

REBUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Métallurgie

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie des Matériaux

*Etude de la fabrication additive appliquée à
l'alliage Ti-6Al-4V*

Sara IKHELEF

Présenté et soutenu le 23/09/2020

Composition du jury :

Président	M. CHITROUB,	Professeur, ENP
Encadreur	F. HELLAL	Professeur, ENP
Examineur	A. KASSER ,	Professeur, ENP
Examineur	H. SEDJAL,	Docteur, ENP

EBUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Métallurgie

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie des Matériaux

*Etude de la fabrication additive appliquée à
l'alliage Ti-6Al-4V*

Sara IKHELEF

Présenté et soutenu le 23/09/2020

Composition du jury :

Président	M. CHITROUB,	Professeur, ENP
Encadreur	F. HELLAL	Professeur, ENP
Examineur	A. KASSER ,	Professeur, ENP
Examineur	H. SEDJAL,	Docteur, ENP

ملخص يمثل التصنيع الإضافي للتيتان ثورة صناعية حقيقية تتحدى عمليات التصنيع التقليدية. تتيح هذه العملية المبتكرة تقليل أوقات وتكاليف تصنيع الأجزاء المعدنية من أجل الحفاظ على القدرة التنافسية للمصنعين. وقد أحرز الإمداد بالمادة الأولية لهذا القطاع أيضًا تقدمًا كبيرًا. العديد من التقنيات تم تطويرها، لكن هناك عمليتين محددتين لهما خصائص يمكن أن تلبي الاحتياجات الصناعية: تقنيات دمج طبقة المسحوق والتقنيات القائمة على توجيه الطاقة. كما تم إنشاء روابط بين معاملات المعالجة، والبنى المجهرية الناتجة والخصائص الميكانيكية. علما ان اختيار تقنية التصنيع المناسبة، إلى جانب تحسين التصميم يمكن أن يؤدي إلى الاقتصاد في تكاليف الانتاج. اما فيما يخص البحث في هذا المجال فان التنبؤ بخصائص المنتج ، مع مراعاة خصائص العملية يعد أحد التحديات الرئيسية التي تواجهه

الكلمات الدالة : التصنيع الإضافي, PBF, DED, Ti-6Al-4V, مسحوق بنية مجهرية, خصائص ميكانيكية

Abstract : The additive manufacturing of metal parts in Ti-6Al-4V represents a real industrial revolution which challenges traditional manufacturing processes. This innovative process should make it possible to reduce the times and costs of manufacturing metal parts in order to maintain the competitiveness of manufacturers. The supply of prior matter for this sector has also made considerable progress. Several metal additive manufacturing technologies have been developed, but two identified processes have characteristics that can meet industrial needs: powder bed fusion technologies and directed energy technologies. A study of the links between processing parameters, resulting microstructures and mechanical properties is carried out. Selecting the right manufacturing technology, along with proper design optimization, can lead to huge savings. Predicting the properties of the product, while taking into account the specifics of the process, is one of the major challenges facing research in this field.

Key words: Additive manufacturing, Ti-6Al-4V, powder, PBF, DED, microstructure, mechanical properties

Résumé : La fabrication additive de pièces métalliques en Ti-6Al-4V représente une véritable révolution industrielle qui remet en cause les procédés de fabrication traditionnels. Ce procédé innovant doit permettre de diminuer les temps et les coûts de fabrication de pièces métalliques pour maintenir la compétitivité des industriels. L'approvisionnement de matière première pour ce secteur a également fait des progrès considérables. Plusieurs technologies de fabrication additive métallique ont été développées, mais deux procédés identifiés présentent des caractéristiques pouvant répondre aux besoins industriels : les technologies de fusion sur lit de poudre et les technologies basées sur l'énergie dirigée. Une étude des liens entre les paramètres de traitement, les microstructures résultantes et les propriétés mécaniques est effectuée. La sélection de la bonne technologie de fabrication, avec une optimisation appropriée de la conception, peut conduire à des économies très importantes. La prédiction des propriétés du produit, tout en tenant compte des particularités du procédé, est l'un des défis majeurs devant la recherche dans ce domaine.

Mots clés : Fabrication additive, Ti-6Al-4V, poudre, PBF, DED, microstructure, propriétés mécaniques, marché, modèle.

Remerciements :

Ce travail est l'aboutissement d'un dur labeur au sein de l'Ecole Nationale Polytechnique ; mes remerciements vont d'abord à Allah qui m'a doté de pouvoir aboutir à la fin de ce cursus. Je tiens aussi à adresser mes remerciements à ma famille, et plus précisément à mes grands-parents et mes parents qui m'ont toujours soutenue. Ce présent travail a pu voir le jour grâce à leur soutien.

Je souhaite également remercier le Professeur HELLAL pour l'attention spéciale qu'il m'a prêtée dans le cadre de cette étude.

Mes remerciements vont aussi à l'encontre de toute personne ayant contribué dans mon long chemin vers l'obtention de ce diplôme.



Dédicace

*A mes chers grands parents, a mes
chers parents pour tous leurs
sacrifices, leur amour, leur tendresse,
leur soutien et leurs prières tout au
long de mes études,
A toute ma famille pour leur soutien
tout au long de mon parcours
universitaire,
Que ce travail soit l'accomplissement
de vos vœux tant allégués, et le fruit de
votre soutien infailible,
Merci d'être toujours là pour moi.*

Table des matières

- ❖ Liste des tableaux
- ❖ Liste des figures
- ❖ Liste des abbreviations

INTRODUCTION GENERALE	11
PREMIERE PARTIE : PRESENTATION DU PROCEDE DE FABRICATION ADDITIVE APPLIQUE A L'ALLIAGE Ti-6Al-4V	
CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA TECHNOLOGIE	
1.1 L'importance des alliages de titane.	14
1.2 Pourquoi la fabrication additive du titane ?	14
1.3 Introduction à la fabrication additive	15
1.3.1 Les diverses technologies de fabrication additive	16
1.3.2 Le titane dans l'industrie de la fabrication additive métallique	16
CHAPITRE II : MATIERES PREMIERES POUR LA FABRICATION ADDITIVE DE TITANE	
2.1 Introduction.....	19
2.2 Techniques de préparation de la poudre de titane	19
2.2.1 Les poudres de forme irrégulière.....	20
2.2.2 Poudre sphérique préalliée	23
2.2.3 Alimentation par fil.....	28
2.3 PROBLÈMES ET QUALIFICATION DES POUDRES DE TITANE POUR LA FABRICATION ADDITIVE	28
CHAPITRE III : PROCESSUS DE FABRICATION ADDITIVE DU TITANE	
3.1 Introduction.....	32
3.2 Numerisation dans la fabrication additive	33
Technologie de fabrication de pièces	33
3.2.1 Fusion sur lit de poudre	35
3.2.2 Dépôt d'énergie dirigé	36
3.3 Autres processus fabrication additive	37
3.4 Contrôle des processus et surveillance in situ	38
3.5 Post-traitement des pièces de fabrication additive	40
3.6 Inspection et qualification des pièces de fabrication additive	41
CHAPITRE IV : COMPARAISON DES TECHNOLOGIE DE FABRICATION ADDITIVE	
4.1 Introduction.....	45
4.2 Comparaison des procédés phares de la fabrication additive du titane	45
4.3 Rugosité de surface et défauts des pièce FA	47
4.4 Refabrication	48

4.5	Fabrication hybride pour les grandes pièces	49
4.6	Concept bi-structurel.....	50
4.7	Bimatériau ou multimatériau dans la fabrication additive	51
CHAPITRE V : MARCHÉS ET APPLICATIONS DE LA FABRICATION ADDITIVE DU TITANE		
5.1	Introduction.....	53
5.2	Industrie aérospatiale.....	53
5.3	Industrie médicale	55
5.4	Autres industries	56
5.5	Analyse des coûts de la fabrication et comparaison avec les méthodes conventionnelles ..	56
5.6	Economie de la fabrication additive	58
5.7	Durabilité de la fabrication additive	61
CHAPITRE VI : NOUVEAUX DÉVELOPPEMENTS DANS LA FABRICATION ADDITIVE DU Ti-6Al-4V		
6.1	Introduction.....	63
6.2	Recherche et développement en titane pour la fabrication additive	63
6.3	Nouvelles initiatives de conception	63
6.4	Matiere premiere a faible coût.....	64
6.5	Capacités pour les grandes pièces	65
6.6	Nouvelles technologies d'inspection	66
6.7	Utilisation projetée de la fabrication additive pour les composants en titane	66
DEUXIEME PARTIE : ETUDE DES PROPRIETES MICROSTRUCTURALES ET MECANIQUES DE L'ALLIAGE Ti-6Al-4V PRODUIT PAR FABRICATION ADDITIVE		
CHAPITRE I : MICROSTRUCTURE ET PROPRIETES MECANIQUES		
1.1	Introduction.....	70
1.2	Caractéristiques microstructurales.....	70
1.2.1	Variétés microstructurales.....	70
1.2.2	Solidification	72
1.2.3	Grains en colonne	73
1.2.4	Germination et croissance épitaxique	74
1.2.5	Composition de phase	74
1.3	Influence du traitement post-fabrication	75
1.4	Evolution de la prédiction microstructurale du Ti-6Al-4V de la FA	76
1.5	Propriétés mécaniques	79
1.5.1	Comportement en traction.....	79
1.5.2	Comportement en fatigue	81
CONCLUSION.....		86
Bibliographie		88

❖ Liste des tableaux

Tableau 1.1 Comparaison du cout de Titane avec d'autres métaux.....	14
Tableau 1.2 Consommation du métal	14
Tableau 2.1 Caractéristiques des différents types de poudre de titane	19
Tableau 3.1 Diverses technologies FA pour le traitement du titane et de ses alliages (1) (1) (1) (1)	34
Tableau 4.1 Comportement en traction du Ti-6Al-4V le long de la direction de fabrication et suivant la normale à cette direction	76
Tableau 4.2 Comparaison entre les différents modèles de prédiction microstructurale.....	78
Tableau 5.1 Comparaison des différentes technologies FA (1) (1) (1)	46

❖ Liste des figures

Figure 1.1 Moule laminé issu du brevet de DiMatteo de 1974326 et (B) dessin schématique montrant l'invention de Householder.....	16
Figure 2.1 Schéma du procédé FCC Cambridge (1)	21
Figure 2.2 Image MEB de la poudre Ti-6Al-4V obtenue par électrolyse dans du CaCl ₂ fondu à 950 °C. Remarquons la distorsion de la morphologie sphérique (procédé FCC Cambridge)	21
Figure 2.3 Schéma du processus ITP / Armstrong. Ce processus est prétendu être continu, avec une efficacité de réaction de 100%, à basse température, à faible capital, à faible coût de main-d'œuvre et peut produire directement des alliages tels que Ti-6Al-4V.	22
Figure 2.4 Photomicrographie de poudre de Ti-6Al-4V angulaire produite par le procédé ITP / Armstrong....	22
Figure 2.5 Poudre irrégulière Ti-6Al-4V d'hydrure déshydrure.....	22
Figure 2.6 Schéma du procédé d'électrode rotative au plasma (PREP) pour la production de poudre de titane préalliée sphérique	23
Figure 2.7 Schéma du procédé d'atomisation par gaz pour la production de poudre de titane préalliée sphérique.....	23
Figure 2.8 Processus de sphéroïdisation Tekna	25
Figure 2.9 Photomicrographie MEB de poudre sphérique (à gauche) produite par traitement de poudre de titane HDH angulaire (à droite) en utilisant la technique Tekna.....	25
Figure 2.10 Le concept d'atomisation par gaz à couplage étroit tel que pratiqué par Praxair.	26
Figure 2.11 L'équipement d'atomisation de gaz à technologie LPW.	26
Figure 2.12 L'équipement d'atomisation par gaz ALD EIGA.....	27
Figure 2.13 Schéma du processus de granulation-frittage-désoxygénation (GSD).	28
Figure 2.14 Effet des passages répétés à travers l'équipement de fusion sur lit de poudre du PBF Realizer sur la teneur en oxygène du Ti-6Al-4V.14	30
Figure 3.1 Schéma récapitulatif du processus de FA	32
Figure 3.2 Schéma descriptif de la technologie PBF	36
Figure 3.3 Schéma descriptif de la technologie DED.....	37
Figure 3.4 Processus de fabrication additive par ultrasons. (A) Soudage par ultrasons de bandes d'aluminium et de titane; (B) Opérations d'usinage périodiques.	38
Figure 3.5 Système breveté de contrôle de rétroaction en boucle fermée de DM3D. (A) Illustration schématique. (B) Effet du processus sur une pièce avec contrôle (à gauche) et sans contrôle (à droite).39	39
Figure 3.6 La surveillance du bain de fusion basée sur la photodiode d'EOS a été développée à l'aide de l'observateur de processus rapide PLASMO.	40
Figure 4.1 Diagramme d'équilibre représentant les phases solides pour le Ti-6Al-4V.....	70
Figure 4.2 Variété de microstructures Ti-6Al-4V résultant de FA avec/sans TT (a) entièrement lamellaire, (b) bimodale / duplexe, (c) Widmanstätten (grossière), (d - e) martensite aciculaire, (f) Widmanstätten (fine)	71
Figure 4.3 Diagramme de transformation en refroidissement continu (TRC) pour Ti-6Al-4V à partir de la température β-transus jusqu'à 500 K et montrant les régions α''(bleu) et α' (cyan)	71
Figure 4.4 Illustrations schématiques des mécanismes de transformation de phase pendant le refroidissement continu du Ti-6Al-4V à partir de températures supérieures à β – transus. Les régions grises sont en phase β, les régions blanches sont en phase α en (a) - (e), le grain en (f) avec de fines	

lignes orthogonales indique un grain entièrement martensitique (peut être α 'ou α '"), tandis que les lignes noires sont des joints de grains β	72
Figure 4.5 Grains de colonne dans des pièces Ti-6Al-4V produites par (a) DED (b) SLM	73
Figure 4.6 Composition de phase de Ti-6Al-4V fabriqué par DED: (a-b) Micrographies de macrostructure et microstructure fine des échantillons DED ; (c) Carte d'évolution microstructurale par couche déposée	75
Figure 4.7 Microstructure du Ti-6Al-4V par DMD: (A) à l'état reçu et (B) Après HIP et vieillissement selon AMS 4999A.....	76
Figure 4.8 Résistance à la traction, limite d'élasticité et allongement de l'alliage Ti-6Al-4V construit à l'aide de divers procédés FA.....	79
Figure 4.9 Comportement en traction à température ambiante de l'alliage Ti-6Al-4V produit à l'aide de diverses technologies FA et leur comparaison avec les propriétés des matériaux coulés et corroyés. Des microstructures typiques sont également incluses en comparaison. Les symboles remplis et creux représentent respectivement la résistance à la traction et la limite d'élasticité....	80
Figure 4.10 Comportement mécanique de l'alliage Ti-6Al-4V réparé par DMD. NR représente un matériau non réparé, VR est un matériau réparé par rainure en «V» et «SR» est un matériau réparé par rainure (voir la Fig. 4.8 pour la géométrie de réparation).	81
Figure 4.11 Géométrie des éprouvettes de Ti-6Al-4V réparés par DMD pour les essais de traction. Les échantillons ont été dégagés et remplis de Ti-6Al-4V en utilisant un processus DMD pour simuler la propriété des matériaux réparés par DMD.	81
Figure 4.12 Comportement de croissance de fissure de (a) EBM Ti-6Al-4V perpendiculaire et parallèle à la direction de construction, (b) recuit et HIPed SLM Ti-6Al-4V (c) faible et haute puissance LENS Ti-6Al-4V après recuit.....	82
Figure 4.13 La relation entre ΔK_{th} et une épaisseur de grain Ti-6Al-4V obtenue à partir de divers procédés FA	83
Figure 4.14 Comportement en fatigue du Ti-6Al-4V fabriqué par EBM dans différentes conditions.....	84
Figure 4.15 Comportement en fatigue de Ti-6Al-4V fabriqué par SLM dans différentes conditions.....	85
Figure 5.1 Comparaison des technologies PBF et DED en termes d'épaisseur de couche et de vitesse de dépôt.	46
Figure 5.2 Exemples de (A) un pore de gaz et (B) un défaut d'absence de fusion SEBM Ti-6Al-4V. (C) facies de rupture traction Ti-6Al-4V non fondue et (D) microtomographie à rayons X synchrotron de porosité interne dans des particules de Ti-6Al-4V atomisées par gaz (cercles noirs à l'intérieur de particules de poudre blanche).....	48
Figure 5.3 Réparation par DMD des composants de turbine; à gauche: aube réparée, au milieu: macro en coupe et à droite: microstructures (de haut en bas montre le revêtement, l'interface et le matériau de base).	49
Figure 5.4 Boîtier de ventilateur produit en ajoutant des fonctionnalités avec FA (dépôt d'énergie dirigé assisté par laser) à une pièce forgée.	50
Figure 5.5 (A) Echafaudage tissulaire Ti-6Al-4V ; (B) Ti-6Al-4V poreux pour les implants médicaux fabriqué par SLM.....	50
Figure 5.6 Revêtement fonctionnellement gradué de l'alliage Rene88DT sur Ti-6Al-4V à l'aide de la technologie laser FA (DED). (A) et (B) montrent les gradients de composition de divers éléments le long de la profondeur à partir de la surface supérieure. Les microstructures correspondantes sont indiquées dans (C) Ti 6Al 4V 0% Rene88DT, (D) Ti-6Al-4V 19% Rene88DT et (E) Ti-6Al-4V 38% Rene88DT.....	51
Figure 6.1 Chiffre d'affaires projeté pour les poudres FA de titane de 2014 à 2024. (1)	53
Figure 6.2 Corps de pompe en titane fabriquée par le procédé SLM.....	54
Figure 6.3 Applications d'implants médicaux: implant CMF (à gauche) utilisant la technologie EBM, cupule acétabulaire (médiane) utilisant la technologie EBM, implant tibial (à droite) utilisant la technologie EBM.	55
Figure 6.4 Echafaudage Ti-6Al-4V qui a été produit par le procédé DMD.	55
Figure 6.5 couches graduées d'Al et de Ti anti-rayonnement.....	56
Figure 6.6 Blindage laminé après essai balistique. La pièce a été construite en utilisant la fabrication additive par ultrasons (UAM).	56
Figure 6.7 Deux modèles de coûts différents pour un système de frittage laser (procédé PBF).	57

Figure 6.8 Répartition typique des coûts des différentes étapes impliquées dans la FA du titane par DED.....	58
Figure 6.9 Comparaison des coûts pour un train d'atterrissage fabriqué en FA (procédé SLS) et le procédé HPDC conventionnel.	59
Figure 6.10 Support BALD pour Joint Strike Fighter construit à l'aide de la technologie EBM	59
Figure 6.11 Boucle de siège produite à l'aide de la technologie DMLS.....	60
Figure 7.1 Schéma du processus de fabrication additive à arc transféré par plasma.	65
Figure 7.2 Un composant automobile produit à partir de poudre de Metalysis après sphéroïdisation de la poudre.	65
Figure 7.3 Pièce de démonstration de nervure d'aileron en Ti-6Al-4V (poids de 9 kg) fabriquée par le procédé WAAM.	66

❖ **Liste des abbreviations**

DED directed energy deposition

DM direct manufacturing

DMD direct metal deposition

DMDCAM direct metal deposition computer-aided manufacturing

DMLS direct metal laser sintering

EB electron beam

EBM electron beam melting

ELI extra low interstitial

FA fabrication additive

FFC fray, farthing, and chen (powder production process)

HDH hydride_dehydride (powder)

HIP hot isostatic pressing

ITP International Titanium Powder (Corporation)

LENS laser energy net shaping

LM laser melting

MER Materials and Electrochemical Research (Corporation)

P/M powder metallurgy

PBF powder bed fusion

PREP plasma rotating electrode process

SLM selective laser melting

SLS selective laser sintering

SMD shaped metal deposition

UAM ultrasonic additive manufacturing

WAAM wire arc additive manufacturing

ZAT zone affectée thermiquement

INTRODUCTION GENERALE

Les industries aérospatiale et médicale requièrent une large utilisation du titane et ses alliages pour leurs applications nécessitant de hautes performances, faibles poids, compatibilité biologique, etc. Le titane et ses alliages ne sont pas seulement cher, mais également difficile à usiner en utilisant des méthodes de fabrication traditionnelles entraînant des coûts de fabrication élevés. Alors que des améliorations dans l'usinage du titane se sont produites, tout ce qui peut être fait pour produire un composant plus proche de la configuration finale se traduira par une réduction des coûts, d'où l'attraction de composants de forme quasi nette. Ceci a conduit à de nombreuses recherches sur divers procédés potentiellement moins coûteux, y compris les techniques de forme quasi nette issues de la métallurgie des poudres (M/P)

Dans ce travail, une technique de mise en forme proche de la M/P appelée fabrication additive (FA) sera revue en mettant l'accent sur l'alliage de titane Ti-6Al-4V. La FA offre une opportunité unique en réduisant les besoins en matières premières ainsi que l'étendue des opérations de post-usinage nécessaires.

Les différentes approches de la FA sont présentées, suivies de quelques exemples de composants produits par la FA. Les microstructures et les propriétés mécaniques du Ti-6Al-4V produit par FA sont répertoriées et se comparent très bien aux produits coulés et corroyés. Enfin, les avantages économiques à gagner en utilisant la technique FA par rapport aux matériaux traités de manière conventionnelle sont présentés.

