la performance environnementale de la stratégie.** En effet, la capacité de production de formes libres des techniques de fabrication additive n'est pas encore prise en compte dans cette étude. La géométrie des parties à ajouter sur la partie commune peut être optimisée. Alors, la masse de poudre requise pour fabriquer la pièce finale peut être réduite. En conséquence, les hot-spots liés à la production de poudre et à la consommation d'énergie dans le procédé additif (EBM) sont également réduits. Cela permet d'améliorer la performance environnementale de la stratégie soutenable. Cet aspect est donc à prendre en compte pour la reconception de la pièce finale. Une fois la partie commune déterminée, la géométrie de parties à ajouter sur la partie commune pourrait être optimisée.

- **Evaluer la stratégie sur l'aspect économique.** En plus des performances technologiques et environnementales que nous avons étudiées, il serait aussi intéressant de considérer l'aspect économique de la stratégie soutenable. Cela permet d'avoir tous les critères pour comparer la stratégie développée avec la stratégie conventionnelle de fabrication.

- **Développer un outil numérique (CAPP) :** La méthodologie pour la conception de gammes de fabrication a été développée. Cependant, elle nécessite encore beaucoup d'intervention humaine. L'étape d'extraction des entités additives et soustractives sont réalisée manuellement en utilisant les fonctions Booléennes des logiciels CAO. Il serait également intéressant de développer un outil numérique (CAPP) pour élaborer la gamme de fabrication de manière semi-automatique.

Bibliographie

- AEA Technology, 1997. Recovery of WEEE: Economic and Environmental Impacts. National Environmental Technology Centre, UK.
- Al-Bermani, S.S., Blackmore, M.L., Zhang, W., Todd, I., 2010. The Origin of Microstructural Diversity, Texture, and Mechanical Properties in Electron Beam Melted Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions A* 41, 3422–3434. doi:10.1007/s11661-010-0397-x
- Amaya Rivas, J.L., 2012. Assessment of the environmental benefits provided by closed-loop strategies for industrial products. Ph.D. thesis, Université Grenoble Alpes, France.
- Antonyamy, A.A., Meyer, J., Prangnell, P.B., 2013. Effect of build geometry on the β -grain structure and texture in additive manufacture of Ti6Al4V by selective electron beam melting. *Materials Characterization* 84, 153–168. doi:10.1016/j.matchar.2013.07.012
- Arce, A.N., 2012. Thermal Modeling and Simulation of Electron Beam Melting for Rapid Prototyping of Ti6Al4V Alloys. Ph.D. thesis, North Carolina State University.
- ASTM, 2010. F2792 - 10e1 Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. doi:10.1520/F2792-10E01
- Bashkite, V., Karaulova, T., Starodubtseva, O., 2014. Framework for innovation-oriented product end-of-life strategies development. *Procedia Engineering* 69, 526–535. doi:10.1016/j.proeng.2014.03.022
- Baumers, M., 2012. Economic aspects of additive manufacturing: benefits, costs and energy consumption. Loughborough University.
- Baumers, M., Tuck, C., Wildman, R., Ashcroft, I., Hague, R., 2016. Shape Complexity and Process Energy Consumption in Electron Beam Melting: A Case of Something for Nothing in Additive Manufacturing? *Journal of Industrial Ecology* 0, 1–11. doi:10.1111/jiec.12397
- Bösch, M.E., Hellweg, S., Huijbregts, M.A.J., Frischknecht, R., 2007. Applying cumulative exergy demand (CExD) indicators to the ecoinvent database. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 12, 181–190. doi:10.1065/lca2006.11.282
- Bourhis, F. Le, 2014. Modélisation de la performance environnementale des procédés de fabrication par ajout de matière Application à la projection de poudres métalliques. PhD thesis, Ecole Centrale Nantes, France.
- Bourhis, F. Le, Kerbrat, O., Hascoet, J.-Y., Mognol, P., 2013. Sustainable manufacturing: evaluation and modeling of environmental impacts in additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 69, 1927–1939. doi:10.1007/s00170-013-5151-2
- Brice, C., Shenoy, R., Kral, M., Buchannan, K., 2015. Precipitation behavior of aluminum alloy 2139 fabricated using additive manufacturing. *Materials Science and Engineering: A* 648, 9–14. doi:10.1016/j.msea.2015.08.088
- Callister, W.D., Rethwisch, D.G., 2007. *Materials science and engineering: an introduction*.

- Wiley New York.
- Campbell, F.C., 2011. Manufacturing technology for aerospace structural materials. Elsevier.
- Carvalho, A., Mimoso, A.F., Mendes, A.N., Matos, H.A., 2014. From a literature review to a framework for environmental process impact assessment index. *Journal of Cleaner Production* 64, 36–62. doi:10.1016/j.jclepro.2013.08.010
- Casalino, G., Campanelli, S.L., Contuzzi, N., Ludovico, a. D., 2015. Experimental investigation and statistical optimisation of the selective laser melting process of a maraging steel. *Optics & Laser Technology* 65, 151–158. doi:10.1016/j.optlastec.2014.07.021
- Chen, C., Wang, Y., Ou, H., He, Y., Tang, X., 2014. A review on remanufacture of dies and moulds. *Journal of Cleaner Production* 64, 13–23. doi:10.1016/j.jclepro.2013.09.014
- Chen, D., Heyer, S., Ibbotson, S., Salonitis, K., Steingrímsson, J.G., Thiede, S., 2015. Direct digital manufacturing: definition, evolution, and sustainability implications. *Journal of Cleaner Production* 107, 615–625. doi:10.1016/j.jclepro.2015.05.009
- Chlebus, E., Kuźnicka, B., Kurzynowski, T., Dybała, B., 2011. Microstructure and mechanical behaviour of Ti—6Al—7Nb alloy produced by selective laser melting. *Materials Characterization* 62, 488–495. doi:10.1016/j.matchar.2011.03.006
- Cottam, R., Brandt, M., 2011. Laser Cladding of Ti-6Al-4V Powder on Ti-6Al-4V Substrate: Effect of Laser Cladding Parameters on Microstructure. *Physics Procedia* 12, 323–329. doi:10.1016/j.phpro.2011.03.041
- de Lima, M.S.F., Sankaré, S., 2014. Microstructure and mechanical behavior of laser additive manufactured AISI 316 stainless steel stringers. *Materials & Design* 55, 526–532. doi:10.1016/j.matdes.2013.10.016
- Derigent, W., 2005. Méthodologie de passage d'un modèle CAO vers un modèle FAO pour des pièces aéronautiques : Prototype logiciel dans le cadre du projet USIQUICK. PhD thesis Université Henri Poincaré - Nancy I, France.
- Despeisse, M., Baumers, M., Brown, P., Charnley, F., Ford, S.J., Garmulewicz, A., Knowles, S., Minshall, T.H.W., Mortara, L., Reed-Tsochas, F.P., Rowley, J., 2016. Unlocking value for a circular economy through 3D printing: A research agenda. *Technological Forecasting and Social Change*. doi:10.1016/j.techfore.2016.09.021
- Diaz, N., Redelsheimer, E., Dornfeld, D., 2011. Energy Consumption Characterization and Reduction Strategies for Milling Machine Tool Use, in: Hesselbach, J., Herrmann, C. (Eds.), *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 263–267. doi:10.1007/978-3-642-19692-8_46
- Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., 2015. A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 34, 8–19. doi:10.1016/j.rcim.2015.01.003
- Directive, E.U., 2000. Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council on End-of Life Vehicles. *Official Journal of the European Communities*, Article, 7.
- Donachie, M.J., 2000. Titanium: a technical guide. ASM international.
- Duflou, J.R., Kellens, K., Dewulf, W., 2011. Unit process impact assessment for discrete part manufacturing: A state of the art. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 4, 129–135. doi:10.1016/j.cirpj.2011.01.008