PREMIERE PARTIE : PRESENTATION DU
PROCEDE DE FABRICATION ADDITIVE
APPLIQUE A L'ALLIAGE Ti-6Al-4V

CHAPITRE I :
PRESENTATION DE LA TECHNOLOGIE

CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA TECHNOLOGIE

1.1 L'importance des alliages de titane.

Les alliages de titane sont parmi les plus importants des matériaux avancés, essentiels pour améliorer les performances des systèmes aérospatiaux et terrestres. Ces alliages fournissent un large domaine d'applications grâce à leurs propriétés mécaniques particulières (propriétés normalisées par la densité) et comportement anticorrosion exceptionnel. Cependant, le coût élevé des alliages de titane par rapport aux matériaux concurrents (Tableau 0.1) restreint leur domaine d'utilisation

Le coût élevé du titane par rapport aux autres métaux indiqués dans le Tableau 0.1 a donné les consommations annuelles comme indiqué dans le Tableau 0.2. (1)

Tableau 0.1 Comparaison du coût de Titane avec d'autres métaux

Produit	Matériau (\$/Kg)		
	Acier	Aluminium	Titan
Minerai	0.04	0.02	0.48
Métal	0.22	2.42	11.97
Lingot	0.33	2.53	19.95
Tôle	0.66 - 1.32	2.20 - 11.00	33.00 - 110.00

Tableau 0.2 Consommation du métal

Métal	Consommation (10 ³ Tonnes)
Titane	50
Acier	700000
Acier inoxydable	13000
Aluminium	25000

Le Ti-6Al-4V est l'alliage phare de l'industrie du titane, également connu sous le nom Grade 5, TA6V ou Ti 6-4. Cet alliage de titane du type " α - β " est le plus couramment utilisé et représente 70% de l'utilisation mondiale de titane. Les stabilisateurs de phases sont l'aluminium et le vanadium. L'aluminium réduit la densité, stabilise et renforce la phase α tandis que le vanadium fournit une plus grande quantité de phase β , plus ductile pour le travail à chaud.

1.2 Pourquoi la fabrication additive du titane ?

Les industries aérospatiale et médicale requièrent une large utilisation du titane et ses alliages pour leurs applications nécessitant de hautes performances, faibles poids, compatibilité biologique, etc. Le titane et ses alliages ne sont pas seulement cher, mais également difficile à usiner en utilisant des méthodes de fabrication traditionnelles entraînant des coûts de fabrication élevés. Alors que des améliorations dans l'usinage du titane se sont produites, tout ce qui peut être fait pour produire un

composant plus proche de la configuration finale se traduira par une réduction des coûts, d'où l'attraction de composants de forme quasi nette. Ceci a conduit à de nombreuses recherches sur divers procédés potentiellement moins coûteux, y compris les techniques de forme quasi nette issues de la métallurgie des poudres (M/P) (1).

Dans ce travail, une technique de mise en forme proche de la M/P appelée fabrication additive (FA) sera revue en mettant l'accent sur l'alliage de titane Ti-6Al-4V. La FA offre une opportunité unique en réduisant les besoins en matières premières ainsi que l'étendue des opérations de post-usinage nécessaires.

Les différentes approches de la FA sont présentées, suivies de quelques exemples de composants produits par la FA. Les microstructures et les propriétés mécaniques du Ti-6Al-4V produit par FA sont répertoriées et se comparent très bien aux produits coulés et corroyés. Enfin, les avantages économiques à gagner en utilisant la technique FA par rapport aux matériaux traités de manière conventionnelle sont présentés.

1.3 Introduction à la fabrication additive

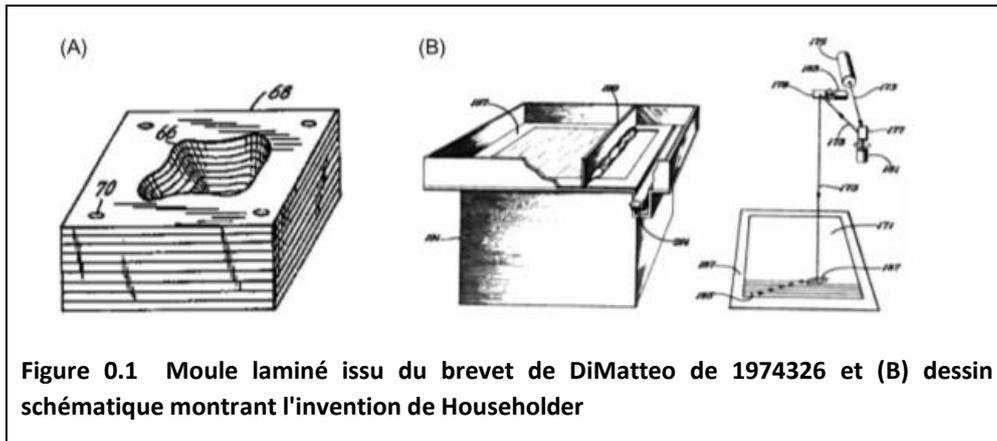
L'histoire de la FA en métal remonte au moins à 1920 par Baker qui a utilisé un arc électrique et une électrode métallique pour former des structures murées et des articles décoratifs. Aujourd'hui, les techniques de dépôt à énergie dirigée (Direct Energy Desposit DED), tels que le dépôt direct de métal (Direct Metal Desposit DMD), le Laser Engineered Net Shaping (LENS) ou la fabrication directe (Direct Manufacturing DM), sont basés sur des idées similaires mais intègrent le concept de fabrication en couche pour créer des pièces directement à partir de données de conception assistée par ordinateur (CAO). Cependant, le concept de la fabrication en couches trouve ses racines dans deux technologies différentes qui ont commencé au 19^{ème} siècle : la topographie et la sculpture photographique.

Dès 1892, Blather a breveté une technique de fabrication d'un moule pour cartes topographiques en relief utilisant des impressions des lignes de contour topographique sur une série de plaques de cire, découpant ces plaques de cire sur ces lignes, puis les empilant pour créer une carte en relief en papier.

En 1972 Matsubara a proposé un procédé utilisant une résine photopolymère enduite sur de la poudre de graphite / du sable, étalée en une couche, des zones sélectionnées de la couche chauffées et durcies à l'aide d'une lampe à vapeur de mercure et la zone restante dissoute pour créer des feuilles avec une géométrie définie, qui ont ensuite été empilées ensemble pour former un moule de coulée.

En 1974, en utilisant une technique d'empilement similaire, DiMatteo a produit des formes tridimensionnelles (3D) à partir de feuilles métalliques fraisées en contour qui ont ensuite été assemblées en couches par adhérence, boulons ou tiges coniques (Figure 0.1A).

En 1968, Swainson a proposé un procédé pour fabriquer directement un motif en plastique par polymérisation 3D sélective d'un polymère photosensible à l'intersection de deux faisceaux laser. Viennent ensuite les travaux de Ciraud (1972), Householder (1979) (Fig.1.2B), Pavage Kodama (1981), Herbert (1982), Hull (1984) et Deckerd (1986), traçant ainsi la voie vers les technologies d'impression 3D modernes à base de technique de fusion sur lit de poudre (Powder Bed fusion PBF) (1).



1.3.1 Les diverses technologies de fabrication additive

Toutes les technologies FA sont basées sur le principe commun de découper un modèle solide en plusieurs couches, de créer un chemin d'outil pour chaque couche, de télécharger ces données dans la machine et de réaliser la pièce couche par couche en suivant les données du modèle découpé en utilisant une source de chaleur (laser, faisceau d'électrons, arc électrique ou énergie ultrasonore, etc.) et une matière première (poudre métallique, fil ou tôle mince, etc.). ASTM F2792-12a catégorise toutes les technologies de FA dans un large groupe de sept catégories : jet de liant, DED, extrusion de matériau, jet de matériau, PBF, laminage de feuilles et polymérisation en cuve. De ces sept catégories, seulement quatre impliquent le traitement du métal — DED, PBF, stratification de matériau en feuilles et jet de liant — et uniquement les trois premiers de ces quatre ont été utilisés pour le traitement du titane et de ses alliages. Alors que les trois catégories, DED, PBF et consolidation par ultrasons ont démontré leur capacité à produire des pièces métalliques, leurs approches et leurs capacités varient considérablement. Les détails de leurs principes de fonctionnement, capacités, avantages et inconvénients seront traités au chapitre 3.

1.3.2 Le titane dans l'industrie de la fabrication additive métallique

Les efforts commerciaux de FA ont commencé avec l'introduction de la stéréolithographie (SL) et la création de 3D Systems Corporation en 1987. Cela a été suivi par la formation de EOS GmbH en 1990, Stratasys en 1991, DTM Corp. en 1992, Fockele & Schwarze (F&S) en 1994, Z Corp en 1996, et par la suite de nombreuses autres sociétés. Alors que la plupart de ces efforts consistaient à utiliser des matériaux polymères, la commercialisation des métaux mis en forme par FA a commencé avec DTM. DTM a lancé un système de frittage métallique, par frittage laser de poudres métalliques revêtues de polymère pour former un composant vert dans la station de frittage, suivie d'un processus de chauffage au four pour éliminer ce polymère, coller la matrice métallique, et l'infiltrer avec un métal secondaire pour éliminer la porosité. Contrairement à cela, EOS a développé un procédé de frittage laser direct des métaux (DMLS) dans lequel les poudres métalliques étaient directement frittées en utilisant un faisceau laser en mouvement.

Les efforts FA du titane ont commencé en 1997 chez Aeromet Corporation, qui s'est concentrée sur une technologie DED basée sur le laser pour les grands composants aérospatiaux et Arcam AB utilisant sa technologie brevetée de fusion par faisceau d'électrons (EBM) pour produire des composants médicaux. Le travail continu d'Arcam avec Adler Ortho Group a abouti à la Conformité Européenne (certification CE) des implants de hanche en titane fabriqués par EBM en 2007 marquant une étape significative dans la FA en titane. En 1998, la commercialisation par Optomec Inc. du LENS et de la DMD développée par le groupe POM, ont apporté une poussée supplémentaire à la FA en métal et au

traitement du titane. Pour des raisons économiques, les premiers efforts sur la FA en métal se sont concentrés sur des pièces et des composants coûteux, l'industrie aérospatiale et médicale étant un choix naturel. Cela a abouti à un accent majeur sur le titane et ses alliages, en plus des autres alliages coûteux. Ces efforts sur le traitement du titane ont rapidement été suivis par d'autres sociétés telles que EOS, Concept Lasers, MTT, SLM Solutions, Sciaky, Solidica, etc (1).

CHAPITRE II :
MATIERES PREMIERES POUR LA FABRICATION
ADDITIVE DE TITANE

CHAPITRE II : MATIERES PREMIERES POUR LA FABRICATION ADDITIVE DE TITANE

2.1 Introduction

Alors que la plupart des technologies de fabrication additive utilisent la poudre comme matière première, il existe quelques exceptions, telles que la fabrication directe (DM) et le dépôt de métal façonné (SMD) ou la fabrication additive à l'arc à fil (WAAM) qui utilisent du fil de titane et la consolidation par ultrasons qui utilise des feuilles métalliques et / ou des tôles minces de titane comme matière première. Puisque la majorité des technologies de FA, y compris celles de la fusion sur lit de poudre (PBF) et la plupart de celles du dépôt d'énergie direct (DED), utilisent de la poudre métallique, une plus grande importance sera accordée à la production de poudre et à ses exigences pour l'utilisation de la FA.

2.2 Techniques de préparation de la poudre de titane

Le Tableau 0.1 présente les caractéristiques des principaux types de poudres de titane disponibles ou en cours de développement. Le niveau d'oxygène de la poudre d'hydrure-déshydrure (HDH) peut être réduit par désoxydation avec du calcium. Les poudres sphériques présentent de bonnes caractéristiques d'écoulement tandis que les poudres plus angulaires ne s'écoulent pas aussi bien. Le HDH angulaire peut être converti en une morphologie sphérique en utilisant le processus Tekna. En général, les poudres sphériques les plus fluides sont préférées pour la FA, mais les poudres angulaires ont également été traitées avec succès par cette technique. (1)

Tableau 0.1 Caractéristiques des différents types de poudre de titane

Procédé	Elémentaire (E) ou Pré-alliée (P)	avantages	inconvénients
Hunter (Na pur)	E	Cout bas, Excellente pour le compactage à froid	Disponibilité limitée, Taux de chlore élevé
HDH ^a Kroll (Mg pur)	E	Cout bas, Bonne compatibilité, Taux de chlore faible	
HDH produite à partir d'un alliage en lingot, tôle ou ferraille	P	Disponibilité	Cout élevé
Atomisation	P	Haute pureté Disponibilité	Cout élevé
REP/PREP ^b	P	Haute pureté	Cout élevé de compactage
ITP/Armstrong	E/P	Potentiel pour un cout plus bas	Transformable

FFC Cambridge	E/P	Cout plus bas	En cours d'étude
ADMA poudre hybride	E/P	Cout plus faible Meilleure compactibilité	Semi commercial
^a Hydride-dehydride			
^b Rotating Electrode Powder/ Powder Plasma Rotating Electrode Powder			

2.2.1 Les poudres de forme irrégulière

Le coût de la poudre de titane sphérique est un obstacle majeur à la commercialisation des technologies de FA dans le cadre de la fabrication traditionnelle. Les exigences de qualité strictes, telles que les spécifications de forme et de débit, réduisent leur fréquence d'utilisation. Par conséquent, il existe un intérêt significatif pour la production de poudre de titane à faible coût, généralement de forme angulaire, qui peut être utilisée en FA soit telle quelle ou après conversion en une morphologie sphérique.

Six procédés sans fusion pour la production de poudre angulaire semblent avoir le plus grand potentiel pour un produit moins coûteux que les matériaux sphériques, avec le processus supplémentaire de poudre d'hydruure qui a été développé par Advance Materials (ADMA) Products également d'un intérêt commercial potentiel (1). Ces six processus sont la méthode HDH, l'approche FFC Cambridge, la technique MER, la méthode du Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), le processus Chinuka et l'ITP (International Titanium Powder) / Technique Armstrong. Cependant, ces poudres ne sont pas encore disponibles dans le commerce et leur coût et traitement relatifs sont à être établis.

Un exemple du procédé de production d'une poudre angulaire est l'approche FFC Cambridge dans laquelle le titane métallique est produit sur la cathode dans un électrolyte (généralement CaCl_2) par élimination de l'oxygène (réduction au niveau de la cathode), comme on le voit sur les Figure 0.1 et Figure 0.2. Cette technique permet la production directe d'alliages tels que Ti-6Al-4V à un coût qui pourrait être inférieur au procédé Kroll conventionnel. Il est possible de générer une poudre sphérique directement à partir du procédé FFC. Le procédé permet la production de particules de 100 μm de diamètre, et il existe un programme de développement actif pour abaisser ce niveau aux niveaux requis pour la FA.

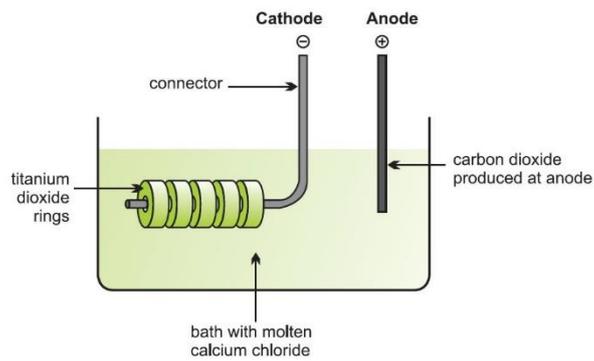
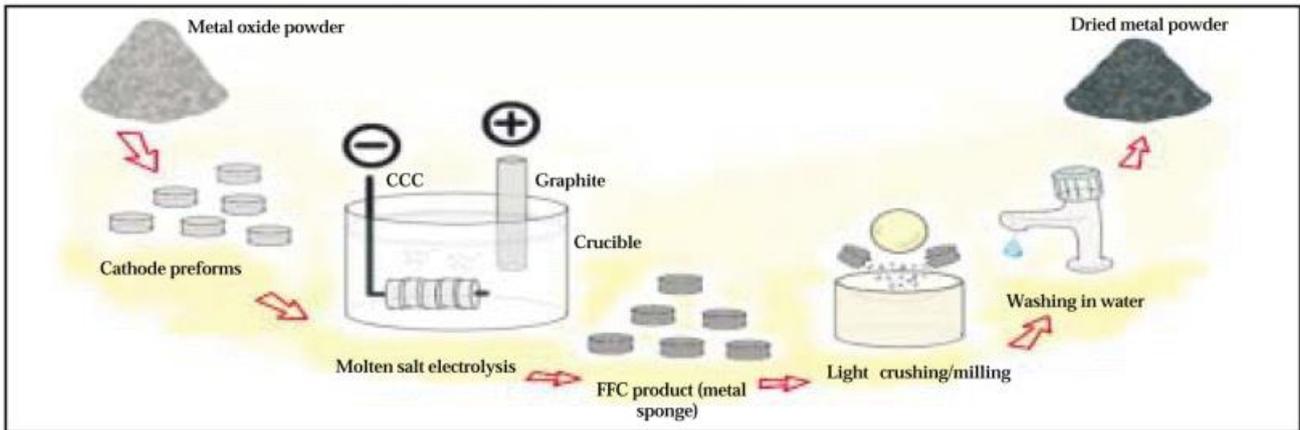


Figure 0.1 Schéma du procédé FCC Cambridge (1)

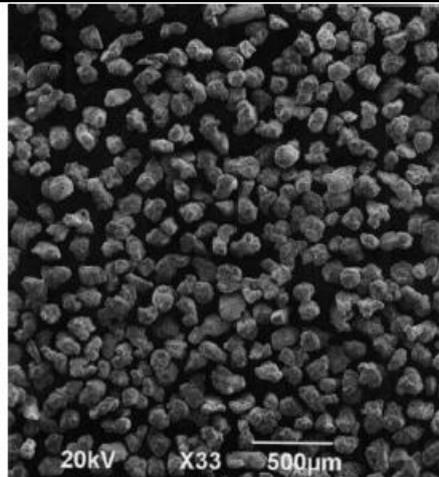


Figure 0.2 Image MEB de la poudre Ti-6Al-4V obtenue par électrolyse dans du CaCl₂ fondu à 950 °C. Remarquons la distorsion de la morphologie sphérique (procédé FCC Cambridge)

Le procédé ITP / Armstrong est représenté schématiquement sur la figure 2.3 et un exemple de la poudre produite sur la Figure 0.3. Un autre exemple de poudre angulaire produite par ITP Armstrong et HDH est illustré aux Figure 0.4 et Figure 0.5 respectivement.

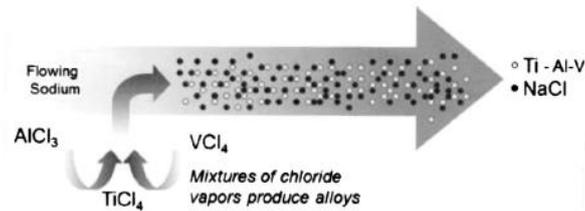


Figure 0.3 Schéma du processus ITP / Armstrong. Ce processus est prétendu être continu, avec une efficacité de réaction de 100%, à basse température, à faible capital, à faible coût de main-d'œuvre et peut produire directement des alliages tels que Ti-6Al-4V.

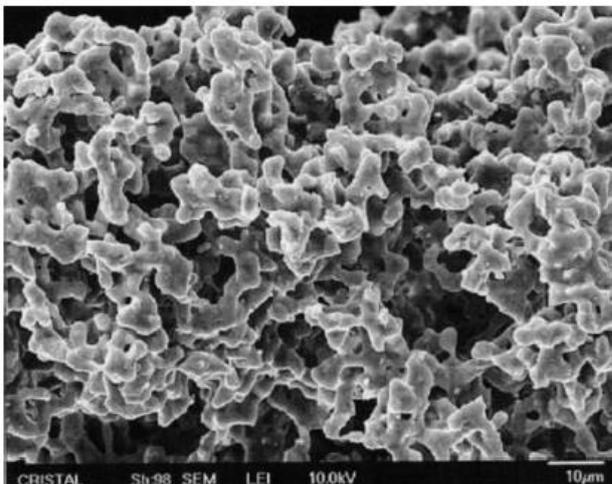


Figure 0.4 Photomicrographie de poudre de Ti-6Al-4V angulaire produite par le procédé ITP / Armstrong.