- Durand, F., 2005. The electromagnetic cold crucible as a tool for melt preparation and continuous casting. *International Journal of Cast Metals Research* 18, 93–107. doi:10.1179/136404605225022883
- Dutta, B., Froes, F.H., 2015. The additive manufacturing (AM) of titanium alloys, *Titanium Powder Metallurgy*. Elsevier Inc. doi:http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-800054-0.00024-1
- Dutta, B., Froes, F.H., 2014. Additive manufacturing of titanium alloys. *Advanced Materials & Processes* 172, 18–23.
- Dutta, B., Palaniswamy, S., Choi, J., Song, L.J., Mazumder, J., 2011. Additive Manufacturing by Direct Metal Deposition. *Advanced Materials & Processes* 33–36.
- Esmailian, B., Behdad, S., Wang, B., 2016. The evolution and future of manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Systems* 39, 79–100. doi:10.1016/j.jmsy.2016.03.001
- España, F.A., Balla, V.K., Bose, S., Bandyopadhyay, A., 2010. Design and fabrication of CoCrMo alloy based novel structures for load bearing implants using laser engineered net shaping. *Materials Science and Engineering: C* 30, 50–57. doi:10.1016/j.msec.2009.08.006
- Flynn, J.M., Shokrani, A., Newman, S.T., Dhokia, V., 2016. Hybrid additive and subtractive machine tools - Research and industrial developments. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 101, 79–101. doi:10.1016/j.ijmachtools.2015.11.007
- Ford, S., Despeisse, M., 2016. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production* 137, 1573–1587. doi:10.1016/j.jclepro.2016.04.150
- Ford, S., Despeisse, M., Viljakainen, A., 2015. Extending product life through additive manufacturing: The sustainability implications. *Global Cleaner Production and Consumption Conference*.
- Frazier, W.E., 2014. Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance* 23, 1917–1928. doi:10.1007/s11665-014-0958-z
- Friends of the Earth Europe, 2009. Gone to waste: The valuable resources that european countries bury and burn.
- GAMA, G., 1990. *La gamme automatique en usinage*. Hermes.
- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C.B., Wang, C.C.L., Shin, Y.C., Zhang, S., Zavattieri, P.D., 2015. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design* 69, 65–89. doi:10.1016/j.cad.2015.04.001
- Gebler, M., Schoot Uiterkamp, A.J.M., Visser, C., 2014. A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy Policy* 74, 158–167. doi:10.1016/j.enpol.2014.08.033
- Gehin, A., Zwolinski, P., Brissaud, D., 2009. Integrated design of product lifecycles-The fridge case study. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 1, 214–220. doi:10.1016/j.cirpj.2009.05.002
- Gehin, A., Zwolinski, P., Brissaud, D., 2008. A tool to implement sustainable end-of-life strategies in the product development phase. *Journal of Cleaner Production* 16, 566–576. doi:10.1016/j.jclepro.2007.02.012

- Gerrard, J., Kandlikar, M., 2007. Is European end-of-life vehicle legislation living up to expectations? Assessing the impact of the ELV Directive on “green” innovation and vehicle recovery. *Journal of Cleaner Production* 15, 17–27. doi:10.1016/j.jclepro.2005.06.004
- Gharbi, M., Peyre, P., Gorny, C., Carin, M., Morville, S., Le Masson, P., Carron, D., Fabbro, R., 2013. Influence of various process conditions on surface finishes induced by the direct metal deposition laser technique on a Ti–6Al–4V alloy. *Journal of Materials Processing Technology* 213, 791–800. doi:10.1016/j.jmatprotec.2012.11.015
- Gibson, I., Rosen, D.W., Stucker, B., 2010. *Additive Manufacturing Technologies*. Springer US, Boston, MA. doi:10.1007/978-1-4419-1120-9
- Givehchi, M., Haghighi, A., Wang, L., 2015. Generic machining process sequencing through a revised enriched machining feature concept. *Journal of Manufacturing Systems* 37, 564–575. doi:10.1016/j.jmsy.2015.04.004
- Goepp, V., Zwolinski, P., Caillaud, E., 2014. Design process and data models to support the design of sustainable remanufactured products. *Computers in Industry* 65, 480–490. doi:10.1016/j.compind.2014.02.002
- Gong, H., Rafi, K., Gu, H., Starr, T., Stucker, B., 2014. Analysis of defect generation in Ti–6Al–4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes. *Additive Manufacturing* 1–4, 87–98. doi:10.1016/j.addma.2014.08.002
- Gong, X., Anderson, T., Chou, K., 2014. Review on powder-based electron beam additive manufacturing technology. *Manufacturing Review* 1, 2. doi:10.1051/mfreview/2014001
- Guan, K., Wang, Z., Gao, M., Li, X., Zeng, X., 2013. Effects of processing parameters on tensile properties of selective laser melted 304 stainless steel. *Materials & Design* 50, 581–586. doi:10.1016/j.matdes.2013.03.056
- Guo, N., Leu, M., 2013. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering* 8, 215–243. doi:10.1007/s11465-013-0248-8
- Gutowski, T., Dahmus, J., Thiriez, A., 2006. Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes. 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering (LCE), Leuven.
- Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., Emmelmann, C., 2016. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia* 117, 371–392. doi:10.1016/j.actamat.2016.07.019
- Hopkinson, N., 2006. Production Economics of Rapid Manufacture, *Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age*. doi:10.1002/0470033991.ch9
- Hopkinson, N., Gao, Y., McAfee, D.J., 2006. Design for environment analyses applied to rapid manufacturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 220, 1363–1372. doi:10.1243/09544070JAUTO309
- Hu, S.J., Ko, J., Weyand, L., Elmaraghy, H.A., Lien, T.K., Koren, Y., Bley, H., Chryssolouris, G., Nasr, N., Shpitalni, M., 2011. Assembly system design and operations for product variety. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60, 715–733. doi:10.1016/j.cirp.2011.05.004
- Huang, R., Riddle, M., Graziano, D., Warren, J., Das, S., Nimbalkar, S., Cresko, J., Masanet, E., 2016. Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components. *Journal of Cleaner Production* 135, 1559–1570. doi:10.1016/j.jclepro.2015.04.109