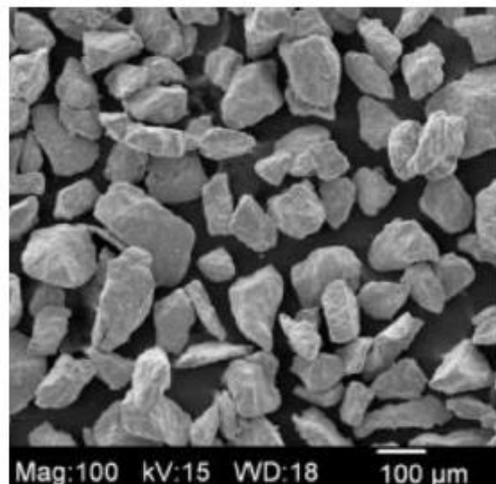
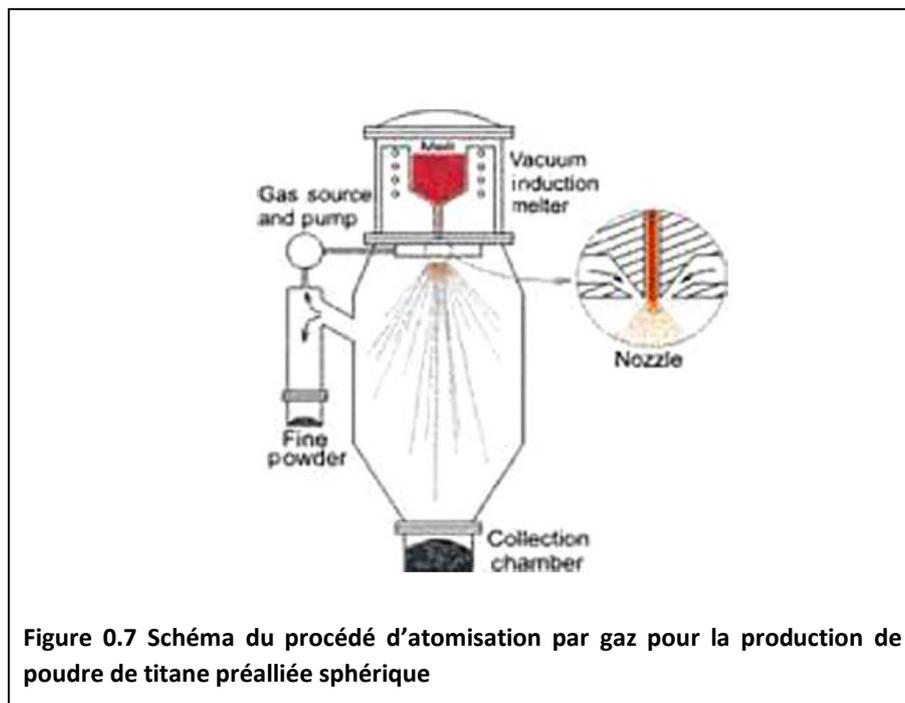
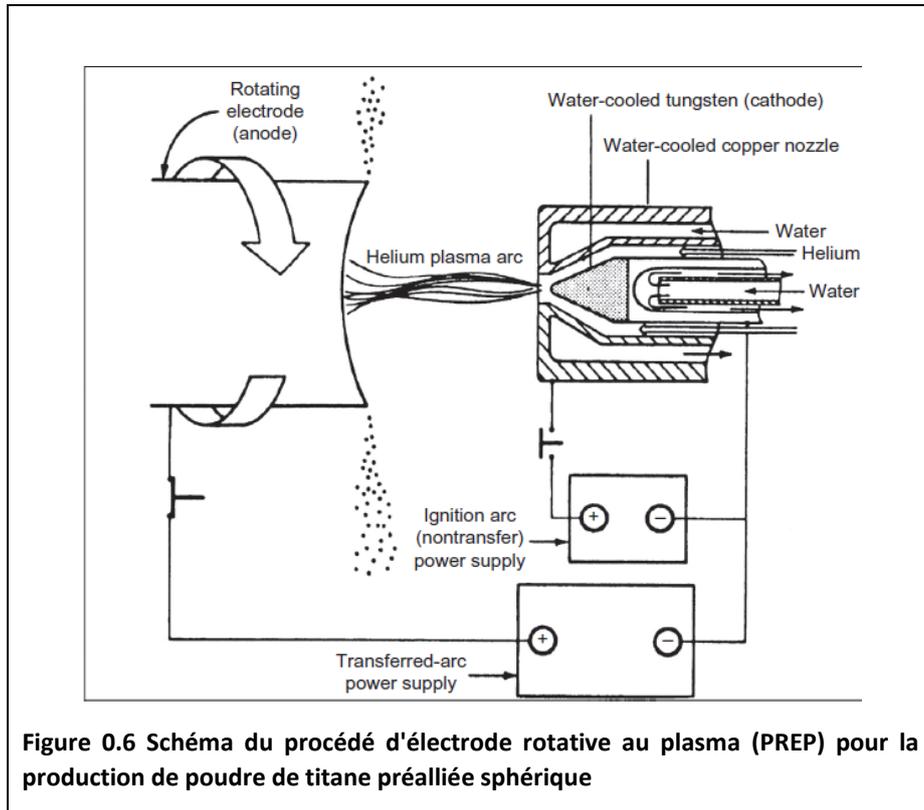


Figure 0.5 Poudre irrégulière Ti-6Al-4V d'hydrure déshydrure

2.2.2 Poudre sphérique préalliée

Il existe un certain nombre de procédés qui produisent de la poudre de titane sphérique préalliée (voir les Figure 0.6 et Figure 0.7 pour des exemples), avec une augmentation récente du nombre car l'intérêt pour le titane dans FA s'est considérablement développé.



Une liste des fournisseurs les plus présents dans cette industrie est présentée ci-dessous :

1. ATI Powder Metals

Poudre d'alliage atomisée par gaz, sphérique, (45-150 μ m), avec une grande capacité de production .

2. Advanced Speciality Metals.

Procédé d'électrode rotative à plasma (PREP), poudre sphérique (45-150 μ m).

3. Raymor

Poudre atomisée par plasma, sphérique, (30-250 μ m), qualité régulière, faible teneur en oxygène (0,13-0,20% O₂)

4. Baoji Orchid Titanium.

Procédé d'électrode rotative à plasma ,PREP sphérique, (45-210 μ m), (0,13 % O₂)

5. Sumitomo Sitex.

Poudre d'alliage atomisée par gaz (0,08-0,13% O₂).

6. TLS Technik.

Poudre d'alliage atomisée par gaz, (53-150 μ m) ,(0,13% O₂).

7. Le processus de sphéroïdisation au plasma par induction Tekna convertit les poudres de titane irrégulières à une morphologie sphérique. La poudre irrégulière de (37 -150 μ m) est convertie en une poudre sphérique de même taille (mais avec une amélioration de la densité de prise et du débit) (voir la Figure 0.9).

La matière d'alimentation est injectée axialement au centre de la décharge en utilisant une sonde d'injection refroidie à l'eau avec une quantité appropriée de gaz porteur / diluant. Lorsque les particules individuelles de la matière d'alimentation sont chauffées et fondues dans le plasma, elles forment des gouttelettes de métal fondu denses parfaitement sphériques qui refroidissent et se solidifient lorsqu'elles tombent par gravité au fond de la chambre de traitement. Les poudres traitées sont récupérées au fond de cette enceinte, tandis que les gaz de plasma et les éventuelles vapeurs ou poudres ultrafines émergent d'un orifice latéral et sont dirigés vers un filtre métallique fritté. Du filtre, les gaz sont dirigés vers le système de pompage à vide et d'échappement.(Figure 0.8)

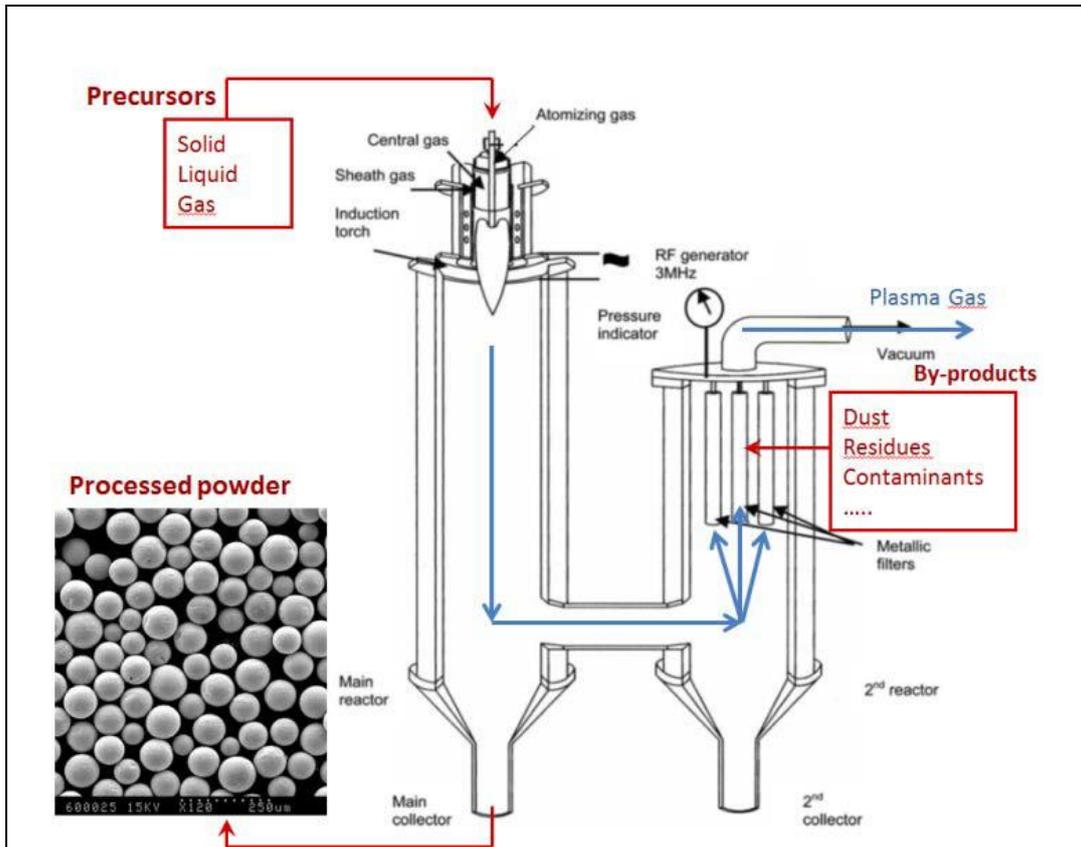


Figure 0.8 Processus de sphéroidisation Tekna

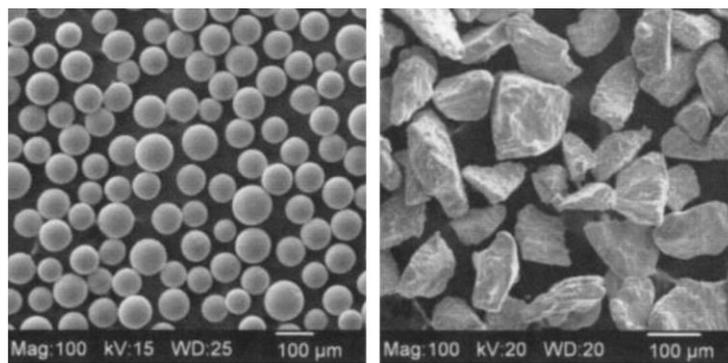


Figure 0.9 Photomicrographie MEB de poudre sphérique (à gauche) produite par traitement de poudre de titane HDH angulaire (à droite) en utilisant la technique Tekna.

8. Praxair Surface Technologies utilise l'atomisation de gaz haute pression à couplage étroit (Figure 0.10) pour produire de la poudre de titane sphérique fine en grande quantité, avec une gamme de tailles de poudre: pour PBF au laser (10-45 μm) et pour le PBF au faisceau d'électrons (45-150 μm). En outre, la flexibilité de la distribution granulométrique est assurée par le processus. (1)

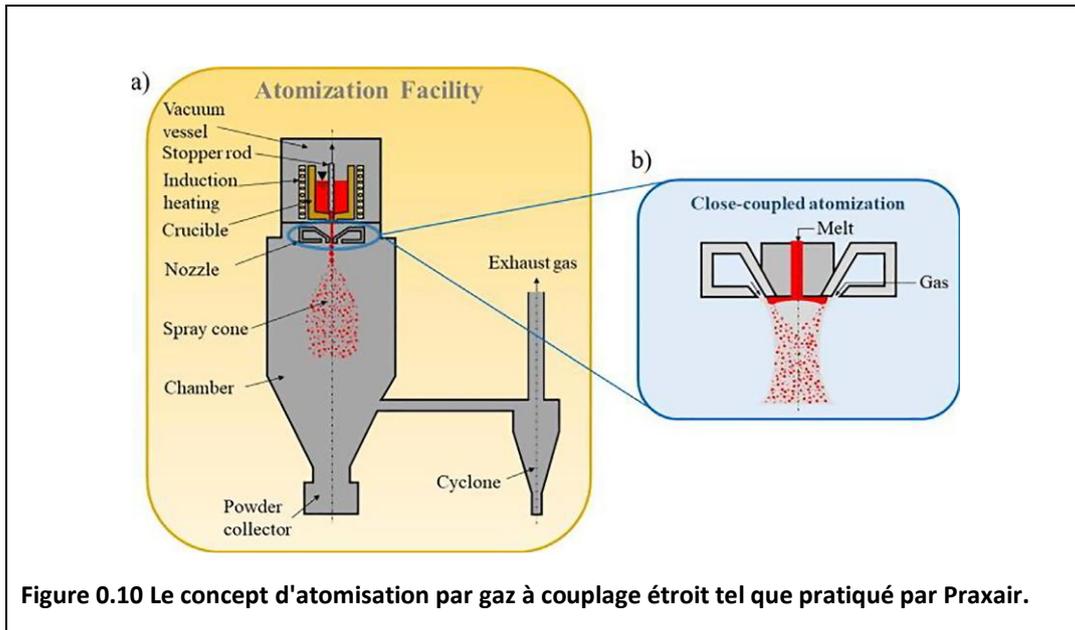


Figure 0.10 Le concept d'atomisation par gaz à couplage étroit tel que pratiqué par Praxair.

9. Technologie LPW qui produit de la poudre de titane atomisée par gaz. Leur installation de fabrication de poudres à la pointe de la technologie (Figure 0.11) propose de nouvelles gammes de poudres métalliques propres fabriquées exclusivement pour la FA. Conçus pour maîtriser le risque de contamination à chaque étape du processus, les systèmes accrédités qualité de LPW ajoutent une assurance pour les fabricants opérant dans des secteurs critiques pour la sécurité. Les poudres personnalisées peuvent être fournies avec une fluidité améliorée pour les plates-formes de machines FA « à flux critique », ou des poudres peuvent être produites avec des éléments résiduels plus faibles et des interstitiels contrôlés pour les applications exigeant des propriétés mécaniques améliorées. (1)

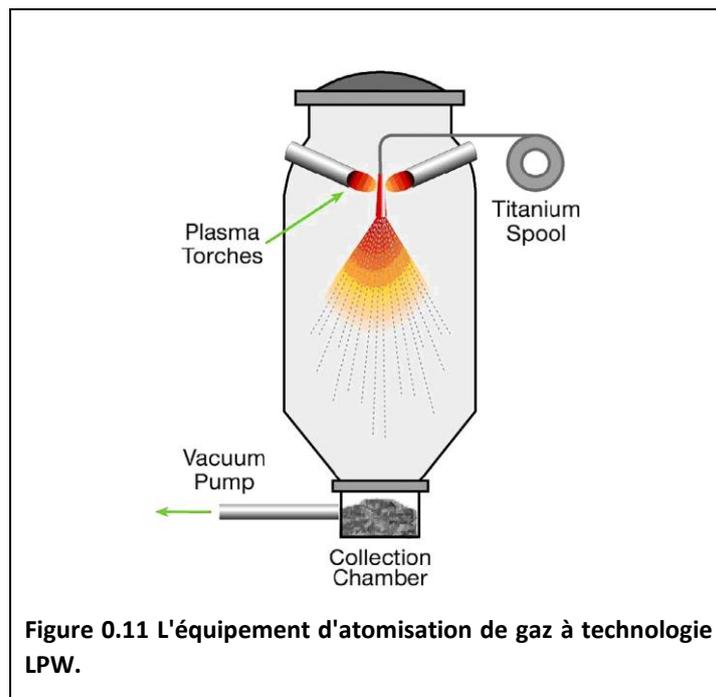
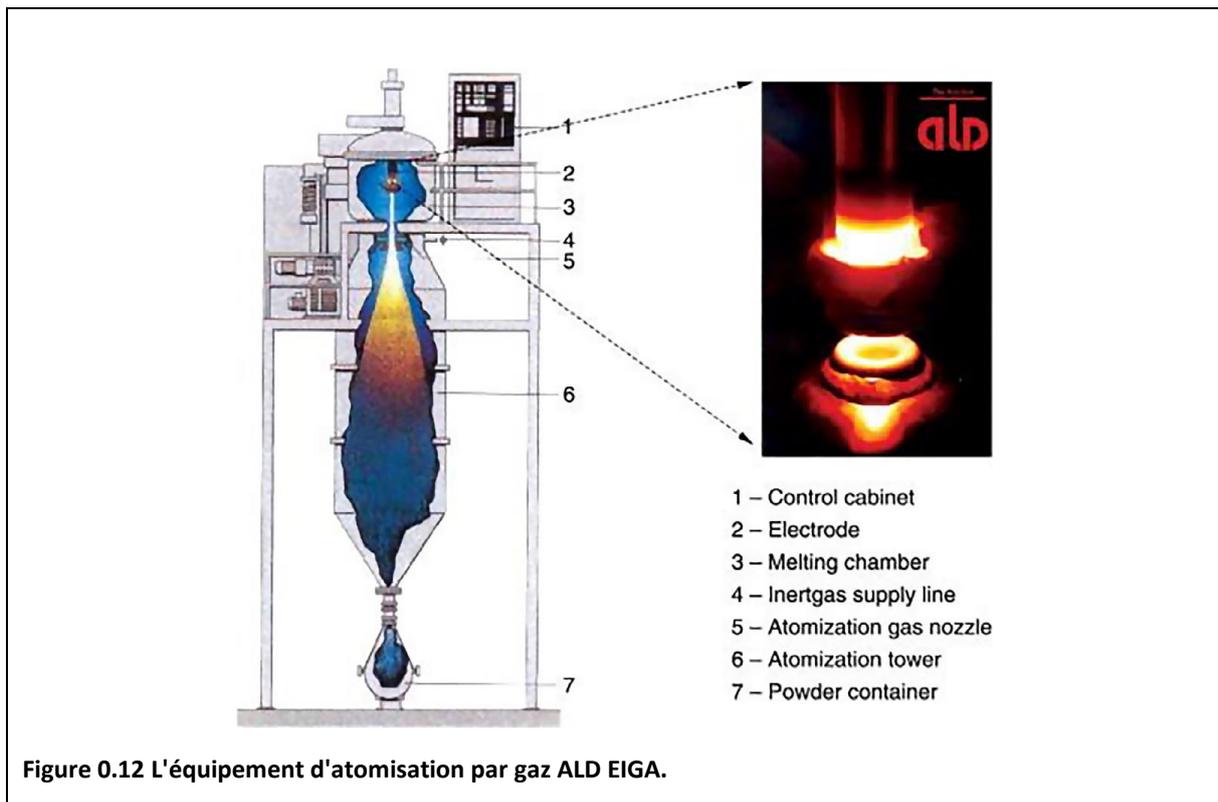


Figure 0.11 L'équipement d'atomisation de gaz à technologie LPW.

10. Hoeganaes utilise des équipements d'atomisation de gaz fabriqués par ALD désigné EIGA (Electrode Induction Gaz Atomization) (Figure 0.12). Ce procédé a été breveté comme un procédé alternatif de fusion et d'atomisation sans céramique pour produire des poudres de métaux précieux, réactifs, réfractaires et précieux de haute pureté. Aujourd'hui, EIGA est utilisé comme l'un des principaux processus pour la fabrication de haute qualité de poudres d'alliages de titane, zirconium, niobium et tantale. La conception du système EIGA est basée sur une électrode rotative orientée verticalement qui est fondue en continu à une extrémité d'une atmosphère de gaz inerte sans creuset en céramique en utilisant un mouvement contrôlé dans une bobine d'induction conique spéciale. La conception de la bobine d'induction et la fréquence du générateur sont optimisés pour obtenir la chaleur nécessaire, provoquant la chute de la masse fondue à une extrémité de l'électrode. Avec des contrôles appropriés, un flux continu de matière fondue tombe directement au centre d'une fente annulaire. Ensuite, le métal fondu est transformé avec une buse à gaz inerte en utilisant un courant de gaz à grande vitesse pour atomiser la masse fondue. La pulvérisation de microgouttelettes se solidifie en descendant la tour d'atomisation et forme des poudres fines de forme sphérique qui sont collectées dans un récipient à poudre étanche au vide.

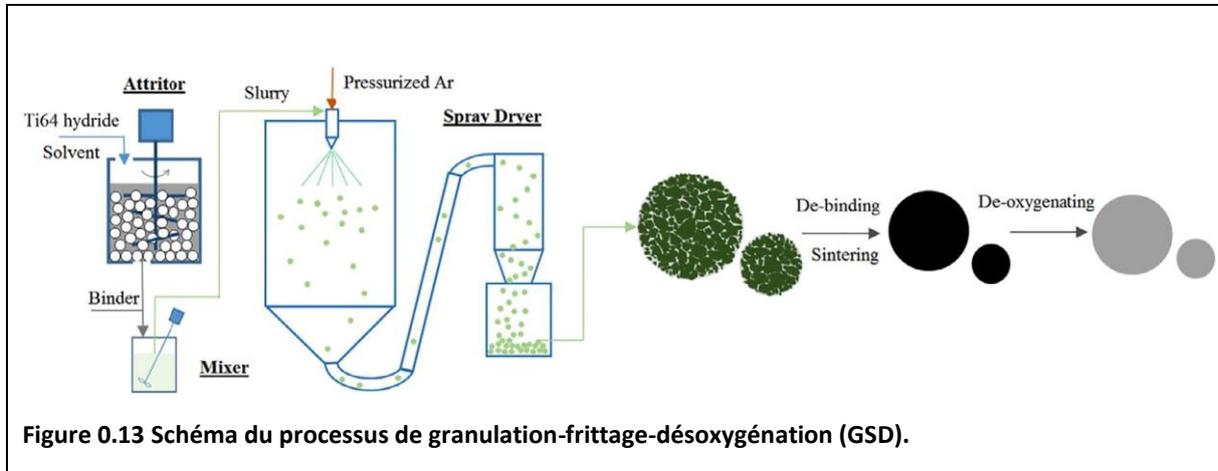


11. L'université de l'Utah a pu, quant à elle, produire une poudre de titane sphérique sans fusion, en utilisant du thermohydrogène (THP). Ce développement de la technique THP la production assistée par hydrogène d'une poudre de titane sphérique sans fusion à faible coût. La poudre montre une réduction à moins de 0,2 % en masse d'oxygène avec un coût inférieur de 50% à celui d'une poudre hydride déshydride conventionnelle. La Figure 0.13 représente le processus de fabrication de poudre sphérique de Ti-6Al-4V à partir de ferraille.

Le Ti-6Al-4V hydruré ou le matériau élémentaire mélangé est préparé en suivant les étapes suivantes:

1. Il est broyé à boulets dans un solvant pour réduire la taille des particules à <math><10\ \mu\text{m}</math>.

2. Un liant thermoplastique est ajouté pour faciliter la formation de granulés.
3. Le produit est séché par atomisation avec du gaz Ar pour former des granules sphériques d'hydru de Ti-6Al-4V.
4. Il est délié thermiquement, en utilisant un séparateur inorganique.
5. Enfin, la poudre sphérique frittée de Ti-6Al-4V est désoxydée avec du calcium ou du magnésium (avec une teneur en O₂ adaptée de l'ordre de 0,08 à 0,20% en poids).



2.2.3 Alimentation par fil

Deux procédés DED qui utilisent du fil métallique comme matière première sont SMD (Shaped Metal Deposition) brevetés par Rolls Royce Corp et développés conjointement avec l'Université de Cranfield ; et DM (Direct Manufacturing) commercialisés par Sciaky Inc. Ces deux procédés utilisent des fils de soudage standard spécifiés par les spécifications AWS et des tailles de jauge typiques d'environ 1,2 mm pour SMD / WAAM (1) et 0,9-4,0 mm pour DM (1). Selon AMS 4999A, la charge de fil pour le processus de dépôt de titane doit être un fil conforme à AWS A5.16 ERTi-5.

2.3 PROBLÈMES ET QUALIFICATION DES POUDRES DE TITANE POUR LA FABRICATION ADDITIVE

Comme indiqué précédemment, la majorité des technologies FA utilisent des poudres de titane ou de titane préalliée comme matière première. Alors que la production de la poudre de titane a bien été standardisée au fil des ans, son utilisation réussie en FA nécessite un contrôle étroit du processus de production de poudre et de la manipulation de la poudre. Ci-dessous certains facteurs clés liés à la matière première en poudre, qui influencent la qualité des pièces de FA sont cités. Les détails des techniques de caractérisation pouvant être utilisées pour les technologies de fabrication additive peuvent être trouvés ailleurs. (1)

1. Taille (et distribution de taille) : Dans la fabrication additive, la taille des particules de poudre détermine l'épaisseur minimale de la couche de la pièce, ainsi que les tailles minimales des éléments réalisables sur une pièce et la finition de surface dans l'état de fabrication. De plus, la distribution granulométrique des poudres joue également un rôle dans la densité de tassement pour les technologies PBF. En général, les technologies PBF utilisent des tailles de poudre allant de 20 à 40 µm, tandis que les technologies DED utilisent des tailles de poudre allant de 45 à 150 µm.

2. Morphologie de la poudre : Selon le processus de production de la poudre, les poudres peuvent avoir diverses morphologies, y compris aciculaire, en flocons, granulaire, irrégulière, aiguille, nodulaire, plaquettaire, en plaques et sphérique. La morphologie de poudre préférée pour la FA est la forme sphérique et sans aucune irrégularité. La morphologie des particules de poudre détermine la densité de compactage de la poudre et, par conséquent, joue un rôle majeur dans les technologies PBF (1). La densité de compactage déterminera finalement l'épaisseur de la couche et le retrait dans les processus PBF. Bien que la morphologie de la poudre soit moins critique dans le DED, il est néanmoins important de maintenir un débit de poudre constant et par conséquent, une géométrie sphérique ou quasi sphérique est fortement recommandée.

3. Composition chimique : La composition chimique des poudres joue un rôle majeur car la chimie des matières premières détermine la chimie et les propriétés de la pièce finale. Le comité ASTM F42, responsable du développement des normes de FA, a publié des spécifications chimiques pour la plupart des deux alliages Ti couramment utilisés, à savoir les alliages Ti-6Al-4V et Ti-6Al-4V-ELI (avec une très faible concentration en éléments interstitiels) pour Processus PBF. Il est à noter que la présente norme n'exige que la conformité chimique pour la partie terminale et permet une variation chimique sous forme de poudre afin de s'adapter aux divers procédés. Il est à noter que les techniques de FA impliquant la fusion par faisceau d'électrons fonctionne dans un environnement sous vide et conduit par conséquent à la perte d'éléments, tels que Al. Par conséquent, la matière première brute, telle que la poudre de Ti6-Al4-V pour les procédés à base de faisceaux d'électrons, utilise souvent une quantité supplémentaire d'Al pour compenser les pertes pendant le traitement. La chimie des matières premières pour l'alliage Ti6-Al4-V pour les procédés DED peut être trouvée dans la spécification AMS 4999A.

4. Débit : le débit de poudre est un paramètre critique pour des opérations de FA réussies. Qu'il s'agisse du revêtement dans les processus PBF ou des systèmes de distribution de poudre dans les processus DED, une épaisseur de couche constante dépend d'un flux de poudre bon et constant. La morphologie de la poudre et les caractéristiques de surface, y compris les contaminations de surface, peuvent affecter l'écoulement de la poudre. Dans le but d'obtenir un débit de poudre constant et renouvelable, la forme de poudre sphérique sans irrégularités ou les contaminations de surface sont les caractéristiques préférées des poudres en FA.

5. Densité de la poudre : La densité de la poudre est un facteur important en FA. Les poudres creuses avec ou sans piégeage de gaz peuvent provoquer des effets de porosité dans la partie d'extrémité et entraîner une propriété de pièce inférieure. Les poudres entièrement denses sont donc fortement recommandées pour la FA.

6. Manipulation et contamination de la poudre : Comme indiqué précédemment, la contamination de la poudre peut provoquer des impuretés dans la pièce finale et affecter les propriétés. Il est essentiel de faire preuve de prudence lors de la manipulation de la poudre pendant le transfert vers la trémie de poudre dans les machines ou pendant le tamisage, etc....

7. Effet de l'humidité : L'humidité joue un rôle majeur en FA. L'humidité sur la surface des particules de poudre peut provoquer la formation de porosité dans la pièce. Par conséquent, il est essentiel de stocker la poudre dans des endroits secs. Si possible, un séchage de la poudre avant utilisation est fortement recommandé.

8. Effet du recyclage des poudres : Le recyclage des poudres est un facteur très important dans les procédés de FA. Tous les procédés PBF n'utilisent qu'une partie de la poudre placée sur la plaque de

construction et par conséquent, le recyclage de la poudre est obligatoire pour le fonctionnement économique de ces procédés.

Même si tout le traitement du titane est effectué dans un environnement inerte ou une atmosphère sous vide, les poudres sont exposées aux effets thermiques des constructions à couches multiples et peuvent avoir des pertes chimiques. Les normes ASTM F2924-14 et 3001-14 ne limitent pas l'utilisation de la poudre à un nombre spécifique de constructions et recommandent de suivre les directives d'équipement spécifiques à cet effet.

Tang & al. ont entrepris une étude approfondie pour évaluer l'effet de la réutilisation de la poudre lors de la fusion par faisceau d'électrons (EBM) des alliages Ti-6Al-4V. Leurs résultats indiquent que la morphologie de la poudre passe d'une poudre lisse, sphérique à une poudre rugueuse, irrégulière après environ 21 cycles. Ce changement de morphologie de la poudre entraîne des changements de densité de prise de poudre (de 2,96 à 2,88 g / cm³) et améliore la fluidité (de 32,47 à 28,34 s / 50g). L'amélioration du débit de poudre pendant le recyclage est attribuée à la réduction de densité. Au cours de ce processus de recyclage, la chimie de la poudre a également été affectée, tandis que la teneur en V a légèrement changé, la teneur en Al de la poudre est passée de 6,47% dans la poudre vierge à 6,35% après 21 recyclages et, en conséquence, dans les échantillons d'essai de 6,14% à 5,93%. La perte de teneur en Al est due à la vaporisation d'Al à basse pression partielle (2×10^{-2} Pa de He). Le recyclage de la poudre est également associé à une augmentation de la teneur en oxygène de 0,08% en poudre (0,07% dans l'échantillon à tester) dans la poudre vierge à 0,19% en poudre (0,18% dans l'échantillon à tester) après 21 recyclages. La manipulation répétée de la poudre et l'exposition à l'air pendant le recyclage provoquent cette reprise d'oxygène supplémentaire dans la poudre. En conséquence, la résistance à la traction est passée de 920 à 1039 MPa, la limite d'élasticité est passée de 834 à 960 MPa et l'allongement à la traction a chuté de 16% à 15,5%. Dans d'autres travaux utilisant l'équipement Realizer PBF sur 10 essais répétés, la teneur en oxygène du Ti-6Al-4V s'est avérée augmenter de 0,16 à 0,18% en masse, comme le montre la Figure 0.14.

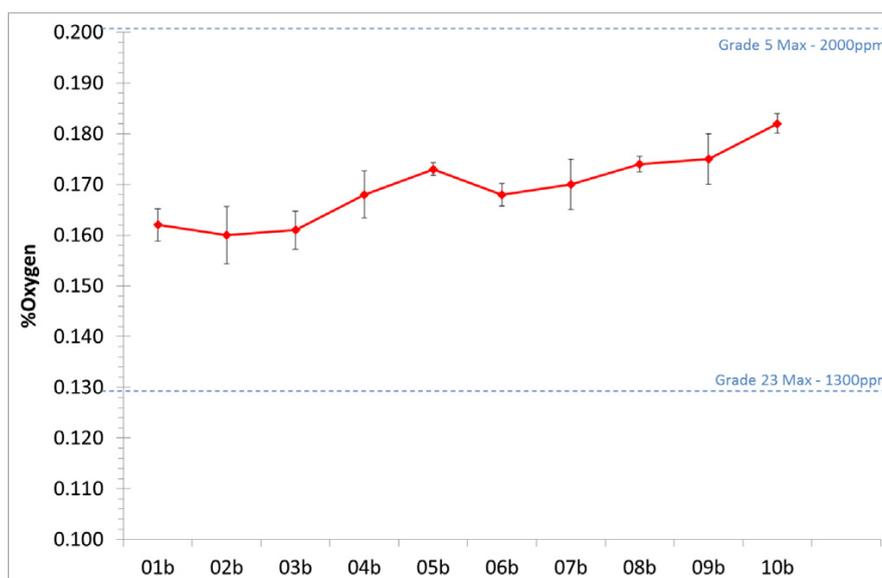


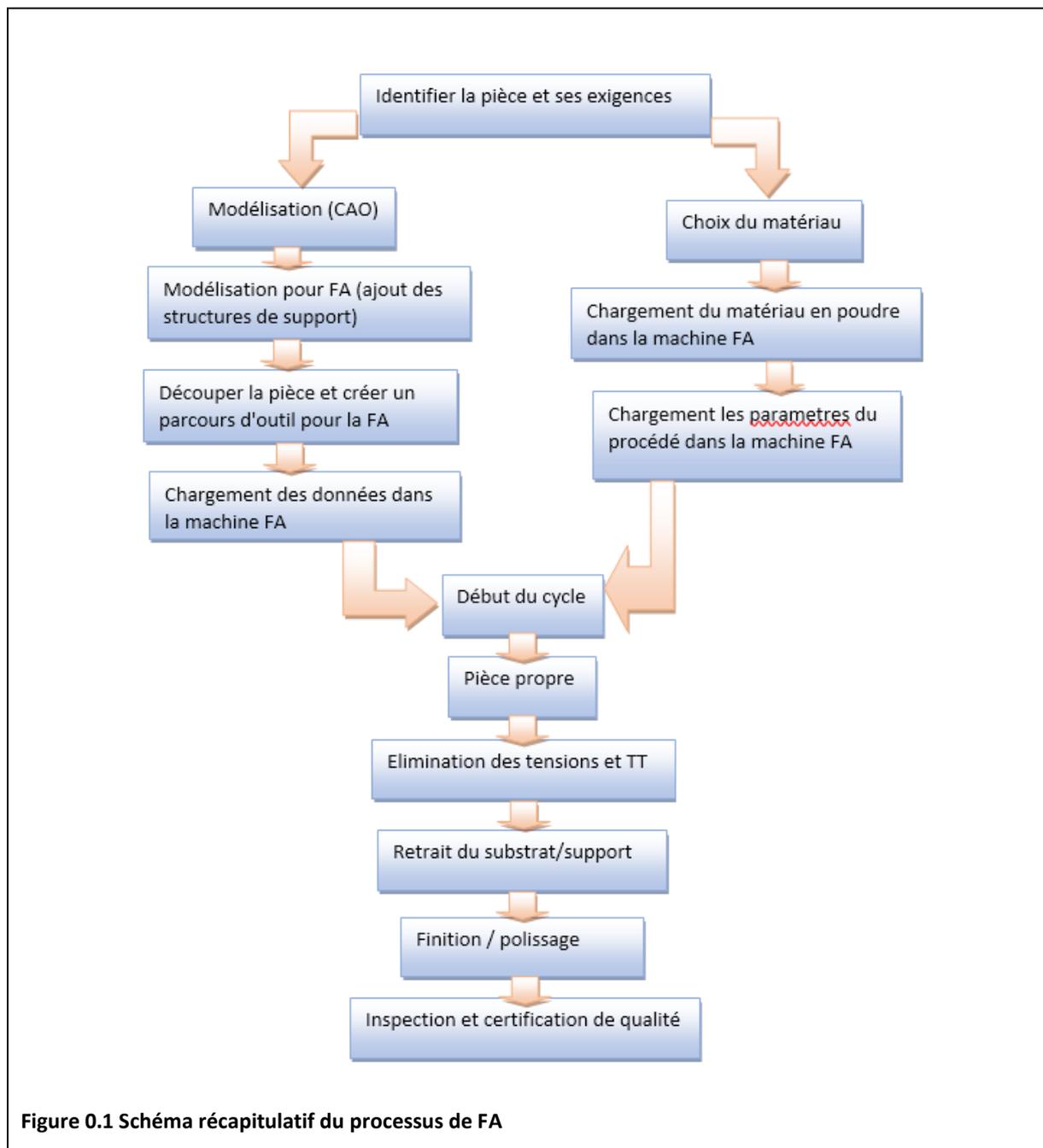
Figure 0.14 Effet des passages répétés à travers l'équipement de fusion sur lit de poudre du PBF Realizer sur la teneur en oxygène du Ti-6Al-4V. (1)

CHAPITRE III :
PROCESSUS DE FABRICATION ADDITIVE DU
TITANE

CHAPITRE III : PROCESSUS DE FABRICATION ADDITIVE DU TITANE

3.1 Introduction

La Figure 0.1 montre l'organigramme d'un processus typique de fabrication additive (FA). Cela commence par la sélection de la pièce et la détermination de ses exigences. Une fois que cela a été accompli, le processus de conception commence par la création du fichier CAO, puis du parcours d'outil FAO pour l'équipement de FA. À l'autre extrémité du processus, les exigences de propriété données pour le matériau de construction approprié de la pièce (sous forme de poudre ou de fil) sont identifiées et les paramètres de processus de FA appropriés sont sélectionnés et téléchargés dans la machine. La pièce est construite en couche par couche suivant une couche à la fois. (1)



Une fois le processus terminé, la pièce est nettoyée, soulagée des contraintes ou traitée thermiquement selon les spécifications de la pièce, le substrat et / ou les structures de support sont retirés, fini usiné selon les spécifications du dessin, inspecté pour la conformité et prêt à l'emploi (Fig. 3.1). Cette section aborde d'abord la conception et la création du parcours d'outil informatique et est suivie d'une discussion sur diverses technologies de FA pour le traitement du titane, avec un accent principal sur deux technologies : la fusion sur lit de poudre (PBF) et le dépôt d'énergie dirigée (DED), suivi de la consolidation par ultrasons des composants FA en tôle.

3.2 Numerisation dans la fabrication additive

En principe, l'impression tridimensionnelle (3D) est basée sur la prise d'une géométrie 3D, son découpage en plusieurs couches et la création d'un parcours d'outil qui trace la pièce couche par couche, une couche à la fois. L'impression 3D des métaux a ses racines dans le processus stéréolithographique, inventé par 3D Systems. La stéréolithographie est basée sur un format de fichier de surface, appelé STL (Standard Tessellation Language) et largement utilisée dans le prototypage rapide et la fabrication assistée par ordinateur. De nombreuses technologies d'impression 3D à base de métal utilisent des fichiers STL en entrée. Cependant, comme STL représente la surface triangulée non structurée brute par la normale unitaire et les sommets des triangles à l'aide d'un système de coordonnées cartésiennes 3D et ne contient aucune information d'échelle, ces fichiers peuvent ne pas convenir aux opérations complexes et aux applications de précision. Par conséquent, de nombreuses technologies FA utilisent des modèles solides comme entrée.

La refabrication et / ou le revêtement de surface à base des technologies de dépôt (DED) posent des défis supplémentaires car ils impliquent la création de couches 3D par opposition aux couches 2D qui nécessitent un logiciel à cinq ou six axes pour la création du parcours d'outil.

Dans les systèmes PBF, les pièces sont entièrement réalisées en une seule configuration. Par conséquent, une bonne orientation de la géométrie de la pièce est une étape critique. En outre ces systèmes reposent également sur des structures de support pour la construction de surplombs et la conception de la structure de support appropriée est un élément essentiel pour le succès du processus (1). Divers logiciels, tels que Magics de Materialise, sont disponibles et dédiés à la stratégie d'orientation des pièces et à la construction de structures de support pour les systèmes PBF (1) et le DM3D pour le DMD (1). Une fois la pièce construite, les structures de support sont usinées à partir de la pièce.

Technologie de fabrication de pièces

Comme mentionné dans le chapitre 1, La fabrication additive (FA) des alliages de titane, l'ASTM classe les technologies FA en un large groupe de sept catégories : projection de liant, dépôt d'énergie dirigé (DED), extrusion de matériau, projection de matière, PBF, stratification de matériau en feuilles, et polymérisation en cuve. Sur ces sept catégories, seules quatre impliquent le traitement du métal : DED, PBF, stratification de matériau en feuille et jet de liant, et seuls les trois premiers de ces quatre ont été utilisés pour le traitement du titane et de ses alliages, l'accent étant principalement mis sur les technologies PBF et DED (Tableau 0.1). Il existe plusieurs technologies dans chaque catégorie, sous la marque de différents fabricants. Alors que les technologies PBF permettent la construction de caractéristiques complexes, de passages de refroidissement creux et de pièces de haute précision, celles-ci sont limitées par l'enveloppe de construction, un seul matériau par construction et la capacité de construction de couches horizontales. En comparaison, les technologies DED offrent une enveloppe

de construction plus grande et un taux de dépôt plus élevé, tandis que leur capacité pour construire des passages de refroidissement creux et une géométrie plus fine est limitée. Les technologies DMD et LENS offrent également la possibilité de déposer plusieurs matériaux en une seule construction et la possibilité d'ajouter du métal sur les pièces existantes.

Les technologies FA disponibles dans le commerce sont basées sur trois types de sources de chaleur : laser, faisceau d'électrons et arc TIG, dans le but de faire fondre la matière première (poudre ou fil). Les systèmes laser fonctionnent sous atmosphère inerte (pour le traitement du titane) contrairement à l'environnement sous vide des systèmes de faisceaux d'électrons. Bien que les systèmes à vide soient plus chers, ils offrent l'avantage de faibles contraintes résiduelles par rapport aux systèmes à base de laser et les pièces traitées par faisceau d'électrons peuvent être utilisées sans aucune opération de relaxation des contraintes.

L'effet de la source de chaleur sur la microstructure et les propriétés mécaniques est discuté plus en détail au chapitre 4, Microstructure et propriétés mécaniques.