- Huang, S., Liu, P., Mokasdar, A., Hou, L., 2013. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 67, 1191–1203. doi:10.1007/s00170-012-4558-5
- ISO, 2006. ISO 14044 : Gestion environnementale - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices.
- Jancovici, J.-M., 2009. ADEME. Bilan Carbone : Un outil devenu indispensable.
- Jhavar, S., Paul, C.P., Jain, N.K., 2013. Causes of failure and repairing options for dies and molds: A review. *Engineering Failure Analysis* 34, 519–535. doi:10.1016/j.engfailanal.2013.09.006
- Ji, W., Wang, L., Haghighi, A., Givehchi, M., Liu, X., 2016. A reachability based approach for machining feature sequencing. *Journal of Manufacturing Systems* 40, 96–104. doi:10.1016/j.jmsy.2016.06.006
- Jimenez, F., Pompidou, S., Perry, N., 2016. Environmental-energy analysis and the importance of design and remanufacturing recycled materials. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing* 10, 241–249. doi:10.1007/s12008-016-0321-8
- Jones, J., McNutt, P., Tosi, R., Perry, C., Wimpenny, D., 2012. Remanufacture of turbine blades by laser cladding, machining and in-process scanning in a single machine. 23rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, 2012 Austin, TX, USA.: University of Texas 821–827.
- Joseph, R.D. (Ed.), 2000. *ASM Specialty Handbook: Nickel, Cobalt, and Their Alloys*. ASM International.
- Kakinuma, Y., Mori, M., Oda, Y., Mori, T., Kashihara, M., Hansel, A., Fujishima, M., 2016. Influence of metal powder characteristics on product quality with directed energy deposition of Inconel 625. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 65, 209–212. doi:10.1016/j.cirp.2016.04.058
- Kara, S., Li, W., 2011. Unit process energy consumption models for material removal processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60, 37–40. doi:10.1016/j.cirp.2011.03.018
- Karlsson, J., Snis, A., Engqvist, H., Lausmaa, J., 2013. Characterization and comparison of materials produced by Electron Beam Melting (EBM) of two different Ti–6Al–4V powder fractions. *Journal of Materials Processing Technology* 213, 2109–2118. doi:10.1016/j.jmatprotec.2013.06.010
- Karunakaran, K.P., Suryakumar, S., Pushpa, V., Akula, S., 2010. Low cost integration of additive and subtractive processes for hybrid layered manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 26, 490–499. doi:10.1016/j.rcim.2010.03.008
- Kellens, K., Dewulf, W., Overcash, M., Hauschild, M.Z., Duflou, J.R., 2012a. Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life cycle inventory (UPLCI) CO2PE! initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 2: Case studies. *International Journal of Life Cycle Assessment* 17, 242–251. doi:10.1007/s11367-011-0352-0
- Kellens, K., Dewulf, W., Overcash, M., Hauschild, M.Z., Duflou, J.R., 2012b. Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life cycle inventory (UPLCI) CO2PE! initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 1: Case studies. *International Journal of Life Cycle Assessment* 17,

- 242–251. doi:10.1007/s11367-011-0352-0
- Kelly, S., Kampe, S., 2004. Microstructural evolution in laser-deposited multilayer Ti-6Al-4V builds: Part I. Microstructural characterization. *Metallurgical and Materials Transactions A* 35, 1861–1867.
- Kerbrat, O., Mognol, P., Hascoet, J.-Y., 2010. Manufacturability analysis to combine additive and subtractive processes. *Rapid Prototyping Journal* 16, 63–72. doi:10.1108/13552541011011721
- Kerbrat, O., Mognol, P., Hascoët, J.Y., 2011. A new DFM approach to combine machining and additive manufacturing. *Computers in Industry* 62, 684–692. doi:10.1016/j.compind.2011.04.003
- Khatim, O., 2011. Contribution to the understanding and control of the process of liquid metal atomization jets (in French). Ph.D. thesis, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, France.
- Kim, J., Dornfeld, D. a., 2001. Cost estimation of drilling operations by a Drilling Burr Control Chart and Bayesian statistics. *Journal of Manufacturing Systems* 20, 89–97. doi:10.1016/S0278-6125(01)80032-7
- Kim, Y.S., Wang, E., Rho, H.M., 2001. Geometry-based machining precedence reasoning for feature-based process planning. *International Journal of Production Research* 39, 2077–2103. doi:10.1080/00207540110038513
- King, A.M., Burgess, S.C., Ijomah, W., McMahon, C.A., 2006. Reducing waste: repair, recondition, remanufacture or recycle? *Sustainable Development* 14, 257–267. doi:10.1002/sd.271
- Kiritsis, D., Bufardi, A., Xirouchakis, P., 2003. Multi-criteria decision aid for product end of life options selection. *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment* 48–53. doi:10.1109/ISEE.2003.1208046
- Koren, Y., 2010. *The Global Manufacturing Revolution*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. doi:10.1002/9780470618813
- Körner, C., 2016. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting - a review. *International Materials Reviews* 6608, 1–17. doi:10.1080/09506608.2016.1176289
- Krakhmalev, P., Yadroitsava, I., Fredriksson, G., Yadroitsev, I., 2015. In situ heat treatment in selective laser melted martensitic AISI 420 stainless steels. *Materials and Design* 87, 380–385. doi:10.1016/j.matdes.2015.08.045
- Kruth, J.-P., Dadbakhsh, S., Vrancken, B., Kempen, K., Vleugels, J., Van Humbeeck, J., 2015. Additive Manufacturing of Metals via Selective Laser Melting: Process Aspects and Material Developments, in: *Additive Manufacturing*. CRC Press, pp. 69–99. doi:10.1201/b19360-4
- Kruth, J.-P., Leu, M.C., Nakagawa, T., 1998. Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 47, 525–540. doi:10.1016/S0007-8506(07)63240-5
- Kruth, J.P., Froyen, L., Rombouts, M., Van Vaerenbergh, J., Mercells, P., 2003. New Ferro Powder for Selective Laser Sintering of Dense Parts. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 52, 139–142. doi:10.1016/S0007-8506(07)60550-2