Tableau 0.1 Diverses technologies FA pour le traitement du titane et de ses alliages (1) (1) (1) (1)

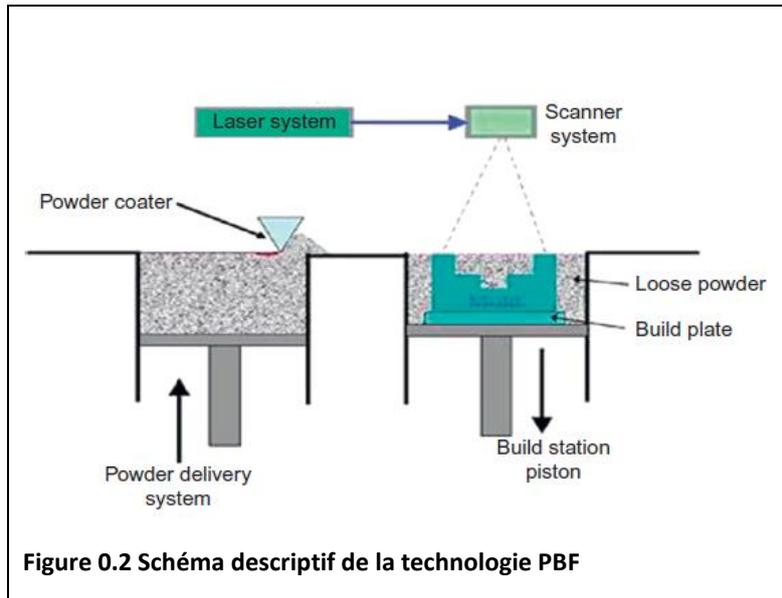
Catégorie FA	Technologie	Entreprise	Description
Dépôt d'énergie dirigée (DED)	Dépôt de métal direct (DMD)	DM3D Technology LLC (POM Group)	Utilise le laser et la poudre métallique pour la fusion et le dépôt à l'aide d'un procédé breveté en boucle fermée
	Laser engineered net shaping (LENS)	Optomec, Inc.	Utilise le laser et la poudre métallique pour la fusion et le dépôt
	Fabrication direct (DM)	Sciaky, Inc.	Utilise un faisceau d'électrons et un fil métallique pour la fusion et le dépôt
	Fabrication additive par fil d'arc (WAAM)	Rolls Royce Plc.	Utilise l'arc électrique et le fil métallique pour la fusion et le dépôt
Poudre en lit de fusion (PBF)	Frittage sélectif par laser (SLS)	3D Systems Corp.	Utilise le laser et la poudre métallique pour le frittage et le collage
	Frittage métallique direct par laser (DMLS)	EOS GmbH	Utilise le laser et la poudre métallique pour le frittage, la fusion et le collage
	Fusion par laser (LM)	Renishaw Inc.	Utilise le laser et la poudre métallique pour la fusion et le collage

	Fusion sélective par laser (SLM)	SLM Solutions GmbH	Utilise le laser et la poudre métallique pour la fusion et le collage
	LaserCUSING	Concept Laser GmbH	Utilise le laser et la poudre métallique pour la fusion et le collage
	Fusion par faisceau d'électrons (EBM)	Arcam AB	Utilise un faisceau d'électrons et de la poudre métallique pour la fusion et le collage
Stratification de matériau en feuille	Consolidation par ultrasons (USC)	Fabrisonic	Utilise l'énergie ultrasonique pour consolider les feuilles métallique et faire des pièces

3.2.1 Fusion sur lit de poudre

Les technologies PBF sont basées sur les principes de la pose d'une couche de poudre métallique sur la plate-forme de fabrication et balayage du lit de poudre avec une source de chaleur, telle qu'un laser ou un faisceau d'électrons, qui fait fondre partiellement ou complètement la poudre sur le trajet du faisceau ainsi que la resolidification et la liaison de la poudre au fur et à mesure qu'elle refroidisse. Le traçage des trajectoires d'outil couche par couche est régi par les données CAO de la pièce en cours de fabrication. La Figure 0.2 montre un schéma expliquant les étapes impliquées dans ce processus.

- Un substrat est fixé sur la plate-forme de construction.
- La chambre de fabrication est remplie de gaz inerte (pour le traitement au laser) ou évacuée (pour le traitement par faisceau d'électrons) pour réduire le niveau d'oxygène dans la chambre au niveau souhaité.
- Une fine couche de poudre métallique (20-200 μm d'épaisseur selon la technologie et l'équipement) est déposée sur le substrat et nivelée à une épaisseur prédéterminée à l'aide d'un mécanisme de nivellement.
- Le laser ou le faisceau d'électrons balaye la surface du lit de poudre en suivant le parcours d'outil pré-calculé à partir des données CAO du composant en cours de construction.
- Le processus ci-dessus est répété pour les couches suivantes jusqu'à ce que la réalisation (construction) soit terminée.



3.2.2 Dépôt d'énergie dirigé

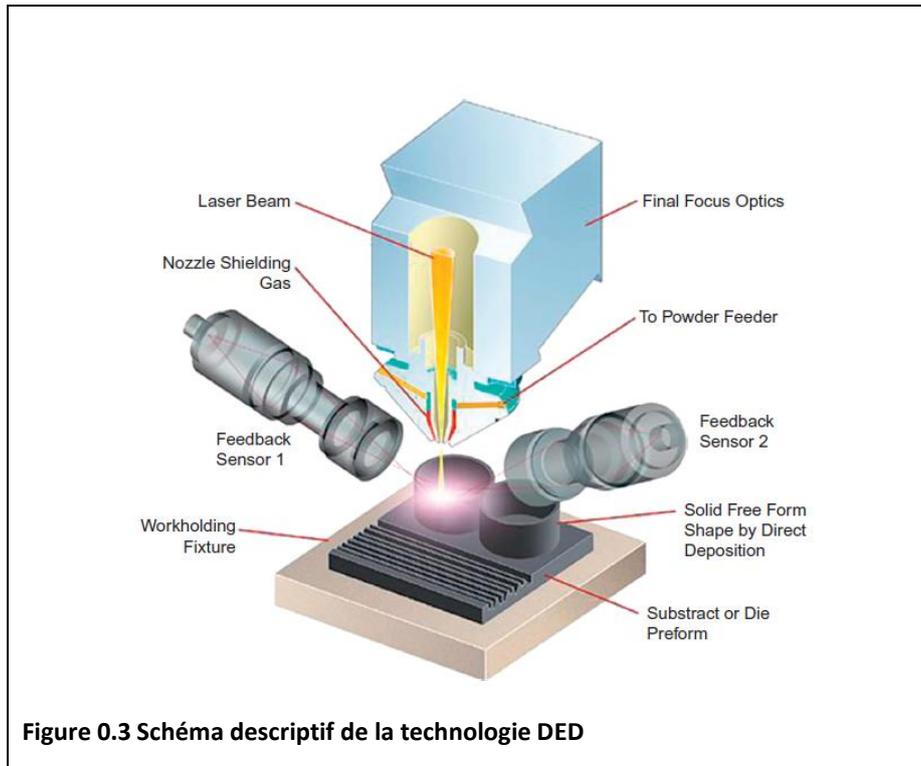
Les technologies DED utilisent l'injection de matière dans le bain de fusion au lieu du balayage sur lit de poudre (spécification AMS 4999A pour Ti-6Al-4V).

La Figure 0.3 montre un schéma de la technologie DMD (dépôt de métal par laser). Les étapes du processus pour le DED sont :

- Un substrat ou une pièce existante est placé sur la table de travail.
- Similaire au PBF, la chambre de la machine est fermée et remplie de gaz inerte (pour le traitement laser) ou évacuée (pour le traitement par faisceau d'électrons) pour réduire le niveau d'oxygène dans la chambre au niveau souhaité. Le procédé DMD offre également un blindage local et ne nécessite pas de chambre à gaz inerte pour les métaux moins réactifs que le titane, tels que les aciers, les alliages Ni, etc.
- Au début du cycle, la buse de traitement avec un laser concentrique ou un faisceau d'électrons est focalisée sur la surface de la pièce pour créer un bain de fusion.

La distribution de matière se fait sous forme de poudre à travers une buse coaxiale (pour laser) ou à travers un fil métallique avec une distribution latérale (pour faisceau d'électrons). La buse se déplace à une vitesse constante et suit un parcours d'outil prédéterminé créé à partir des données CAO. Lorsque la buse s'éloigne, le bain de fusion se solidifie en formant une couche de métal.

- Les couches successives suivent le même principe et construisent la pièce couche par couche jusqu'à la fin.



3.3 Autres processus fabrication additive

Parmi les autres procédés de fabrication additive dans la catégorie de stratification de feuilles, le procédé de fabrication additive par ultrasons (UAM) a été appliqué pour traiter des composants contenant du titane et de l'aluminium.

Le processus UAM consiste à construire des objets métalliques solides par soudage par ultrasons d'une succession de bandes métalliques en une forme 3D, avec des opérations d'usinage périodiques pour créer les caractéristiques détaillées de l'objet résultant. La Figure 0.4A montre un système de soudage par ultrasons à roulement, constitué d'un transducteur à ultrasons, d'un servomoteur, d'un pavillon (de soudage) et d'un servomoteur « factice ». Les vibrations du transducteur sont transmises, à travers la section de servomoteur, à la corne de soudage en forme de disque, qui à son tour crée une soudure à l'état solide par ultrasons entre les rubans métalliques fins et la plaque de base. Le roulement continu de la corne sur la plaque soude la bande entière à la plaque. C'est la pierre angulaire essentielle de l'UAM. Il est à noter que le « cornet » représenté sur la Figure 0.4A est une seule pièce solide de métal qui doit être conçue acoustiquement, de sorte qu'elle résonne à la fréquence ultrasonore du système (typiquement à 20 kHz).

En soudant une succession de bandes, d'abord côte à côte pour créer une couche, puis l'une au-dessus de l'autre (mais décalées à la manière de briques dans un mur pour que les joints ne se chevauchent pas), un composant 3D est fabriqué. Pendant la construction, des opérations d'usinage périodiques ajoutent des caractéristiques à la pièce, par exemple la fente de la Figure 0.4B, enlèvent l'excès de ruban et rectifient la surface supérieure pour l'étape suivante des soudures. Ainsi, dans ce cas, la soi-disant « FA » implique à la fois des étapes additives et soustractives pour arriver à une forme finale de pièce.

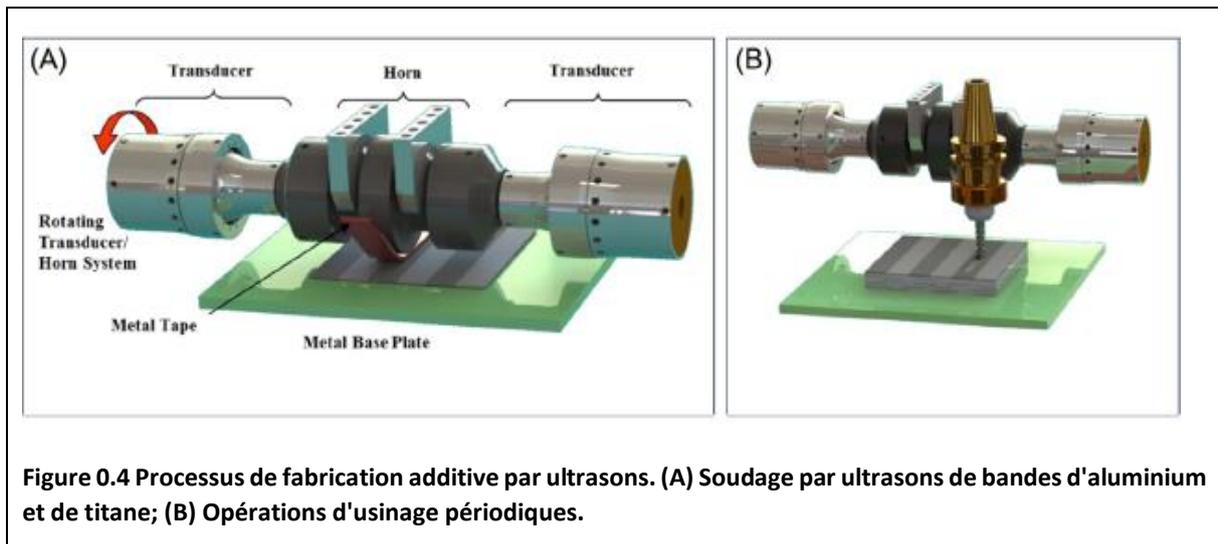


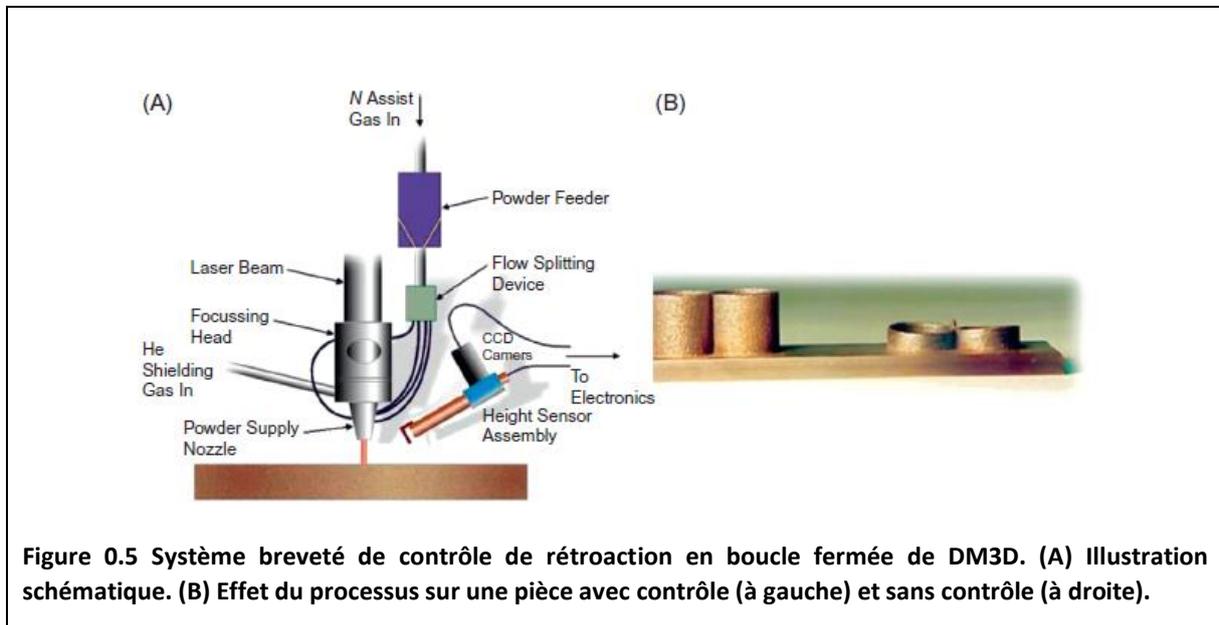
Figure 0.4 Processus de fabrication additive par ultrasons. (A) Soudage par ultrasons de bandes d'aluminium et de titane; (B) Opérations d'usinage périodiques.

3.4 *Contrôle des processus et surveillance in situ*

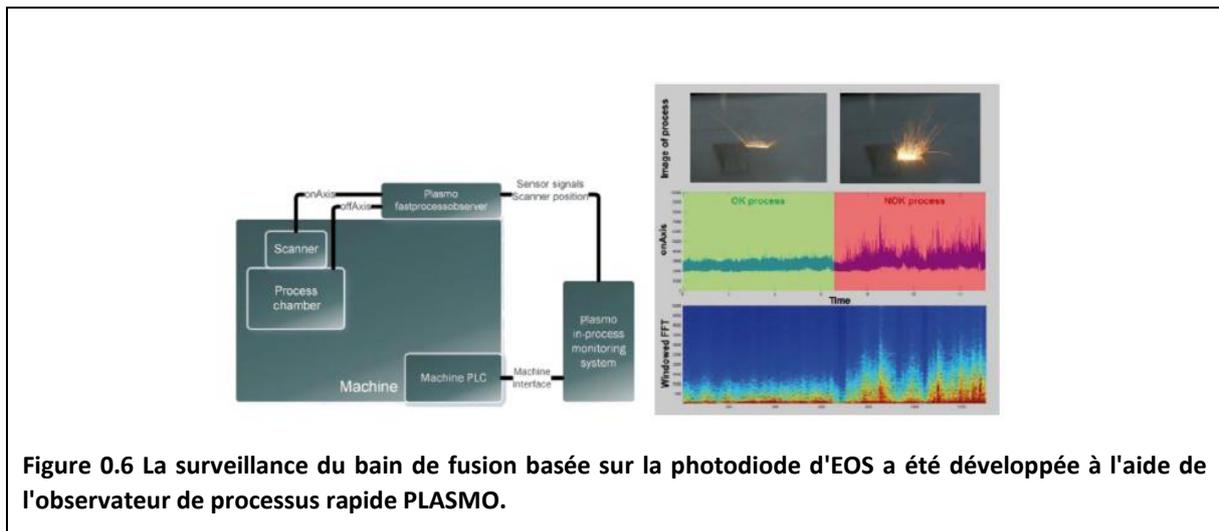
Tous les procédés FA impliquent un grand nombre de variables dont la puissance de la source de chaleur, la vitesse, la vitesse d'alimentation poudre / fil (épaisseur de la couche de poudre dans le cas des procédés PBF), le chevauchement des chemins adjacents, les débits de gaz, etc. Une variation ou une fluctuation d'une quelconque ou d'une combinaison de ces variables peut affecter le processus de fabrication et entraîner une mauvaise qualité des pièces. Il est donc essentiel de pouvoir surveiller et éventuellement contrôler le maximum de variables possibles pour détecter et éviter les défauts de la pièce. Ces dernières années, on a beaucoup insisté sur le contrôle et la surveillance des processus in situ pendant le processus de montage. En général, toutes les variables de surveillance et de contrôle du processus peuvent être classées dans quatre grandes catégories :

1. Surveillance de l'état de la machine : divers OEM pour la technologie PBF développent la surveillance et le contrôle des processus (tels que QMatmosphere de Concept Laser ou EOSTATE d'EOS) en surveillant l'état de la machine, la couche de poudre et le bain de fusion. La surveillance de l'état de la machine implique des paramètres tels que la teneur en O₂ dans la chambre, les filtres à gaz, la température à l'intérieur de la chambre de fabrication.
2. Alimentation en poudre ou surveillance de l'épaisseur de la couche de poudre : Depuis tous les FA les processus sont basés sur le concept de la fabrication par couches, un contrôle précis de l'épaisseur des couches est un élément essentiel du contrôle des processus. La surveillance du débit de poudre dans les systèmes DED est quelque peu triviale et indirectement effectuée par la surveillance et le contrôle des régulateurs du système de distribution de poudre. Par exemple, le procédé DMD repose sur la distribution de poudre à travers un arbre d'alimentation en poudre rotatif et un moteur électrique de contrôle de rétroaction régule le débit d'alimentation en poudre vers le bain de fusion. Cependant, toute variation du système de distribution de poudre au bain de fusion ne sera pas enregistrée dans ce processus. En revanche, les systèmes PBF ont incorporé des systèmes d'inspection des couches de poudre après revêtement pour chaque couche. Ceci implique l'acquisition d'images en lumière visible de l'ensemble du lit, dans lesquelles les non-uniformités apparaissent comme des éléments contrastés. Si une anomalie est détectée, le processus de revêtement de poudre est répété pour assurer une distribution uniforme de la poudre dans tout le lit de poudre.

3. Surveillance du bain de fusion : détection directe du bain de fusion par une photodiode ou un pyromètre ou une surveillance par caméra fournit des informations sur l'interaction entre la source de chaleur et le métal en poudre. La technologie DM3D utilise une technologie brevetée de contrôle de rétroaction en boucle fermée qui utilise des caméras CCD haute vitesse pour mesurer la hauteur de la couche pendant le processus de dépôt et module la puissance du laser et / ou vitesse de buse afin d'obtenir l'épaisseur de couche souhaitée. La Figure 0.5 montre une image pour illustrer l'effet du système de contrôle par rétroaction en boucle fermée. Une comparaison entre deux cylindres qui se croisent construits avec et sans système en boucle fermée démontrent l'élimination de l'accumulation excessive hauteur à l'intersection avec l'aide du système de rétroaction.



La technologie DMLS utilise une surveillance du bain de fusion basée sur une photodiode. Les signaux du bain de fusion peuvent être collectés avec des capteurs hors axe ou des capteurs sur axe et la présence d'un défaut est reflétée par une anomalie dans le signal par rapport à un signal de référence standard (Figure 0.6). Le concept ci-dessus de surveillance de processus peut être franchi en une étape suite au contrôle de processus. Kruth et Mercelis ont proposé un contrôle de processus où les dimensions du bain de fusion peuvent être étalonnées pour un échantillon normalisé connu afin d'obtenir l'effet de divers paramètres de processus, tels que la puissance du laser. Une fois qu'une relation est établie entre le bain de fusion et les variables d'entrée, elle peut être utilisée pour la compensation en ligne de toute variation indésirable du processus.



4. Surveillance de la porosité : puisque la FA utilise une stratégie d'accumulation couche par couche, elle offre également la possibilité de procéder à une inspection après la construction de chaque couche. Arcam AB utilise une technologie de surveillance de processus qui est d'une grande importance pour les applications de FA très exigeantes, pour lesquelles l'ensemble du flux de travail d'inspection doit généralement être repensé. LayerQam est un système de vérification de la qualité basé sur une caméra pour la surveillance de processus in situ, intégré dans la dernière génération de machines Arcam EBM. L'objectif principal de LayerQam est de surveiller la porosité créée pendant le processus de fusion lorsque le produit est construit couche par couche. LayerQam prend des photos de chaque couche du processus EBM en lumière visible avec une certaine extension dans la région infrarouge. Un algorithme de traitement d'image est mis en œuvre pour analyser chaque couche fondue et générer automatiquement un rapport de post-construction avec des critères personnalisés. En empilant les images les unes sur les autres, une image 3D similaire à un scanner peut également être générée. (1)

3.5 Post-traitement des pièces de fabrication additive

La première étape après la construction d'une pièce consiste à nettoyer la pièce des poudres résiduelles par un processus de grenailage ou de sablage. Habituellement, les pièces en PBF traitées à l'aide d'un faisceau d'électrons nécessitent plus de temps pour le nettoyage en raison de la forte adhérence de la poudre libre à la pièce. Une fois la pièce nettoyée, l'étape suivante consiste à séparer la pièce du substrat et à retirer les structures de support, si elles ont été utilisées. En fonction de la géométrie et d'autres exigences, cela peut être accompli par une simple découpe à la scie à ruban, un fraisage dans une machine CNC et / ou une découpe EDM à fil. Un processus de FA typique est généralement suivi d'un traitement thermique et d'un usinage secondaire comme l'exige la spécification finale de la pièce.