- Kunze, K., Etter, T., Grässlin, J., Shklover, V., 2014. Texture, anisotropy in microstructure and mechanical properties of IN738LC alloy processed by selective laser melting (SLM). *Materials Science and Engineering: A* 620, 213–222. doi:10.1016/j.msea.2014.10.003
- Le, V.T., Paris, H., Mandil, G., 2017a. Extracting features for manufacture of parts from existing components based on combining additive and subtractive technologies. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. doi:10.1007/s12008-017-0395-y
- Le, V.T., Paris, H., Mandil, G., 2017b. Extraction of features for combined additive manufacturing and machining processes in a remanufacturing context, in: *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing*. Springer International Publishing, pp. 179–189. doi:10.1007/978-3-319-45781-9_19
- Le, V.T., Paris, H., Mandil, G., 2017c. Process planning for combined additive and subtractive manufacturing technologies in a remanufacturing context. *Journal of Manufacturing Systems* 44, 243–254. doi:10.1016/j.jmsy.2017.06.003
- Le, V.T., Paris, H., Mandil, G., 2017d. Environmental impact assessment of an innovative strategy based on an additive and subtractive manufacturing combination. *Journal of Cleaner Production* 164, 508–523. doi:10.1016/j.jclepro.2017.06.204
- Le, V.T., Paris, H., Mandil, G., 2015. Using additive and subtractive manufacturing technologies in a new remanufacturing strategy to produce new parts from End-of-Life parts. 22nd Conference of French Mechanics (CFM2015), 24th - 28th August, Lyon, France.
- Le, V.T., Paris, H., Mandil, G., Brissaud, D., 2017e. A Direct Material Reuse Approach Based on Additive and Subtractive Manufacturing Technologies for Manufacture of Parts from Existing Components. *Procedia CIRP* 61, 229–234. doi:10.1016/j.procir.2016.11.190
- Le Duigou, J., Gulbrandsen-Dahl, S., Vallet, F., Söderberg, R., Eynard, B., Perry, N., 2016. Optimization and lifecycle engineering for design and manufacture of recycled aluminium parts. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 65, 149–152. doi:10.1016/j.cirp.2016.04.111
- Lee, C.-S., Lee, J.-H., Kim, D.-S., Heo, E.-Y., Kim, D.-W., 2013. A hole-machining process planning system for marine engines. *Journal of Manufacturing Systems* 32, 114–123. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2012.10.005
- Li, S.J., Xu, Q.S., Wang, Z., Hou, W.T., Hao, Y.L., Yang, R., Murr, L.E., 2014. Influence of cell shape on mechanical properties of Ti-6Al-4V meshes fabricated by electron beam melting method. *Acta biomaterialia* 10, 4537–47. doi:10.1016/j.actbio.2014.06.010
- Lindahl, M., Sundin, E., Östlin, J., Björkman, M., 2006. Concepts and definitions for product recovery Analysis and clarification of the terminology used in academia and industry, in: *Innovation in Life Cycle Engineering and Sustainable Development*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 123–138. doi:10.1007/1-4020-4617-0_8
- Liu, Z., Qin, Z.-X., Liu, F., Lu, X., Wang, H.-M., 2014. The microstructure and mechanical behaviors of the Ti–6.5Al–3.5Mo–1.5Zr–0.3Si alloy produced by laser melting deposition. *Materials Characterization* 97, 132–139. doi:10.1016/j.matchar.2014.09.002
- Liu, Z., Wang, L., 2007. Sequencing of interacting prismatic machining features for process planning. *Computers in Industry* 58, 295–303. doi:10.1016/j.compind.2006.07.003
- Liu, Z.H., Zhang, D.Q., Sing, S.L., Chua, C.K., Loh, L.E., 2014a. Interfacial characterization

- of SLM parts in multi-material processing: Metallurgical diffusion between 316L stainless steel and C18400 copper alloy. *Materials Characterization* 94, 116–125. doi:10.1016/j.matchar.2014.05.001
- Liu, Z.H., Zhang, D.Q., Sing, S.L., Chua, C.K., Loh, L.E., 2014b. Interfacial characterization of SLM parts in multi-material processing: Metallurgical diffusion between 316L stainless steel and C18400 copper alloy. *Materials Characterization* 94, 116–125. doi:10.1016/j.matchar.2014.05.001
- Lopez Ontiveros, M.A., 2004. Intégration des contraintes de remanufacturabilité en conception de produits. Ph.D. thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, France.
- Mandil, G., Le, V.T., Paris, H., Suard, M., 2016. Building new entities from existing titanium part by electron beam melting: microstructures and mechanical properties. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 85, 1835–1846. doi:10.1007/s00170-015-8049-3
- Manogharan, G., Wysk, R.A., Harrysson, O.L.A., 2016. Additive manufacturing–integrated hybrid manufacturing and subtractive processes: economic model and analysis. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 29, 473–488. doi:10.1080/0951192X.2015.1067920
- Manogharan, G., Wysk, R., Harrysson, O., Aman, R., 2015. AIMS – A Metal Additive-hybrid Manufacturing System: System Architecture and Attributes. *Procedia Manufacturing* 1, 273–286. doi:10.1016/j.promfg.2015.09.021
- Mognol, P., Lepicart, D., Perry, N., 2006. Rapid prototyping: energy and environment in the spotlight. *Rapid Prototyping Journal* 12, 26–34. doi:10.1108/13552540610637246
- Morrow, W.R., Qi, H., Kim, I., Mazumder, J., Skerlos, S.J., 2007. Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing. *Journal of Cleaner Production* 15, 932–943. doi:10.1016/j.jclepro.2005.11.030
- Murr, L.E., 2015. Metallurgy of additive manufacturing: Examples from electron beam melting. *Additive Manufacturing* 5, 40–53. doi:10.1016/j.addma.2014.12.002
- Murr, L.E., Gaytan, S.M., Medina, F., Martinez, E., Martinez, J.L., Hernandez, D.H., Machado, B.I., Ramirez, D.A., Wicker, R.B., 2010. Characterization of Ti–6Al–4V open cellular foams fabricated by additive manufacturing using electron beam melting. *Materials Science and Engineering: A* 527, 1861–1868. doi:10.1016/j.msea.2009.11.015
- Murr, L.E., Gaytan, S.M., Ramirez, D.A., Martinez, E., Hernandez, J., Amato, K.N., Shindo, P.W., Medina, F.R., Wicker, R.B., 2012. Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies. *Journal of Materials Science & Technology* 28, 1–14. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S1005-0302(12)60016-4
- Murr, L.E., Martinez, E., Gaytan, S.M., Ramirez, D.A., Machado, B.I., Shindo, P.W., Martinez, J.L., Medina, F., Wooten, J., Ciscel, D., Ackelid, U., Wicker, R.B., 2011. Microstructural Architecture, Microstructures, and Mechanical Properties for a Nickel-Base Superalloy Fabricated by Electron Beam Melting. *Metallurgical and Materials Transactions A* 42, 3491–3508. doi:10.1007/s11661-011-0748-2
- Murr, L.E., Martinez, E., Pan, X.M., Gaytan, S.M., Castro, J.A., Terrazas, C.A., Medina, F., Wicker, R.B., Abbott, D.H., 2013. Microstructures of Rene 142 nickel-based superalloy fabricated by electron beam melting. *Acta Materialia* 61, 4289–4296. doi:10.1016/j.actamat.2013.04.002