Traitement thermique : Toutes les pièces de FA sont sujettes à tout traitement thermique. Les pièces fabriquées par FA laser sont généralement suivies par des créations de contraintes résiduelles en relief dû au refroidissement rapide dans les processus laser. En revanche, les pièces FA basées sur des faisceaux d'électrons ne nécessitent aucun soulagement des contraintes.

En fonction des exigences finales, les pièces FA sont souvent traitées par pressage isostatique à chaud (HIP). En plus de réduire le risque de porosités indésirables, un processus HIP aide à décomposer les

microstructures colonnaires typiques associées aux processus FA et permet une microstructure plus équiaxe résultant en une microstructure et des propriétés isotropes plus homogènes. Cela peut être suivi de tout traitement thermique de vieillissement requis par la spécification finale de la pièce. ASTM F2924-14 et ASTM F 3001-14 spécifient le traitement thermique pour les pièces Ti-6Al-4V fabriquées à l'aide de systèmes PBF, tandis que l'AMS 4999A fournit un traitement thermique pour les pièces Ti-6Al-4V à l'aide de procédés DED (laser).

Post-usinage : l'état de surface et la précision des pièces FA dépendent du processus choisi. Les processus PBF utilisent une taille de poudre plus fine comme matière première et une taille de point de faisceau laser / électronique plus petite pour le traitement, ce qui se traduit par une bien meilleure finition de surface et une plus grande précision des pièces que les processus DED. Alors que presque toutes les pièces traitées DED nécessitent une certaine forme d'usinage, les pièces traitées PBF peuvent ou non nécessiter un usinage de finition en fonction des exigences de la pièce finale. Parfois, seules les zones d'étanchéité ou les surfaces de contact sont usinées, laissant le reste des surfaces intact. Les procédés de finition tels que le rodage à base de boue sont largement utilisés pour améliorer la finition de surface des passages internes. Un équipement d'usinage conventionnel, tel que le fraisage, peut être utilisé pour finir les pièces de FA ; Cependant, une rugosité de surface plus élevée des pièces DED peut poser des problèmes en raison de coupes interrompues sur les surfaces externes. Le rodage et / ou l'électroérosion peuvent être une solution alternative.

3.6 Inspection et qualification des pièces de fabrication additive

L'inspection et le contrôle de la qualité des pièces FA est un domaine actuellement en cours de développement. Cela devient particulièrement critique car un bon nombre de ces pièces sont destinées aux industries aérospatiale et médicale qui exigent des normes de qualification et une traçabilité des matériaux plus élevées. Une large acceptation des processus de FA dans l'industrie dépend en grande partie du développement d'un processus de qualification et de certification abordable et rapide pour ces pièces. Des modèles prédictifs, des processus normalisés, des matériaux et des tests, ainsi que le développement de mesures de performance et de méthodes de mesure sont essentiels pour développer cette capacité.

Les efforts actuels pour développer un processus de qualification et de certification pour les pièces FA suivent les protocoles de modification et d'adaptation de la qualification des pièces qui existent pour d'autres technologies. La capacité de certifier et qualifier les pièces selon les spécifications existantes (par exemple, de qualité aérospatiale) sur le terrain après le traitement secondaire est d'une importance cruciale afin d'accélérer l'entrée de la FA en tant que technologie de fabrication courante. Ces efforts visent à remplacer les pièces fabriquées à l'aide d'autres technologies de fabrication par des procédés FA. Cela nécessite l'élaboration de normes pour les processus, les matériaux et les tests de FA. Le comité ASTM F42 a été créé dans le but de produire des normes pour tous les processus de FA. Cette norme traite des spécifications des matériaux pour la FA, la manutention, le stockage et l'élimination des matières premières, la surveillance et le contrôle des machines, ainsi que les essais des pièces produites à l'aide de la FA. Les normes sur les poudres comprennent les meilleures pratiques pour la manipulation et le stockage de la poudre afin de minimiser la contamination, réduire l'absorption d'humidité et le suivi du recyclage de la poudre, tandis que les normes identifient également les paramètres critiques de la poudre qui affectent la qualité des pièces et traitent des méthodes permettant de caractériser ces paramètres de poudre. Une partie du processus de qualification implique l'enregistrement de tous les paramètres de la machine pendant le processus. La plupart des systèmes commerciaux des entreprises, comme EOS, SLM Solutions, ARCAM et Concept Laser, permettent des modules de collecte de données de processus. Ces données incluent les

paramètres d'état de la machine, le temps d'exécution, les détails des pièces, etc., à des fins de traçabilité. Alors que la nature numérique de ces processus permet un accès facile à la collecte de données, le stockage des données et l'analyse de cette très grande quantité de données posent un défi difficile. Ce problème est actuellement traité par les équipementiers ainsi que par divers instituts de recherche. Le NIST a publié un rapport détaillé répertoriant tous les méthodes d'essai applicables aux pièces FA (1).

Le développement de la science de la mesure pour la FA est difficile en raison de ces principaux facteurs:

- Les technologies de FA, étant relativement nouvelles et émergentes, nécessitent une collaboration entre différentes disciplines d'études. L'intégration de différents domaines est importante pour l'optimisation des machines FA. La connaissance des matériaux pour ces systèmes est limitée, ce qui rend difficile la production de pièces de haute qualité.
- Les systèmes FA sont de nature complexe, sont optimisés par des logiciels et du matériel personnalisé, et fonctionnent en tangente les uns avec les autres. L'évaluation de ces machines est donc difficile.
- De nombreuses machines FA sont construites comme des « boîtes noires » avec du matériel technologique caché aux utilisateurs finaux et aux développeurs de processus. Afin d'intégrer de nouveaux logiciels et matériels, les développeurs de processus devront travailler avec les fournisseurs de FA dès les premières étapes de conception et de développement de la machine pour assurer une optimisation appropriée de leur système. Les machines FA devraient donc être « open-source » pour permettre une meilleure intégration des capteurs, équipements et logiciels tiers pour surveiller les paramètres de processus et corriger le processus de fabrication en temps réel. Avec des capteurs et des dispositifs de mesure appropriés pour la surveillance et la rétroaction, il y aurait une meilleure assurance de la cohérence de la pièce fabriquée et du processus FA.

Les efforts futurs dans ce domaine doivent se concentrer sur les nouvelles normes de qualifications et certification spécialement conçues pour exploiter la nature de la FA. Celle-ci étant un processus de construction couche par couche, elle offre une opportunité unique de surveillance en ligne de la qualité des pièces. L'inspection de pièces en ligne peut impliquer des techniques non destructives (NDE) basées sur des images numériques à rayons X, ultrasons ou haute définition, ainsi que des mesures de distorsion des pièces et des mesures de contraintes résiduelles. Les méthodes doivent être souples et adaptatives (plutôt que prescriptives) pour permettre une utilisation la plus large possible. La capacité de fabrication multimatériaux est l'une des principales capacités des technologies FA et les futures techniques d'inspection ainsi que les procédures de qualification doivent prendre en compte cet aspect de la FA. (1)

Alors que les techniques d'inspection régulières, destructives et non destructives sont très applicables aux pièces FA, il faut prendre compte de la rugosité de surface de ces pièces telles que construites lors de la pratique de ces techniques. Si les pièces FA sont usinées selon les spécifications de surface des tests ASTM, les techniques de test standard sont adéquates. Cependant, certaines applications FA sont limitées à des accès d'usinage (tels que des passages de refroidissement, des cavités étroites ou des structures en treillis, etc.) à des sections de la pièce ou de la pièce entière. Parfois, les pièces fabriquées par FA ne sont pas usinées pour réduire les coûts de fabrication. Afin de simuler les performances de ces pièces, la rugosité de surface doit être prise en compte lors de tout essai mécanique. Une rugosité de surface plus élevée de ces pièces par rapport aux surfaces usinées standard peut également poser des défis à certaines techniques NDE, telles que l'inspection par ultrasons. Ce problème est

particulièrement évident dans les pièces fabriquées en DED où la finition de surface est plus grossière que les pièces fabriquées en PBF. Des techniques NDE, telles que la mesure de densité, les rayons X et les scans CT, sont régulièrement effectuées pour la détection de défauts ou la détermination de la porosité des pièces FA.

La précision dimensionnelle des pièces FA est un sujet particulièrement intéressant car de nombreuses pièces créées par FA ne sont destinées à aucun usinage de finition sur de nombreuses surfaces, par exemple des échafaudages. Un travail important est en cours pour comprendre la distorsion et la précision dimensionnelle des pièces FA fines et complexes, y compris les caractéristiques de précision telles que les petits trous et les parois minces.²⁹ Le NIST travaille activement avec ASTM F42 et le «Comité technique 261 sur la fabrication additive» de l'ISO pour créer des artefacts de test représentant chaque catégorie de technologie FA afin de créer un critère d'acceptation pour le dimensionnement géométrique et le tolérancement de chaque technologie FA. (1) Une fois établies, ces normes devraient faciliter le processus de certification et de qualification des pièces.

CHAPITRE IV :
COMPARAISON DES TECHNOLOGIE DE
FABRICATION ADDITIVE

CHAPITRE IV : COMPARAISON DES TECHNOLOGIE DE FABRICATION ADDITIVE

4.1 Introduction

Alors que les technologies de fusion sur lit de poudre (PBF) conviennent aux plus petites pièces, à géométries complexes, avec structures creuses sans support, le dépôt à énergie dirigée (DED) est mieux adapté aux pièces plus grandes avec des caractéristiques plus grossières nécessitant des taux de dépôt plus élevés (kg/h). L'utilisation de grains de poudre plus fins combinés à une plus petite taille de faisceau laser / d'électrons conduit à une finition de surface supérieure sur les pièces telles que construites des technologies PBF par rapport aux technologies DED. Cependant, la majorité des pièces de production par FA nécessitent une forme d'usinage de finition pour la plupart des applications. La capacité des technologies d'énergie dirigée à ajouter du métal sur les pièces existantes leur permet d'appliquer des revêtements de protection de surface, de reconditionner et de réparer les pièces endommagées, de reconfigurer ou d'ajouter des fonctionnalités aux pièces existantes, ainsi que de fabriquer de nouvelles pièces.

4.2 Comparaison des procédés phares de la fabrication additive du titane

Le Tableau 0.1 présente une comparaison des capacités, des avantages et des limites des diverses technologies FA actuelles utilisées pour produire pièces en titane.

La Figure 0.1 montre une comparaison des technologies PBF par rapport aux technologies DED en termes de vitesse de dépôt et de rugosité de surface. L'épaisseur de la couche a été utilisée ici comme mesure de la rugosité car celle-ci détermine la rugosité des parois verticales de la structure fabriquée. De toute évidence, les technologies PBF offrent une meilleure finition de surface car elles utilisent une taille de faisceau plus petite (pour les faisceaux laser et électroniques) et une épaisseur de couche inférieure par rapport aux technologies DED ; cependant, en conséquence, le taux de dépôt est également plus faible pour ces technologies. Par conséquent, le PBF est plus approprié pour des objets de petite taille plus précis et complexes, tandis que le DED est plus approprié pour des pièces plus grandes à un taux de traitement élevé, mais avec une finition plus grossière de l'état de surface.

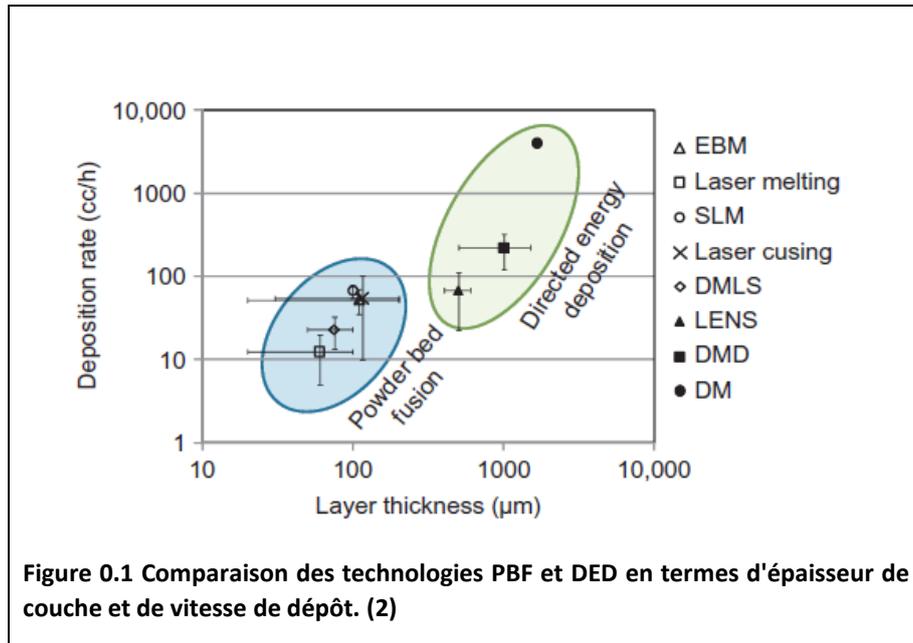


Tableau 0.1 Comparaison des différentes technologies FA (1) (1) (1)

	PBF laser	PBF faisceau électronique	DED laser
Variété des pièces	Limité	limité	Large et flexible
Taille du faisceau	Petit, 0.1-0.5 mm	Petit, 0.2-1 mm	Grand, 2-4 mm
Epaisseur de la couche	Petite, 50-100 µm	Petite, 100 µm	Grande, 500-1000 µm
Vitesse de fabrication	Bas, cm ³ /h	Bas, 55-80 cm ³ /h	Elevée, 16-320 cm ³ /h
Finition de surface	Très bonne, Ra 9/12 µm, Rz 35/40 µm	Bonne, Ra 25/35 µm	Grossière, Ra 20-50 µm, Rz 150-300 µm (selon la taille du faisceau)
Contraintes résiduelles	Elevées	Minimes	Elevée
Traitement thermique	Elimination de contraintes nécessaire, HIP préféré	Elimination de contraintes non nécessaire, HIP facultatif	Elimination de contraintes nécessaire, HIP préféré

Chimie	ELI possible, perte d'éléments négligeables	ELI possible, perte d'Al à compenser dans la chimie de la poudre	ELI possible, perte d'éléments négligeables
Capacité de fabrication	Excellente résolution pour les géométries complexes , capacité de réaliser des structures creuses	Bonne résolution pour les géométries complexes , capacité de réaliser des structures creuses	Géométries plus simples avec une plus faible résolution et une capacité limitée de réaliser des structures creuses
Réparation/ refabrication	Possible dans un domaine limité (plan horizontal nécessaire pour débiter la fabrication)	Non possible	Possible. Capable d'ajouter du métal en 3D sous une configuration d'axes 5+1
Addition de matière sur des pièces existantes	Non possible	Non possible	Possible. dépend des dimensions internes dans le cas d'un revêtement interne
Multimateriaux	Non possible	Non possible	possible

4.3 Rugosité de surface et défauts des pièce FA

Pour les pièces métalliques FA, les conditions de surface dépendent du système utilisé, la matière première (par exemple poudre ou taille de fil), le chemin de fabrication et le système d'alliage (par exemple l'alliage Ti-6Al-4V). Pour l'alliage Ti-6Al-4V, les surfaces SLM ont normalement une rugosité moyenne (Ra) d'environ 10–25 microns et les surfaces SEBM sont plus rugueuses avec un Ra allant jusqu'à 50 microns qui est au même niveau que les moulages au sable. Les surfaces FA les plus rugueuses se produisent avec une alimentation en fil. Les surfaces rugueuses dégradent le comportement à la traction, à la fatigue et à la corrosion. Les pièces FA présentant d'excellentes propriétés mécaniques qui ont été rapportées ont tendance à provenir d'échantillons qui ont été usinés (Ra environ 1 micron) ou polis (Ra 0,1-0,4). Un problème avec les pièces FA destinées à une utilisation porteuse est qu'elles contiennent souvent des passages internes avec des surfaces rugueuses. Ces surfaces internes peuvent être lissées par gravure à l'acide avec ou sans utilisation simultanée d'usinage sous pression et avec un fluide abrasif. Les poudres métalliques sphériques fabriquées par le procédé d'électrode rotative au plasma ont tendance à présenter une porosité considérablement moindre que les poudres atomisées au gaz.

Les défauts les plus courants dans les composants métalliques FA sont des pores avec piégeage de gaz (qui peut résulter de la porosité de la charge d'alimentation en poudre) et des caractéristiques qui présentent des régions sans fusion et non fondues (Figure 0.2). Les défauts d'absence de fusion sont plus délétères que les pores de gaz car ils ont une forme irrégulière et sont de plus grande taille. En raison du souci de survenue de défauts, pour les applications critiques en fatigue, une étape de pressage isostatique à chaud est souvent ajoutée pour guérir ou réduire les défauts internes. (1)

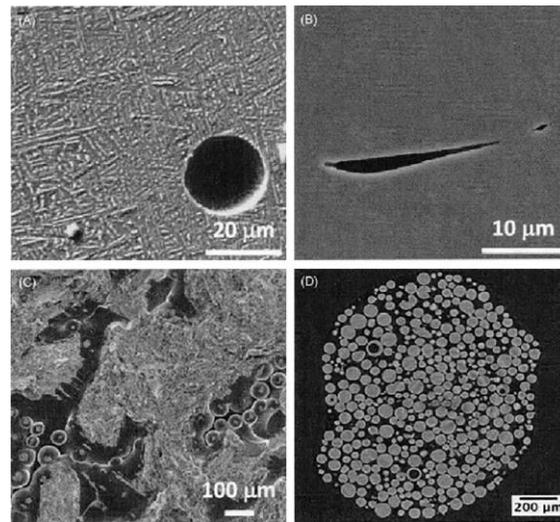


Figure 0.2 Exemples de (A) un pore de gaz et (B) un défaut d'absence de fusion SEBM Ti-6Al-4V. (C) facies de rupture traction Ti-6Al-4V non fondue et (D) microtomographie à rayons X synchrotron de porosité interne dans des particules de Ti-6Al-4V atomisées par gaz (cercles noirs à l'intérieur de particules de poudre blanche).

Avec l'approche laser FA, les contraintes résiduelles sont particulièrement préoccupantes avec de grandes structures où une distorsion importante peut se produire. En raison de la température élevée (environ 500 °C) du lit de poudre avec SEBM, cette distorsion ne se produit pas. (1)

4.4 Refabrication

L'un des meilleurs domaines d'application adaptés aux techniques de DED est la remise à neuf et la réparation de pièces endommagées, usées ou corrodées. En raison de leur capacité à ajouter du métal à des emplacements sélectionnés sur des surfaces 3D, ces technologies peuvent être utilisées pour reconstruire les matériaux perdus sur divers composants. Les technologies en boucle fermée telles que DMD offrent l'avantage particulier d'une zone de chaleur minimale (HAZ) dans la pièce réparée et aident à conserver l'intégrité de la pièce. Le contrôle en boucle fermée permet à DMD de réparer des pièces avec une courte HAZ et de produire une pièce réparée de haute qualité. Figure 0.3 montre les microstructures en coupe transversale de la zone DMD d'une aube de turbine réusinée. (1)

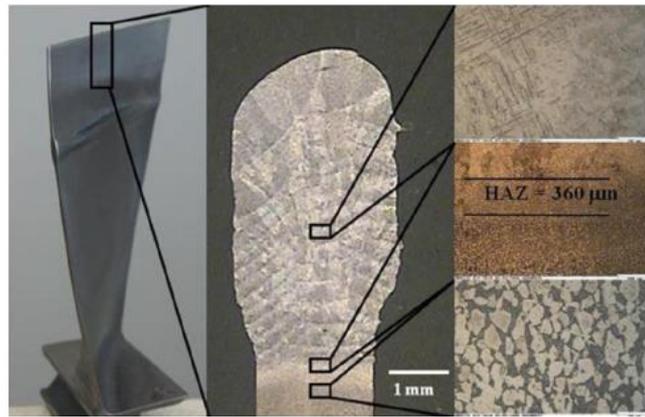


Figure 0.3 Réparation par DMD des composants de turbine; à gauche: aube réparée, au milieu: macro en coupe et à droite: microstructures (de haut en bas montre le revêtement, l'interface et le matériau de base).

L'excellent contrôle du processus pendant la DMD conduit à une microstructure complètement dense comme observé dans la section verticale. Une épaisseur de couche d'environ 0,1 à 0,2 mm a été appliquée dans ce cas et un HAZ minimal est observé dans la lame telle que déposée. Le système de visualisation DMD joue un rôle important dans ce type de reconditionnement. Un système de visualisation calibré intégré à la machine permet l'identification automatique de l'emplacement des pièces dans le système de coordonnées de la machine et le traitement de précision qui en résulte. Les autres composants en titane qui peuvent être réparés comprennent les boîtiers, les roulements, les brides de carter, les joints et les trains d'atterrissage.

4.5 Fabrication hybride pour les grandes pièces

Technologies de dépôt d'énergie dirigé telles que DMD et / ou LENS ont la possibilité d'ajouter du métal sur des surfaces 3D et ainsi que de permettre l'ajout de caractéristiques sur des pièces et / ou des flans existants. Ceci n'est pas possible avec la PBF. Ajouter des fonctionnalités à une pièce forgée ou moulée, à l'inverse de l'usinage, peut assurer une fabrication plus rentable, où une réduction significative de la taille et du poids de la préforme peut-être réalisée en éliminant le besoin d'une surépaisseur d'usinage. Des exemples sont divers carters et boîtiers dans les moteurs à réaction où des brides, des bossages, etc. peuvent être ajoutés sur des pièces cylindriques moulées ou forgées. Ceci est démontré pour un ajout de fonctionnalités sur un carter de ventilateur en titane pour un moteur d'avion (Figure 0.4).