- Murr, L.E., Quinones, S.A., Gaytan, S.M., Lopez, M.I., Rodela, A., Martinez, E.Y., Hernandez, D.H., Martinez, E., Medina, F., Wicker, R.B., 2009a. Microstructure and mechanical behavior of Ti-6Al-4V produced by rapid-layer manufacturing, for biomedical applications. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials* 2, 20–32. doi:10.1016/j.jmbbm.2008.05.004
- Murr, L.E., Quinones, S. a, Gaytan, S.M., Lopez, M.I., Rodela, a, Martinez, E.Y., Hernandez, D.H., Martinez, E., Medina, F., Wicker, R.B., 2009b. Microstructure and mechanical behavior of Ti-6Al-4V produced by rapid-layer manufacturing, for biomedical applications. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials* 2, 20–32. doi:10.1016/j.jmbbm.2008.05.004
- Nan, L., Liu, W., Zhang, K., 2010. Laser remanufacturing based on the integration of reverse engineering and laser cladding. *International Journal of Computer Applications in Technology* 40, 254–262. doi:10.1504/IJCAT.2010.032200
- Navrotsky, V., Graichen, A., Brodin, H., 2015. Industrialisation of 3D printing (additive manufacturing) for gas turbine components repair and manufacturing. *VGB PowerTech* 12 48–52.
- Newman, S.T., Zhu, Z., Dhokia, V., Shokrani, A., 2015. Process planning for additive and subtractive manufacturing technologies. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 64, 467–470. doi:10.1016/j.cirp.2015.04.109
- Nie, P., Ojo, O.A., Li, Z., 2014. Numerical modeling of microstructure evolution during laser additive manufacturing of a nickel-based superalloy. *Acta Materialia* 77, 85–95. doi:10.1016/j.actamat.2014.05.039
- Östlin, J., Sundin, E., Björkman, M., 2009. Product life-cycle implications for remanufacturing strategies. *Journal of Cleaner Production* 17, 999–1009. doi:10.1016/j.jclepro.2009.02.021
- Paris, H., Brissaud, D., 2004. Process planning strategy based on fixturing indicator evaluation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 25, 913–922. doi:10.1007/s00170-003-1928-z
- Paris, H., Brissaud, D., 2000. Modelling for process planning: The links between process planning entities. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 16, 259–266. doi:10.1016/S0736-5845(99)00056-3
- Paris, H., Mokhtarian, H., Coatanéa, E., Museau, M., Ituarte, I.F., 2016. Comparative environmental impacts of additive and subtractive manufacturing technologies. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 65, 29–32. doi:10.1016/j.cirp.2016.04.036
- Parthasarathy, J., Starly, B., Raman, S., Christensen, A., 2010. Mechanical evaluation of porous titanium (Ti6Al4V) structures with electron beam melting (EBM). *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials* 3, 249–59. doi:10.1016/j.jmbbm.2009.10.006
- Paterson, D.A.P., Ijomah, W.L., Windmill, J.F.C., 2017. End-of-Life decision tool with emphasis on Remanufacturing. *Journal of Cleaner Production*. doi:10.1016/j.jclepro.2017.02.011
- Peng, S., Li, T., Wang, X., Dong, M., Liu, Z., Shi, J., Zhang, H., 2017. Toward a Sustainable Impeller Production: Environmental Impact Comparison of Different Impeller Manufacturing Methods. *Journal of Industrial Ecology*. doi:10.1111/jiec.12628
- Petrovic, V., Vicente Haro Gonzalez, J., Jordá Ferrando, O., Delgado Gordillo, J., Ramón

- Blasco Puchades, J., Portolés Griñan, L., 2011. Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies. *International Journal of Production Research* 49, 1061–1079. doi:10.1080/00207540903479786
- Pinkerton, A.J., Li, L., 2005. Direct additive laser manufacturing using gas- and water-atomised H13 tool steel powders. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 25, 471–479. doi:10.1007/s00170-003-1844-2
- Ponche, R., 2013. Méthodologie de conception pour la fabrication additive, application à la projection de poudres. Thesis, Ecole Centrale de Nantes.
- Priarone, P.C., Ingarao, G., 2017. Towards criteria for sustainable process selection: On the modelling of pure subtractive versus additive/subtractive integrated manufacturing approaches. *Journal of Cleaner Production* 144, 57–68. doi:10.1016/j.jclepro.2016.12.165
- Rafi, H.K., Karthik, N. V., Gong, H., Starr, T.L., Stucker, B.E., 2013. Microstructures and Mechanical Properties of Ti6Al4V Parts Fabricated by Selective Laser Melting and Electron Beam Melting. *Journal of Materials Engineering and Performance* 22, 3872–3883. doi:10.1007/s11665-013-0658-0
- Ren, H., Tian, X., Liu, D., Liu, J., Wang, H., 2015. Microstructural evolution and mechanical properties of laser melting deposited Ti–6.5Al–3.5Mo–1.5Zr–0.3Si titanium alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 25, 1856–1864. doi:10.1016/S1003-6326(15)63792-X
- Ren, L., Padathu, A.P., Ruan, J., Sparks, T., Liou, F.W., 2006. Three dimensional die repair using a hybrid manufacturing system. 17th Solid Freeform Fabrication Symposium, SFF 2006 51–59.
- Ren, L., Sparks, T., Ruan, J., Liou, F., 2008. Process planning strategies for solid freeform fabrication of metal parts. *Journal of Manufacturing Systems* 27, 158–165. doi:10.1016/j.jmsy.2009.02.002
- Rias, P.A., Segonds, F., Bouchard, C., 2014. Focus sur la fusion de poudre métallique par laser et ses applications. *Traitements & Matériaux* 431, 29–34.
- Rickli, J.L., Dasgupta, A.K., Dinda, G.P., 2014. A descriptive framework for additive remanufacturing systems. *International Journal of Rapid Manufacturing* 4, 199–218. doi:http://dx.doi.org/10.1504/IJRAPIDM.2014.066043
- Rose, C.M., Ishii, K., Stevels, A., 2002. Influencing Design to Improve Product End-of-Life Stage. *Research in Engineering Design* 13, 83–93. doi:10.1007/s001630100006
- Serres, N., Tidu, D., Sankare, S., Hlawka, F., 2011. Environmental comparison of MESO-CLAD process and conventional machining implementing life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production* 19, 1117–1124. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.12.010
- Shamsaei, N., Yadollahi, A., Bian, L., Thompson, S.M., 2015. An Overview of Direct Laser Deposition for Additive Manufacturing; Part II: Mechanical Behavior, Process Parameter Optimization and Control. *Additive Manufacturing* 8, 12–35. doi:10.1016/j.addma.2015.07.002
- Sing, S.L., An, J., Yeong, W.Y., Wiria, F.E., 2016. Laser and electron-beam powder-bed additive manufacturing of metallic implants: A review on processes, materials and designs. *Journal of Orthopaedic Research* 34, 369–385. doi:10.1002/jor.23075
- Sing, S.L., Lam, L.P., Zhang, D.Q., Liu, Z.H., Chua, C.K., 2015. Interfacial characterization of