Figure 0.4 Boîtier de ventilateur produit en ajoutant des fonctionnalités avec FA (dépôt d'énergie dirigé assisté par laser) à une pièce forgée.

4.6 Concept bi-structurel

L'un des avantages distincts de la FA par rapport à de nombreuses techniques de fabrication est son contrôle sur le processus de réalisation et sa capacité à réaliser chaque couche à partir d'une conception prédéterminée. Cela a permis l'utilisation de la FA dans l'industrie des implants médicaux avec une teneur en porosité contrôlée afin de faciliter la croissance osseuse dans l'implant. (1) En raison de leur plus petite taille de faisceau et de leur capacité à construire des structures sans support, les systèmes PBF sont mieux adaptés pour fabriquer des composants avec une petite taille de porosité à teneur élevée et / ou graduée comme requis par l'application. Les échafaudages tissulaires avec une teneur en porosité jusqu'à environ 80% et une taille de pore d'environ 700 μm (1) et des structures poreuses aléatoires avec une teneur en porosité allant jusqu'à environ 70% et la taille des pores 300-500 μm ont été rapportés en utilisant EBM, SLM et / ou technologies DMLS utilisant un matériau Ti-6Al-4V. La technologie LENS était utilisée pour fabriquer des structures en titane avec une porosité graduée (23-32%) et un module d'élasticité (7-60 GPa) pour correspondre à celui de l'os cortical humain (Figure 0.5)

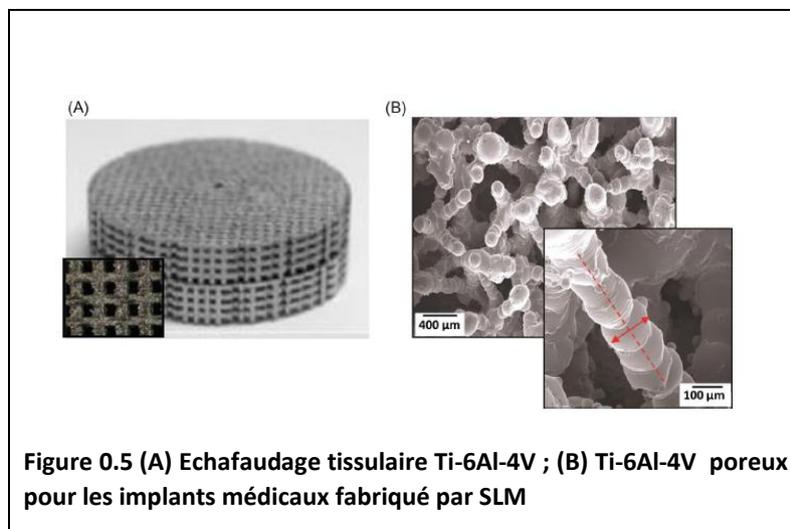


Figure 0.5 (A) Echafaudage tissulaire Ti-6Al-4V ; (B) Ti-6Al-4V poreux pour les implants médicaux fabriqué par SLM

4.7 Bimatériau ou multimatériau dans la fabrication additive

Un attribut des technologies FA est leur capacité à fabriquer des composants uniques avec plusieurs matériaux différents pour exécuter diverses fonctions selon les besoins de l'application. Comme la FA implique la superposition de matériaux, une couche à la fois, elle permet également l'introduction de divers matériaux à différentes couches ou dans la même couche à différents endroits. Cela donne à la FA un avantage certain sur tous les processus de fabrication conventionnels et offre une supériorité sur les composants de FA.

Les technologies DED sont les mieux adaptées à la fabrication des composants multimatériaux, tandis que d'autres technologies FA, telles que FA par ultrasons, peuvent également être utilisées dans le même sens. LA FA à base de laser a été utilisée pour créer des revêtements fonctionnellement gradués de Rene88DT (superalliage à base de Ni : 16%Cr-13%Co-4%Mo) sur l'alliage Ti-6Al-4V. Une expérience contrôlée a produit un accroissement continu de Rene88DT de 0% à 38% d'alliage sur une distance d'environ 40mm. Cela a augmenté la dureté de 450 HV à 750 HV et transformé la microstructure de α (Ti) + β (Ti) colonnaire en α (Ti) + β (Ti) + Ti_2Ni puis en β (Ti) + Ti_2Ni équiaxe (Figure 0.6). Une telle ingénierie précise des microstructures et des propriétés peut améliorer considérablement les performances des composants. De même, un alliage gradué a été réalisé avec des alliages Ti-Mo et des alliages Ti-V en utilisant d'autres technologies DED.

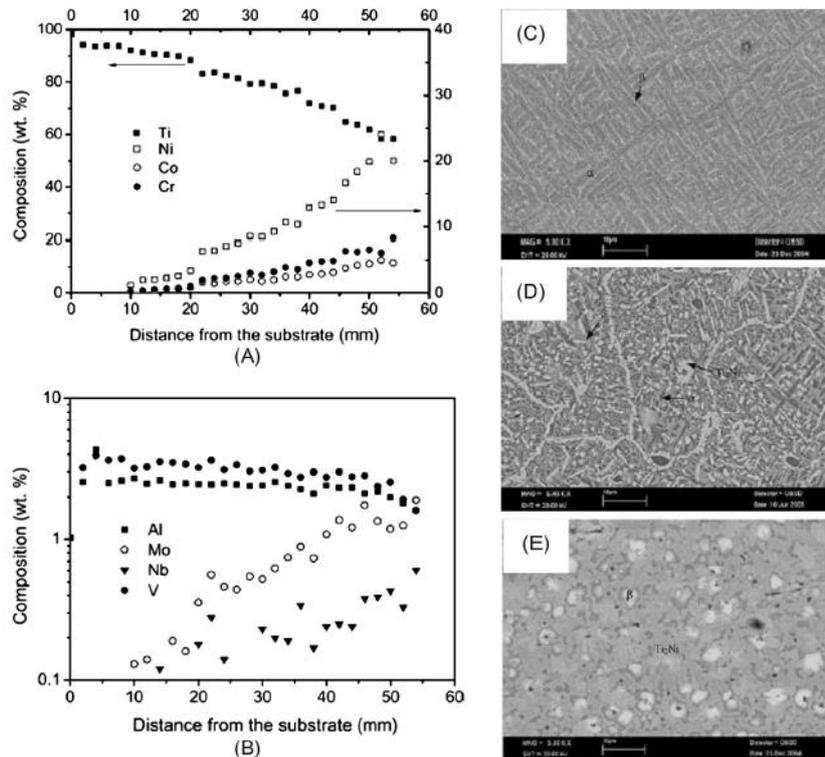


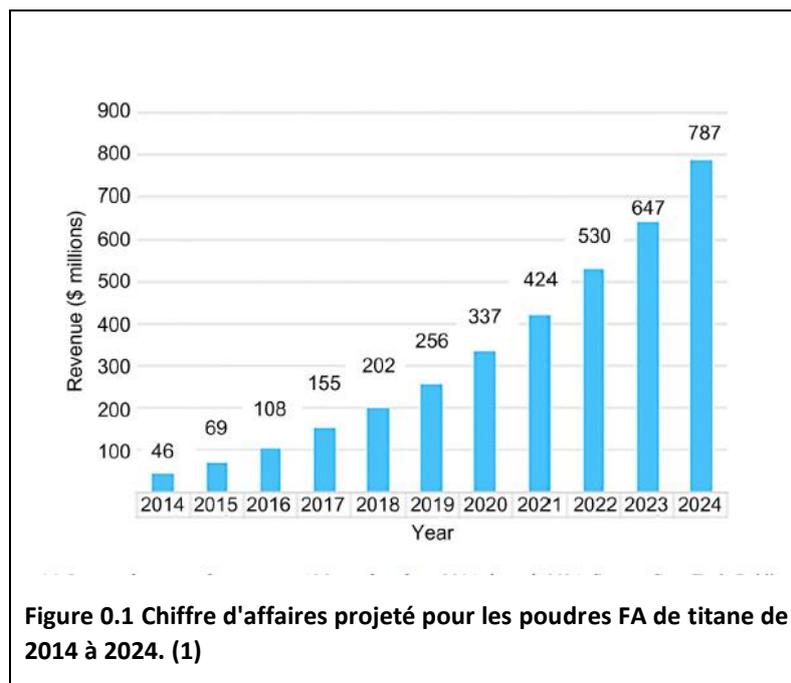
Figure 0.6 Revêtement fonctionnellement gradué de l'alliage Rene88DT sur Ti-6Al-4V à l'aide de la technologie laser FA (DED). (A) et (B) montrent les gradients de composition de divers éléments le long de la profondeur à partir de la surface supérieure. Les microstructures correspondantes sont indiquées dans (C) Ti 6Al 4V 0% Rene88DT, (D) Ti-6Al-4V 19% Rene88DT et (E) Ti-6Al-4V 38% Rene88DT.

CHAPITRE V :
MARCHÉS ET APPLICATIONS DE LA
FABRICATION ADDITIVE DU TITANE

CHAPITRE V : MARCHÉS ET APPLICATIONS DE LA FABRICATION ADDITIVE DU TITANE

5.1 Introduction

Alors que le marché global de la FA continue de croître à un rythme rapide, le marché de la FA en titane, lui aussi, suit cette tendance. Les industries aérospatiale et médicale, étant les deux plus grands consommateurs de titane métal, sont naturellement les deux plus gros pilotes du titane FA. Une exploration approfondie est actuellement en cours pour l'utilisation de pièces en titane FA dans les applications aérospatiales et médicales. D'autres applications de la FA comprennent l'utilisation dans les industries chimiques, de défense et autres. Alors que les technologies de fusion sur lit de poudre (PBF) conviennent aux géométries plus petites et complexes, avec des structures creuse sans supports, le dépôt d'énergie dirigé (DED) est mieux adapté aux pièces plus grandes avec des caractéristiques plus grossières nécessitant des taux de dépôt plus élevés. L'utilisation de particules de poudre plus fines combinées à une plus petite taille de faisceau laser / d'électrons conduit à une finition de surface supérieure sur les pièces telles que construites des technologies de fusion sur lit de poudre par rapport aux technologies de dépôt d'énergie dirigée. Cependant, la majorité des pièces FA nécessitent un usinage de finition pour la plupart des applications pratiques. La capacité des technologies d'énergie dirigée à ajouter du métal sur les pièces existantes leur permet d'appliquer des revêtements de protection de surface, de reconditionner et de réparer les pièces endommagées et de reconfigurer ou d'ajouter des fonctionnalités aux pièces existantes, ainsi que la fabrication de nouvelles pièces.



5.2 Industrie aérospatiale

L'industrie aérospatiale et la défense sont les plus grands consommateurs de titane métallique. Les applications du titane dans l'industrie aérospatiale sont en cours d'exploration pour des structures plus

petites dans les moteurs d'aéronefs tels que les supports et les boîtiers, mais peut se développer dans des composants structurels plus grands qui stimuleront la demande. La majorité des applications de pièces de petite taille se concentre sur les économies de poids grâce à des conceptions innovantes qui se traduisent par des économies de carburant et des avantages économiques significatifs pendant la durée de vie de l'avion. En plus de cela, des composants FA en titane se concentrent également sur les pièces avec un rapport buy-to-fly élevé, afin de réduire le poids d'entrée du titane. Le rapport buy-to-fly est défini comme le prix de la matière première achetée en stock par rapport au prix de la matière finie utilisée en vol. Les composants aérospatiaux typiques peuvent avoir un rapport de 10 :1 - 20 :1, et aussi élevé que 40:1 dans certains cas lorsqu'ils sont fabriqués à l'aide de procédés de fabrication conventionnels. La FA peut réduire ce rapport de manière significative et le rendre proche de 1 :1. Cela permet non seulement d'économiser des coûts pour les alliages de titane coûteux, mais également de réduire le temps et le coût d'usinage. Le résultat est une économie multiple pour la fabrication de tels composants. On s'attend à ce que les composants plus gros présentent des économies encore plus importantes en réduisant le rapport buy-to-fly lorsqu'ils sont fabriqués par FA. Cela augmentera davantage la croissance de la production de titane métallique ainsi que de la FA des alliages de titane. La Figure 0.2 montre des applications aérospatiales de boîtier de pompe en titane construites à l'aide de la technologie SLM.



Figure 0.2 Corps de pompe en titane fabriquée par le procédé SLM.

Une autre opportunité importante pour la FA dans l'industrie aérospatiale est le domaine du marché de la réparation et de la révision d'entretien (MRO). Les besoins en matière de durabilité et les coûts de matériaux toujours croissants forcent les compagnies aériennes pour explorer les options de réparation qui vont au-delà des capacités de réparation. La FA offre l'avantage de la liaison métallurgique, une ZAT réduite, une distorsion réduite et une meilleure qualité de réparation composants, tout en économisant des coûts importants et en réduisant les temps d'arrêt.

5.3 Industrie médicale

La FA du titane a de bonnes perspectives sur les marchés médicaux grâce à sa bio-inertie et à ses performances en croissance osseuse orientée. La production actuelle d'implants en titane utilisant la FA augmente rapidement, avec de nouveaux produits dans la colonne vertébrale, la hanche, le genou et d'autres domaines orthopédiques. La Figure 0.3 montre des exemples d'implant CMF (cranio-maxillo-fasciaux), de cupule acétabulaire et d'implant tibial construits à l'aide de la technologie EBM. Ces technologies ont aussi le potentiel de fabriquer des implants personnalisés spécifiques au patient qui répondent mieux aux besoins de cette application. La Figure 0.4 montre un échafaudage tissulaire Ti-6Al-4V construit à l'aide de la technologie DMD. (1)



Figure 0.3 Applications d'implants médicaux: implant CMF (à gauche) utilisant la technologie EBM, cupule acétabulaire (médiane) utilisant la technologie EBM, implant tibial (à droite) utilisant la technologie EBM.



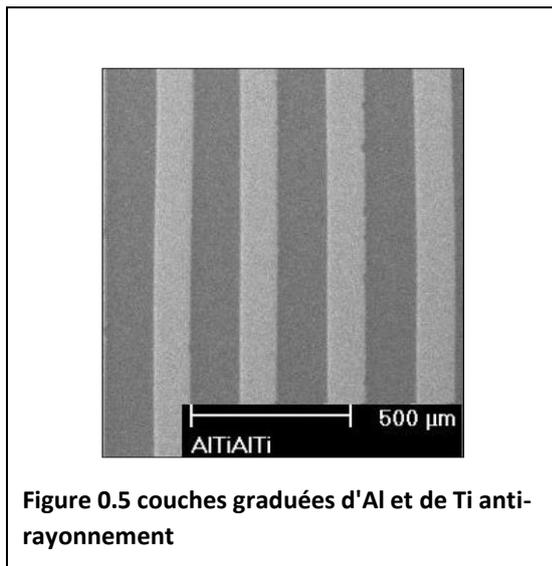
Figure 0.4 Echafaudage Ti-6Al-4V qui a été produit par le procédé DMD.

5.4 Autres industries

D'autres industries, telles que la chimie, le pétrole et le gaz, explorent également des applications FA en titane. Voici quelques exemples de fabrication de multimatériaux impliquant du titane.

La capacité d'un écran à arrêter le rayonnement augmente généralement avec le numéro atomique (Z) du matériau de protection. Le blindage gradué Z est une combinaison de plusieurs matériaux différents avec des numéros atomiques différents. Les boucliers gradués Z ont généralement des performances beaucoup plus élevées par unité de poids que les écrans constitués d'un seul matériau. Les structures spatiales et les satellites ont été protégés pendant des années à l'aide de stratifiés de plusieurs métaux différents (Al, Ta, Cu) dont le titane. Cependant, ces stratifiés sont difficiles à produire car les procédés de soudage à base de fusion conduisent à des phases intermétalliques fragiles. La fabrication additive par ultrasons (UAM) peut être utilisée pour fabriquer de tels écrans de matériau gradué à température ambiante et éliminer ainsi les problèmes de formation de ces phases. La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montre un tel exemple d'un écran anti-rayonnement fabriqué en utilisant de l'aluminium et du titane.

Un autre exemple d'application de fabrication multimatériaux est dans une armure. Les stratifiés métalliques hybrides multicouches ont été largement étudiés pour les applications de blindage, un gradient de différents métaux peut être utilisé pour concevoir des structures hautement personnalisées avec des propriétés mécaniques intéressantes « à travers l'épaisseur ». Grâce aux propriétés d'épaisseur telles que la résistance, la ténacité et la rigidité peuvent être modifiées pour produire un système avec les performances les plus élevées au poids le plus bas. Le UAM a été utilisé pour produire des panneaux de blindage avec une combinaison d'alliages d'aluminium et de titane. Généralement, les couches sont de l'ordre de 150 microns et chaque couche peut être modifiée pour construire une structure de gradient sur l'épaisseur. (Figure 0.6)



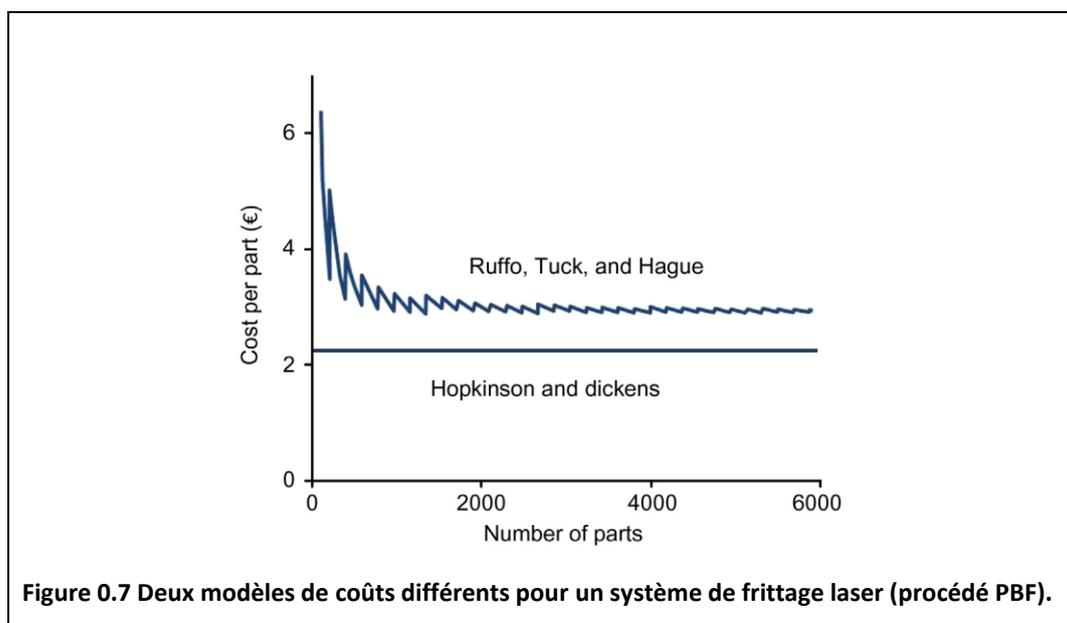
5.5 Analyse des coûts de la fabrication et comparaison avec les méthodes conventionnelles

Il y a eu des études approfondies sur l'analyse des coûts et les modèles de coût de la FA basés sur les processus PBF. Un résumé complet de ce travail peut être trouvé dans un rapport du NIST. Comme dans tout processus de fabrication, le coût de la FA dépend de facteurs tels que le coût de la machine,

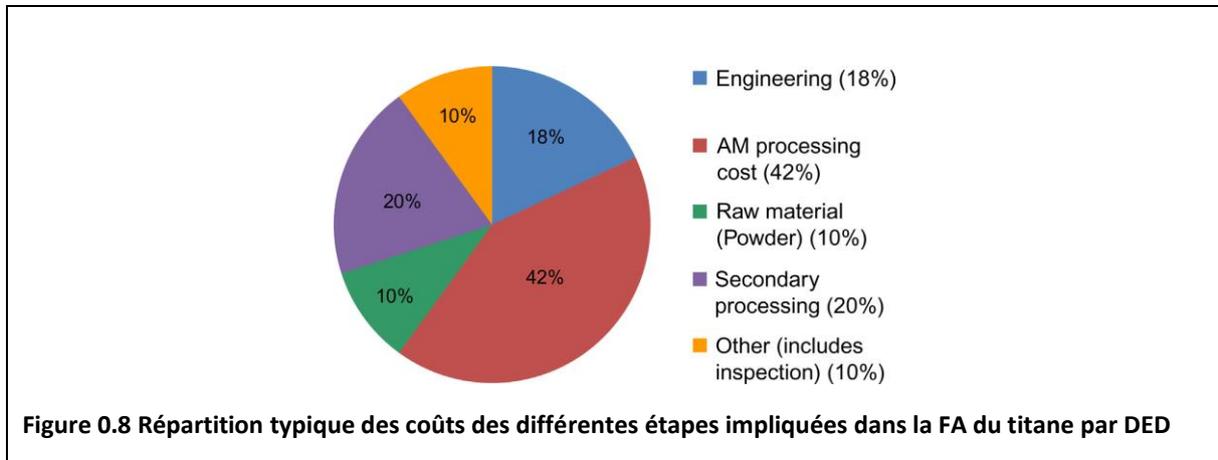
le coût des matériaux, le temps de construction, la consommation d'énergie, la main-d'œuvre et les frais généraux, y compris les installations et autres coûts. Bien que la plupart de ces coûts soient facilement compris, la taille de la pièce par rapport à l'enveloppe de fabrication de la machine joue un rôle majeur dans la détermination du temps et du coût de fabrication par pièce. En effet, les processus PBF nécessitent de remplir toute la zone de construction avec de la poudre pour chaque couche, et plus la zone de construction est remplie de pièces efficacement, le temps de construction par pièce est réduit ainsi que l'utilisation de la poudre. Deux modèles de coûts populaires sont :

- Le modèle de Hopkinson et Dickens calcule le coût moyen par pièce en divisant le coût total par le nombre total de pièces fabriquées par an. Le coût total est la somme des coûts de la machine (amortis sur 8 ans), les coûts de main-d'œuvre et les coûts des matériaux. Trois hypothèses supplémentaires sont : (1) le système produit un seul type de pièce pendant 1 an, (2) il utilise des volumes maximums, et (3) la machine fonctionne pour 90% du temps.
- Le modèle de Ruffo, Tuck et Hague basé sur des activités particulières avec la machine. Il calcule le coût total d'une fabrication comme la somme des coûts des matériaux et coûts indirects (taux horaires pour le coût de la machine, coût de main-d'oeuvre, coût administratif et coût des installations multipliés par le temps de fabrication particulier). Le coût par pièce est calculé comme le coût total d'une construction divisé par le nombre de pièces de la construction. Si la construction se compose de pièces de tailles et de formes différentes, le coût par pièce est calculé en tant que fraction volumique de la pièce spécifique par rapport au volume total de fabrication, multiplié par le coût total de fabrication.