- SLM parts in multi-material processing: Intermetallic phase formation between AlSi10Mg and C18400 copper alloy. *Materials Characterization* 107, 220–227. doi:10.1016/j.matchar.2015.07.007
- Smith, J., Xiong, W., Yan, W., Lin, S., Cheng, P., Kafka, O.L., Wagner, G.J., Cao, J., Liu, W.K., 2016. Linking process, structure, property, and performance for metal-based additive manufacturing: computational approaches with experimental support. *Computational Mechanics* 1–28. doi:10.1007/s00466-015-1240-4
- Smith, V.M., Keoleian, G.A., 2004. The value of remanufactured engines: Life-cycle environmental and economic perspectives. *Journal of Industrial Ecology* 8, 193–221. doi:10.1162/1088198041269463
- Sochalski-Kolbus, L.M., Payzant, E.A., Cornwell, P.A., Watkins, T.R., Babu, S.S., Dehoff, R.R., Lorenz, M., Ovchinnikova, O., Duty, C., 2015. Comparison of Residual Stresses in Inconel 718 Simple Parts Made by Electron Beam Melting and Direct Laser Metal Sintering. *Metallurgical and Materials Transactions A* 46, 1419–1432. doi:10.1007/s11661-014-2722-2
- Sormaz, D.N., Khoshnevis, B., 2000. Modeling of manufacturing feature interactions for automated process planning. *Journal of Manufacturing Systems* 19, 28–45. doi:10.1016/S0278-6125(00)88888-3
- Suard, M., 2015. Caractérisation et optimisation de structures treillis fabriquées par EBM. PhD thesis, Université Grenoble-Alpes.
- Suard, M., Lhuissier, P., Dendievel, R., Blandin, J.-J., Vignat, F., Villeneuve, F., 2014. Towards stiffness prediction of cellular structures made by electron beam melting (EBM). *Powder Metallurgy* 57, 190–195. doi:10.1179/1743290114Y.0000000093
- Suard, M., Martin, G., Lhuissier, P., Dendievel, R., Vignat, F., Blandin, J.-J., Villeneuve, F., 2015. Mechanical equivalent diameter of single struts for the stiffness prediction of lattice structures produced by Electron Beam Melting. *Additive Manufacturing* 8, 124–131. doi:10.1016/j.addma.2015.10.002
- Sunil, V.B., Agarwal, R., Pande, S.S., 2010. An approach to recognize interacting features from B-Rep CAD models of prismatic machined parts using a hybrid (graph and rule based) technique. *Computers in Industry* 61, 686–701. doi:10.1016/j.compind.2010.03.011
- Tan, X., Kok, Y., Tan, Y.J., Descoins, M., Mangelinck, D., Tor, S.B., Leong, K.F., Chua, C.K., 2015. Graded microstructure and mechanical properties of additive manufactured Ti–6Al–4V via electron beam melting. *Acta Materialia* 97, 1–16. doi:10.1016/j.actamat.2015.06.036
- Tang, Y., Mak, K., Zhao, Y.F., 2016. A framework to reduce product environmental impact through design optimization for additive manufacturing. *Journal of Cleaner Production* 137, 1560–1572. doi:10.1016/j.jclepro.2016.06.037
- Terrazas, C.A., Gaytan, S.M., Rodriguez, E., Espalin, D., Murr, L.E., Medina, F., Wicker, R.B., 2014. Multi-material metallic structure fabrication using electron beam melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 71, 33–45. doi:10.1007/s00170-013-5449-0
- Thijs, L., Verhaeghe, F., Craeghs, T., Humbeeck, J. Van, Kruth, J.-P., 2010. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti–6Al–4V. *Acta Materialia* 58, 3303–3312. doi:10.1016/j.actamat.2010.02.004

- Thompson, M.K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R.I., Gibson, I., Bernard, A., Schulz, J., Graf, P., Ahuja, B., Martina, F., 2016. Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 65, 737–760. doi:10.1016/j.cirp.2016.05.004
- Thompson, S.M., Bian, L., Shamsaei, N., Yadollahi, A., 2015. An Overview of Direct Laser Deposition for Additive Manufacturing Part I: Transport Phenomena, Modeling and Diagnostics. *Additive Manufacturing* 8, 36–62. doi:10.1016/j.addma.2015.07.001
- Tomlin, M., Meyer, J., 2011. Topology Optimization of an Additive Layer Manufactured (ALM) Aerospace Part. The 7th Altair CAE Technology Conference 2011 1–9.
- Tong, J., Bowen, C.R., Persson, J., Plummer, A., 2016. Mechanical properties of titanium-based Ti-6Al-4V alloys manufactured by powder bed additive manufacture. *Materials Science and Technology*. doi:10.1080/02670836.2016.1172787
- Vandenbroucke, B., Kruth, J., 2007. Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts. *Rapid Prototyping Journal* 13, 196–203. doi:10.1108/13552540710776142
- Vayre, B., 2014. Design for Additive Manufacturing, focus on EBM technology. PhD thesis, Univ. Grenoble Alpes.
- Vayre, B., Vignat, F., Villeneuve, F., 2013. Identification on Some Design Key Parameters for Additive Manufacturing: Application on Electron Beam Melting. *Procedia CIRP* 7, 264–269. doi:10.1016/j.procir.2013.05.045
- Vayre, B., Vignat, F., Villeneuve, F., 2012a. Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects. *Mechanics & Industry* 13, 89–96. doi:10.1051/meca/2012003
- Vayre, B., Vignat, F., Villeneuve, F., 2012b. Designing for additive manufacturing. *Procedia CIRP* 3, 632–637. doi:10.1016/j.procir.2012.07.108
- Vilaro, T., Colin, C., Bartout, J.D., 2011. As-fabricated and heat-treated microstructures of the Ti-6Al-4V alloy processed by selective laser melting. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science* 42, 3190–3199. doi:10.1007/s11661-011-0731-y
- Vo, T.H., Dautre, P.T., Prudhomme, G., Marin, P., Pourroy, F., Vignat, F., 2015. Place du prototype physique dans l'étape d'analyse d'un processus de reconception de pièce pour une fabrication additive. 14ème Colloque National AIP-Priméca, France 284–289.
- Wang, L., 2015. An overview of function block enabled adaptive process planning for machining. *Journal of Manufacturing Systems* 35, 10–25. doi:10.1016/j.jmsy.2014.11.013
- Wang, L., Cai, N., Feng, H.-Y., Liu, Z., 2006. Enriched machining feature-based reasoning for generic machining process sequencing. *International Journal of Production Research* 44, 1479–1501. doi:10.1080/00207540500354119
- Wang, L., Feng, H.-Y., Cai, N., 2003. Architecture design for distributed process planning. *Journal of Manufacturing Systems* 22, 99–115. doi:10.1016/S0278-6125(03)90008-2
- Wang, Y.D., Tang, H.B., Fang, Y.L., Wang, H.M., 2010. Microstructure and mechanical properties of laser melting deposited 1Cr12Ni2WMoVNb steel. *Materials Science and Engineering: A* 527, 4804–4809. doi:10.1016/j.msea.2010.04.004
- Wilson, J.M., Piya, C., Shin, Y.C., Zhao, F., Ramani, K., 2014. Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis.

- Journal of Cleaner Production 80, 170–178. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.084
- Wohlers, T., 2014. Wohlers Report 2015: Additive Manufacturing and 3D printing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report. Wohlers Associates.
- Woo, Y., Sakurai, H., 2002. Recognition of maximal features by volume decomposition. CAD Computer Aided Design 34, 195–207. doi:10.1016/S0010-4485(01)00080-X
- Xu, W., Brandt, M., Sun, S., Elambasseril, J., Liu, Q., Latham, K., Xia, K., Qian, M., 2015. Additive manufacturing of strong and ductile Ti–6Al–4V by selective laser melting via in situ martensite decomposition. Acta Materialia 85, 74–84. doi:10.1016/j.actamat.2014.11.028
- Yadroitsev, I., Thivillon, L., Bertrand, P., Smurov, I., 2007. Strategy of manufacturing components with designed internal structure by selective laser melting of metallic powder. Applied Surface Science 254, 980–983. doi:10.1016/j.apsusc.2007.08.046
- Yap, C.Y., Chua, C.K., Dong, Z.L., Liu, Z.H., Zhang, D.Q., Loh, L.E., Sing, S.L., 2015. Review of selective laser melting: Materials and applications. Applied Physics Reviews 2. doi:10.1063/1.4935926
- Yip-Hoi, D., Dutta, D., Huang, Z., 2003. A customizable machining feature extraction methodology for turned components. Journal of Manufacturing Systems 22, 82–98. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0278-6125(03)90007-0
- Yolton, C.F., Froes, F.H. (Sam., 2015. Conventional titanium powder production, Titanium Powder Metallurgy. Elsevier Inc. doi:10.1016/B978-0-12-800054-0.00002-2
- Zhang, L.C., Klemm, D., Eckert, J., Hao, Y.L., Sercombe, T.B., 2011. Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of a biomedical Ti–24Nb–4Zr–8Sn alloy. Scripta Materialia 65, 21–24. doi:10.1016/j.scriptamat.2011.03.024
- Zhang, Y., Bernard, A., Gupta, R.K., Harik, R., 2016. Feature Based Building Orientation Optimization for Additive Manufacturing. Rapid Prototyping Journal 22. doi:10.1108/RPJ-03-2014-0037
- Zhao, F., Ogaldez, J., Sutherland, J.W., 2012. Quantifying the water inventory of machining processes. CIRP Annals - Manufacturing Technology 61, 67–70. doi:10.1016/j.cirp.2012.03.027
- Zhu, Z., Dhokia, V., Newman, S.T., 2017. A novel decision-making logic for hybrid manufacture of prismatic components based on existing parts. Journal of Intelligent Manufacturing 28, 131–148. doi:10.1007/s10845-014-0966-8
- Zhu, Z., Dhokia, V., Newman, S.T., 2013. The development of a novel process planning algorithm for an unconstrained hybrid manufacturing process. Journal of Manufacturing Processes 15, 404–413. doi:10.1016/j.jmapro.2013.06.006
- Zhu, Z., Dhokia, V., Newman, S.T., Nassehi, A., 2014. Application of a hybrid process for high precision manufacture of difficult to machine prismatic parts. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 74, 1115–1132. doi:10.1007/s00170-014-6053-7
- Zirmi, O., 2006. Analyse de fabricabilité en conception de gammes d’usinage pour l’aéronautique. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, France.

Annexes

Annexe A : Liste des publications

A-1 Publications en revue internationale

- [1] Mandil G., **Le V.T.**, Paris H., Suard M. Building new entities from existing titanium part by electron beam melting: microstructures and mechanical properties. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2016; 85:1835–46. doi: 10.1007/s00170-015-8049-3
- [2] **Le V.T.**, Paris H., Mandil G. Extracting features for manufacture of parts from existing components based on combining additive and subtractive technologies. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing* 2017. doi: 10.1007/s12008-017-0395-y (*to be published*)
- [3] **Le V.T.**, Paris H., Mandil G. Environmental impact assessment of an innovative strategy based on an additive and subtractive manufacturing combination. *Journal of Cleaner Production* 2017; 164: 508-523. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.06.204
- [4] **Le V.T.**, Paris H., Mandil G. Process planning for combined additive and subtractive manufacturing technologies in a remanufacturing context. *Journal of Manufacturing systems* 2017; 44: 243-254. doi: 10.1016/j.jmsy.2017.06.003
- [5] **Le V.T.**, Paris H., Mandil G. The development of a strategy for direct material reuse based on additive and subtractive manufacturing technologies. *Additive Manufacturing* 2017 (*submitted*)

A-2 Publications dans les conférences internationales et nationales

- [6] **Le V.T.**, Paris H., Mandil G. Extraction of features for combined additive manufacturing and machining processes in a remanufacturing context. *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing, Springer International Publishing* 2017; p. 179–89. doi:10.1007/978-3-319-45781-9_19
- [7] **Le V.T.**, Paris H., Mandil G. A direct material reuse approach based on additive and subtractive manufacturing technologies. *Procedia CIRP* 2017; 61: 229-234. doi:10.1016/j.procir.2016.11.190

- [8] **Le V.T.**, Paris H., Mandil G. Using additive and subtractive manufacturing technologies in a new remanufacturing strategy to produce new parts from End-of-Life parts. *22nd Congrès Français de Mécanique (CFM2015)*, Août 2015, Lyon, France.
- [9] **Le V.T.**, Paris H., Mandil G. Extraction d'entités additives et d'usinage dans un contexte de remanufacturing. *9ème Assises MUGV2016*, Juin 2016, Tours, France.
- [10] **Le V.T.**, Paris H., Mandil G. Modification d'un produit en EBM : Caractérisations métallurgiques et mécaniques. *Manufacturing '21*, Juin 2015, Bordeaux, France (*présentation*).

Annexe B : Métallurgie de l'alliage de titane (Ti-6Al-4V)

B-1 Généralités

L'alliage Ti-6Al-4V est un alliage de titane ($\alpha + \beta$) le plus répandu au monde dans tous les domaines industriels. Les compositions chimiques et le diagramme de phase pseudo-binaire de cet alliage sont présentés dans le Tableau 3.2 et la Figure 3.2 (chapitre 3), respectivement. Il présente la phase β de la température de fusion (1660°C) à la température de β *transus* (environ 980°C). À cette température, une transformation de phase se produit soit par la diffusion contrôlée, soit sans diffusion, en fonction de la quantité de stabilisateurs β et de la vitesse de refroidissement. La microstructure résultante est ($\alpha + \beta$) ou ($\alpha + \alpha'$). Si la vitesse de refroidissement est suffisamment élevée ($> 400^{\circ}\text{C/s}$), la phase martensite α' peut être formée entre la température du début de martensite (M_s , environ 575°C) et la température de création de martensite (M_F). La microstructure à la température ambiante de cet alliage est fonction de l'histoire thermomécanique.

B-2 Microstructures de Ti-6Al-4V

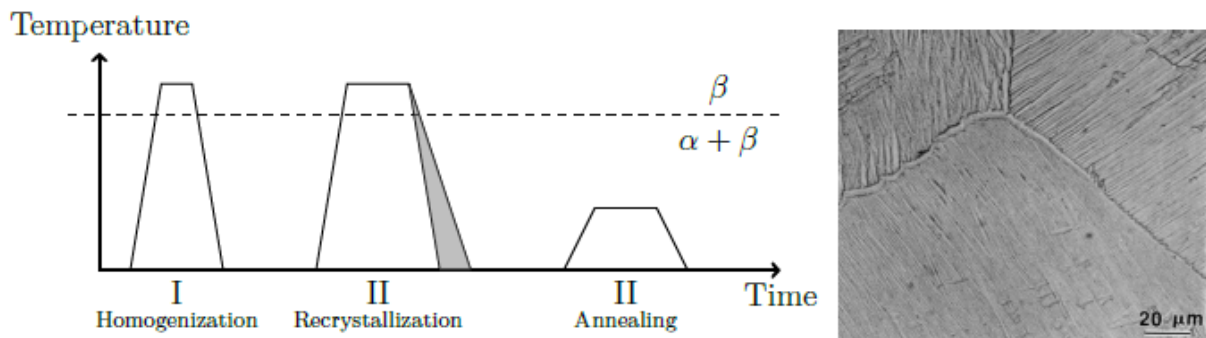


Figure B-2a. Lamellaire : courbe de traitement et microstructures (à droite) (Suard, 2015).

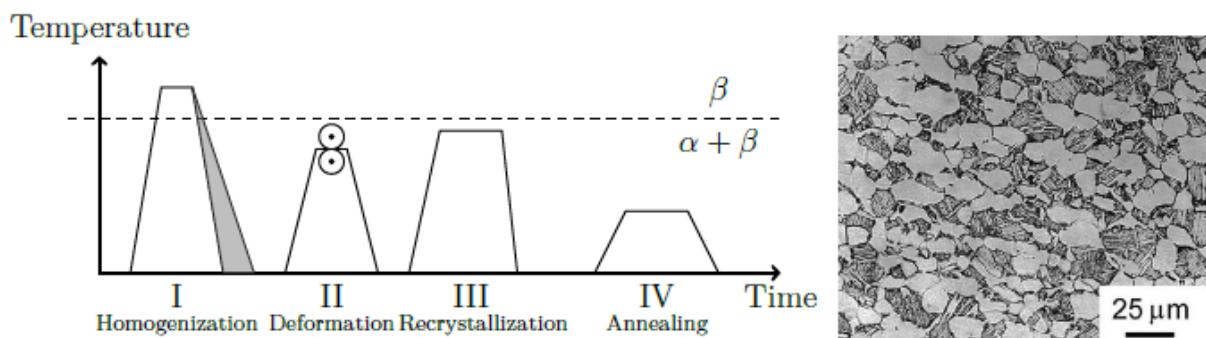


Figure.B-2b. Duplex : courbe de traitement et microstructures (à droite) (Suard, 2015).

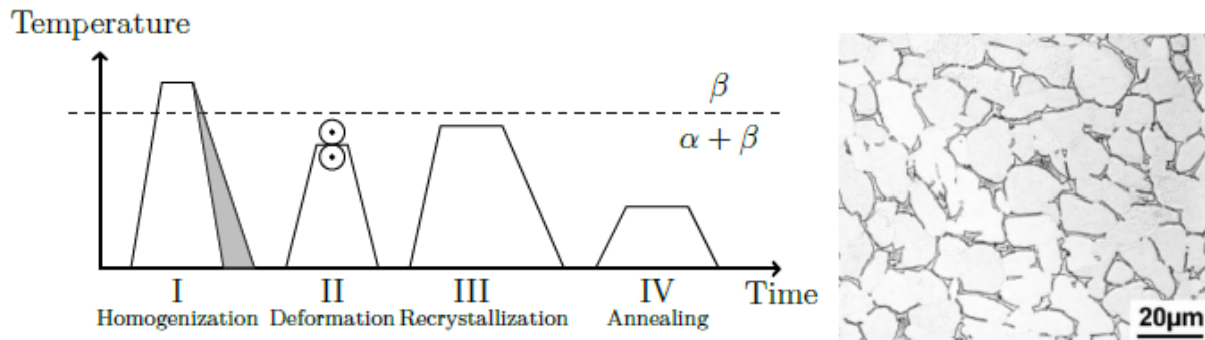


Figure B-2c. Equiaxe : courbe de traitement et microstructures (à droite) (Suard, 2015).

Dans les traitements thermodynamiques typiques, trois types de microstructures différentes de l'alliage Ti-6Al-4V (microstructures lamellaires, équiaxes ou duplex) sont généralement observés. Cela dépend de la température de ces étapes et de la vitesse de refroidissement après l'étape de recristallisation (Figure B-2.a-b-c).

La microstructure lamellaire (Figure B-2a) est obtenue par un traitement thermique dans le domaine β (II), au-dessus de la température de β *transus*. La vitesse de refroidissement est ensuite réglée pour contrôler certaines caractéristiques de la phase α .

La courbe de traitement est similaire pour les microstructures duplex (Figure B-2b) et équiaxe (Figure B-2c). La déformation (II) et la recristallisation (III) se produisent aux températures inférieures au β *transus*. La vitesse de refroidissement de l'étape III impose les caractéristiques de la phase α conduisant à une microstructure duplex pour les vitesses de refroidissement élevées et une équiaxe pour les vitesses de refroidissement lentes.