Alors que le modèle Hopkinson génère un coût fixe pour la machine, le modèle de Ruffo prend en compte l'utilisation de l'enveloppe de fabrication pour une seule pièce, son volume et donne probablement un coût plus précis pour la production de pièces en utilisant un systèmes PBF (Figure 0.7). Les deux modèles sont ciblés sur les coûts de production et ne tiennent pas compte du coût d'ingénierie impliqué dans la réingénierie de la pièce pour le processus, la programmation, ainsi que tout post-traitement, etc.



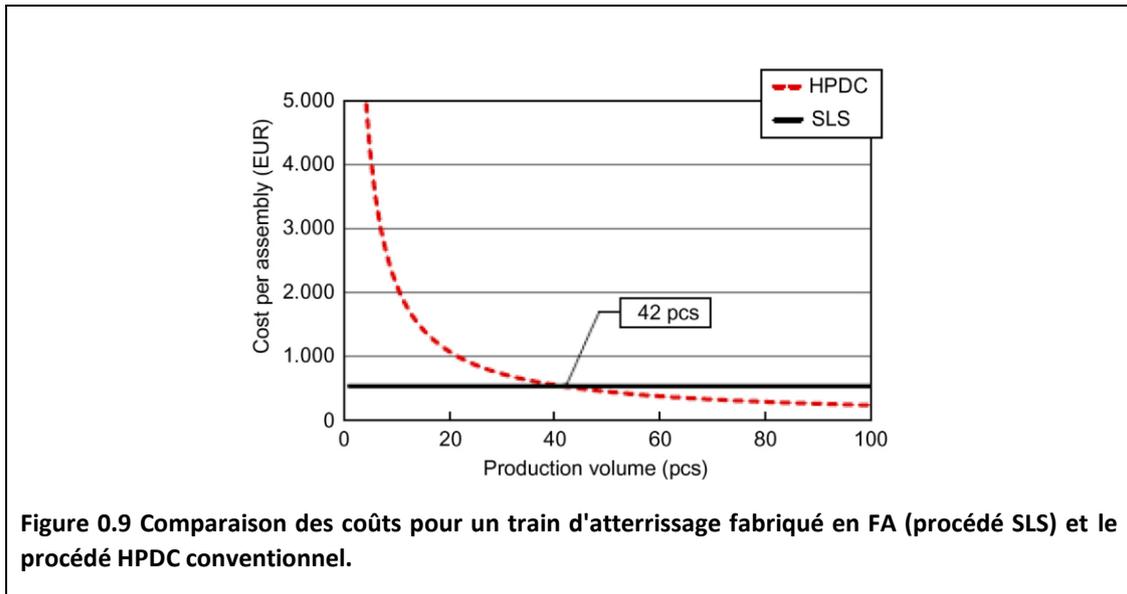
La Figure 0.8 montre une répartition typique des coûts des différentes étapes impliquées dans la FA des composants en titane à l'aide des technologies DED. Ce modèle est basé sur les hypothèses suivantes : (1) petite taille de lot (entre 10 et 30 pièces), (2) pièce de taille moyenne, de 600 à 900 mm et une géométrie relativement simple. Tous ces facteurs peuvent influencer considérablement le coût. La taille du lot joue un rôle majeur dans le calcul des coûts pour les petits lots, tandis que la taille des pièces joue un rôle plus important dans le calcul des coûts pour les lots plus importants. (1)



5.6 Economie de la fabrication additive

Le succès de l'expansion de la FA dans l'industrie manufacturière dépend de sélection des bonnes applications. Les applications appropriées pour la FA incluent un long délai de livraison, des composants complexes, un faible volume coûteux des composants, des économies de poids grâce à des conceptions innovantes, des économies de coûts sur les pièces à rapport achat / vol élevé, une remise à neuf économique, des implants médicaux personnalisés et des composants multimatériaux. Voici quelques études de cas qui développent ces aspects de la FA.

Bénéficiant d'une fabrication sans outil, la FA est un outil attractif pour la fabrication pour les petits lots par rapport aux techniques de fabrication conventionnelles, telles que le moulage, le forgeage et l'extrusion. L'élimination des besoins d'outillage réduit non seulement le coût par pièce, mais réduit également considérablement les délais de fabrication, ce qui se traduit directement par des avantages économiques significatifs. Cependant, un débit relativement plus faible rend la FA moins attrayante pour la fabrication à grand volume. Ceci est illustré sur la Figure 0.9 qui compare le coût par pièce de fabrication d'un composant de train d'atterrissage en utilisant le procédé DMLS avec le procédé de moulage sous haute pression (HPDC). Comme la quantité de pièces dépasse 42 pièces, HPDC devient une solution plus rentable, tandis que la FA est moins coûteuse pour de faibles quantités.



Les industries aérospatiale et médicale requièrent une large utilisation du titane et ses alliages pour leurs applications nécessitant de hautes performances, faibles poids, compatibilité biologique, etc. Le titane et ses alliages ne sont pas seulement cher, mais également difficile à usiner en utilisant des méthodes de fabrication traditionnelles entraînant des coûts de fabrication élevés. La FA offre une opportunité unique en réduisant les besoins en matières premières ainsi que l'étendue des opérations de post-usinage nécessaires. Un modèle de coût d'une pièce en titane de moteur d'avion typique fabriquée à l'aide du processus FA par rapport à l'usinage à partir d'un stock de matériau forgé à anneaux a été réalisé par Allen. Ce travail a conclu que la FA est rentable dans les cas où le rapport buy-to-fly est de 12 : 1 ou plus. C'est un moyen d'indiquer la quantité de matière à usiner. Les comparaisons de coûts montrent que la FA est une option intéressante pour les composants avec un rapport buy-to-fly élevé, une forme complexe qui nécessite un usinage important, un coût de matière élevé et est difficile à usiner. L'analyse est illustrée par l'exemple suivant. Des chercheurs du Oakridge National Laboratory ont construit à base de Ti-6Al-4V un Support Bleed Air Leak Detect (BALD) pour un moteur Joint Strike Fighter (JSF) en utilisant la technologie EBM (Figure 0.10). La Fabrication traditionnelle à partir de la plaque Ti-6Al-4V forgée coûte près de 2200 \$ / kg en raison d'un rapport buy-to-fly (33 : 1). En revanche, ce rapport est un peu plus de 1 : 1 pour la FA. Les économies estimées grâce à la FA sont d'environ 50%. (1)



L'un des principaux avantages des procédés de fusion sur lit de poudre est la possibilité de créer des structures creuses et ainsi permettre des économies de poids. L'industrie aérospatiale, où les économies de poids peuvent avoir un impact très important, étudie activement cette caractéristique des procédés de FA. Une étude de cas impliquant une boucle de siège pour un jet en est un très bon exemple. Une boucle avec des structures creuses a été conçue sur la base d'une étude d'analyse d'éléments finis étendue pour assurer une résistance suffisante contre les chocs. La pièce a été produite en utilisant le DMLS à partir de l'alliage Ti-6Al-4V (Figure 0.11).(1)



Figure 0.11 Boucle de siège produite à l'aide de la technologie DMLS

Le remplacement d'une boucle en acier conventionnelle par une boucle creuse en titane FA a permis une économie de poids de 85 g par boucle (réduction de poids de 55%). Un Airbus A380 de 853 sièges se traduira ainsi par un gain de poids possible de 72,5 kg. Selon le promoteur du projet, Technology Strategy Board, Royaume-Uni, cette économie de poids se traduit par 3,3 millions de litres d'économies de carburant sur la durée de vie de l'avion, ce qui équivaut à 3 millions de dollars, tandis que le coût de fabrication de toutes les boucles utilisant DMLS ne coûtent que 256 000 \$ US.

Les techniques de dépôt direct telles que le DMD peuvent non seulement être utilisées pour créer des pièces, mais également de les remettre à neuf, les réparer et / ou créer des fonctionnalités sur des pièces existantes. Les composants coûteux en titane aérospatiaux endommagés, tels que le boîtier de roulement, les brides, les pales de ventilateur, les carters, les aubes et les trains d'atterrissage peuvent être reconstruits à l'aide des technologies FA de 20 à 40% du coût des nouvelles pièces. Les brides usées des carters de moteurs à réaction ont été reconstruites à l'aide de DMD à moins de la moitié du coût d'une nouvelle pièce. Des travaux approfondis sont en cours pour étudier la faisabilité de l'utilisation de ces technologies pour récupérer des composants mal usinés lors de la fabrication conventionnelle. La réalisation réussie de ces efforts aura un impact très significatif sur l'industrie de fabrication du titane.

Du point de vue de la chaîne d'approvisionnement, la FA peut avoir un impact significatif et diffère considérablement de la fabrication conventionnelle. Alors que la fabrication conventionnelle repose généralement sur un système à trois niveaux (composé du fabricant, du fournisseur d'outillage et de l'entrepôt), la FA offre l'opportunité d'un système à un niveau où le deuxième niveau de fournisseurs d'outillage ne sont pas nécessaires car la FA est une fabrication sans outil. En raison de la flexibilité de la technologie FA pour passer rapidement d'une production de pièces à une autre, la FA élimine également le besoin de stocks de l'entrepôt et élimine ainsi un troisième niveau de la chaîne d'approvisionnement. En outre, la FA peut être extrêmement efficace pour les lancements de nouveaux produits, car elle permet des changements de conception rapides et ne nécessite pas d'outillage. Cela réduit le délai pour une nouvelle pièce et permet aux clients d'exposer de nouveaux produits sur le marché très rapidement, du concept à l'ingénierie en passant rapidement par la fabrication. (1)

5.7 Durabilité de la fabrication additive

La FA a un impact sur les trois grands domaines du développement durable : l'économie, l'environnement et durabilité sociale. Son impacts sur l'environnement découle des économies d'énergie et des économies de matériaux dans la FA comme indiqué dans la section précédente. Toutes les économies de matière sont également indirectement liées aux économies d'énergie (car elles éliminent la consommation d'énergie associée à la fabrication des matières premières), outre le fait que les structures FA sont légères dans l'aérospatiale et d'autres applications de transport entraînent des économies d'énergie tout au long de la vie du composant. La remise à neuf par la FA permet également de réaliser des économies de matière, de réduire les rebuts et de préserver les ressources naturelles, contribuant davantage à la durabilité environnementale. La durabilité sociale de la FA provient de l'amélioration de la qualité de la vie humaine et de l'augmentation de la satisfaction des consommateurs. Par exemple, les applications Ti-médicales utilisant la FA offrent l'opportunité d'une personnalisation spécifique au patient et donc d'une récupération améliorée qui peut avoir un impact très significatif sur la qualité de vie humaine et la satisfaction des patients. La durabilité économique est un résultat indirect des deux facteurs précédents, à savoir la durabilité environnementale et sociale, ainsi que le résultat de la réduction des coûts directs obtenue dans de nombreuses applications de titane grâce au traitement FA.

CHAPITRE VI : NOUVEAUX
DÉVELOPPEMENTS DANS LA FABRICATION
ADDITIVE DU Ti-6Al-4V

CHAPITRE VI : NOUVEAUX DÉVELOPPEMENTS DANS LA FABRICATION ADDITIVE DU Ti-6Al-4V

6.1 Introduction

Avec l'acceptation de la FA dans la fabrication principale, les chercheurs se concentrent sur l'exploitation des avantages supplémentaires de la FA: (1) la capacité de réaliser une seule pièce avec plusieurs matériaux et (2) l'application de revêtements résistants à l'usure sur les pièces en titane. Un exemple est le revêtement gradué de René 88, le revêtement Mo-WC sur le matériau Ti-6Al-4V et l'alliage de surface avec N, C ou B pour former des revêtements durs de TiN, TiC ou TiB intégralement réalisés avec des composants en titane 3D, il devrait offrir des propriétés supérieures par rapport aux pièces en titane traditionnelles revêtues de revêtements CVD ou PVD. La fabrication de composants multimatériaux nécessite le développement de contrôle de processus ainsi que le développement de capacités logicielles qui permettront de construire un seul objet avec plusieurs matériaux directement à partir des données CAO. Des alliages plus récents tels que les alliages Ti-Al contenant une teneur élevée en Nb sont également recherchés.

6.2 Recherche et développement en titane pour la fabrication additive

La modélisation mathématique et la simulation du processus FA ainsi que le développement de relations prédictives processus-structure-propriété en intégration avec les outils CAO / Engineering/ Fabrication est un domaine clé de la recherche en FA. Il est nécessaire de disposer de méthodes de calcul pour analyser les matériaux, les combinaisons de matériaux, et les concevoir afin de corréliser le matériau aux processus, de la structure à la propriété. Comprendre le processus de FA, l'historique thermique et le développement de la microstructure pendant la FA est essentiel pour un contrôle de processus meilleur et robuste dans le but d'obtenir des microstructures sur mesure. Comme la FA est un processus couche par couche, elle offre la possibilité de modifier les paramètres du processus et de créer les microstructures souhaitées dans les pièces. Des travaux sont en cours pour mieux comprendre l'effet de la modification de divers paramètres de processus et comment cela peut être mis en œuvre dans la création de pièces avec des microstructures conçues à divers endroits. De tels travaux ont déjà été initiés dans les alliages à base de Ni et peuvent également se poursuivre dans le titane FA. Des modèles prédictifs multi-échelles basés sur la physique qui tiennent compte de la précision géométrique, des propriétés spatiales des matériaux, des défauts, des caractéristiques de surface et d'autres variations ne sont actuellement pas disponibles pour la FA

6.3 Nouvelles initiatives de conception

La plupart des applications FA actuelles consistent à remplacer des composants existants qui ont été conçus pour d'autres processus de fabrication traditionnels (fabrication soustractive). Cela a souvent pour effet de limiter les avantages de la FA pour l'application particulière et parfois, de limiter l'application de la FA pour des composants particuliers. L'intégration de la fonction de conception - également connue sous le nom de conception pour la fabrication additive (DFAM) - avec un logiciel d'optimisation conduira à des processus plus prévisibles et à des produits de meilleure qualité. Lors d'un atelier sur la feuille de route organisé par la National Science Foundation (NSF), le DFAM a été caractérisé comme suit : synthèse de formes, de tailles, de mésostructures géométriques et de compositions de matériaux et de microstructures pour utiliser au mieux les capacités des processus de fabrication pour atteindre les performances souhaitées et d'autres objectifs du cycle de vie. Cela implique le besoin d'un logiciel de CAO qui permettra la conception de composants pour un processus

de FA particulier tout en réduisant la masse du composant, mais en répondant aux critères de conception requis.

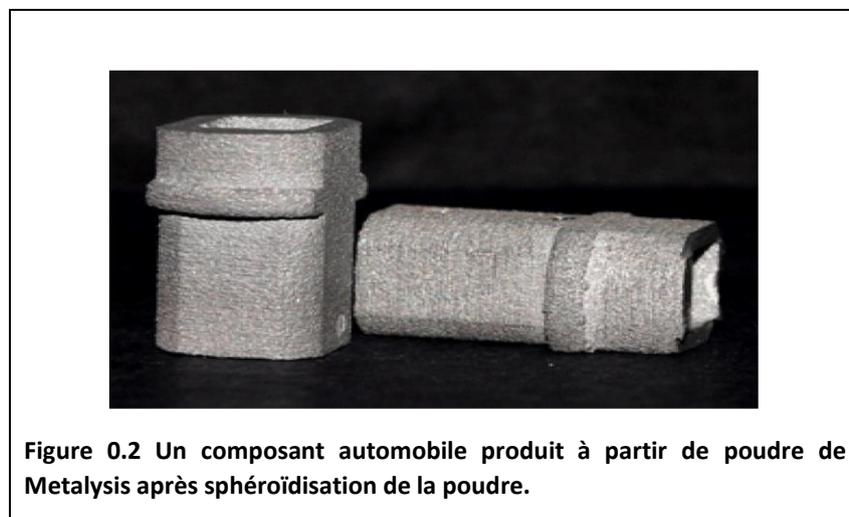
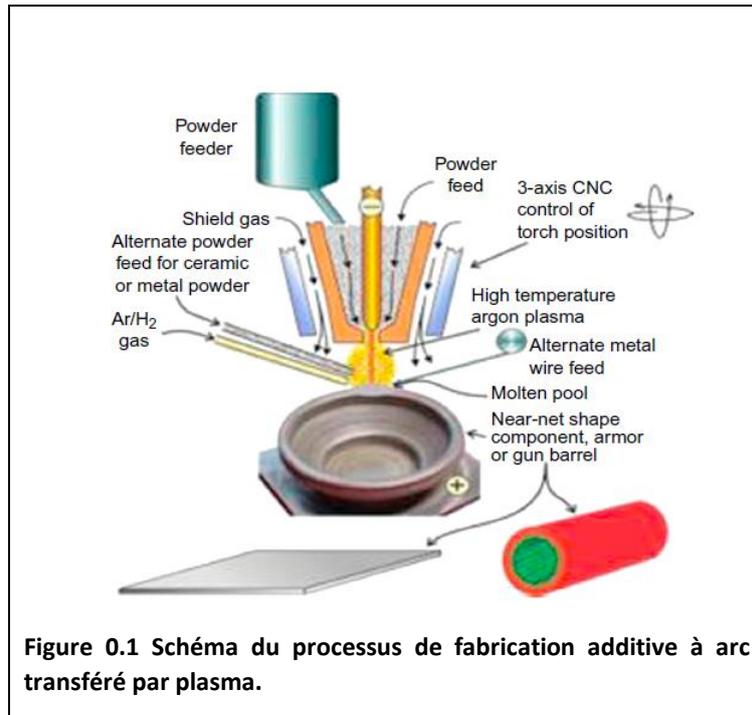
Des travaux sont en cours pour mieux intégrer les logiciels de CAO à divers processus de FA. La conception de structures de support efficaces pour les surplombs est un domaine de conception essentiel qui retient beaucoup l'attention.

Un autre domaine de recherche est le développement de logiciels pour l'interprétation des données d'imagerie CT / IRM, et la traduction ultérieure en données CAO pour créer des produits biomédicaux personnalisés, tels que des implants spécifiques au patient pour l'industrie orthopédique. Cependant, les systèmes CAO commercialisés sont mal adaptés pour modéliser des pièces avec des géométries très complexes (par exemple, des treillis ou des échafaudages) avec des milliers d'éléments de forme ou avec des distributions de matériaux, telles que des matériaux fonctionnellement gradués ou des constructions tissulaires. Lorsque plus de 1000 surfaces ou pièces sont modélisées, les systèmes de CAO ont tendance à fonctionner très lentement et à utiliser des centaines de mégaoctets ou plusieurs giga-octets de mémoire en raison de la nature de la technologie paramétrique CSG-BRep (constructive solid geometry-boundary representation). De même, Les systèmes CAO ont des limites dans la représentation de pièces avec plusieurs matériaux, ce qui constitue un obstacle à la modélisation de composants multimatériaux. (1)

6.4 Matière première à faible coût

La grande majorité des composants de FA en titane ont été fabriqués en utilisant de la poudre sphérique atomisée par gaz ou PREP (procédé d'électrode rotative au plasma) à coût élevé. Comme on le voit au chapitre 6, (Fig. 6.8), le coût des matières premières (principalement de la poudre) peut représenter près de 10% du coût global des composants. Alors que la FA continue d'évoluer, l'accent est mis sur la réduction du coût de la poudre pour en faire une solution alternative compétitive.

Des travaux récents ont démontré que les pièces en titane FA peuvent être produites avec succès en utilisant des poudres angulaires beaucoup moins coûteuses. Dans un programme, une éponge de titane a été mélangée avec de la poudre Al et V ou un alliage maître Al / V pour produire le Ti-6Al- 4V composition. Après le traitement de cette combinaison par un arc transféré au plasma (Figure 0.1), les propriétés de traction étaient aux niveaux coulés et forgés: 980MPa pour la résistance à la traction, 882MPa pour la limite élastique et 10% d'allongement. Dans d'autres travaux, la poudre angulaire de Metalysis a d'abord été convertie en une morphologie sphérique (bien que ce changement de morphologie puisse ajouter 154 \$ / kg au coût global de la poudre), puis fabriquée par FA. Un tel exemple est un turbocompresseur pour un moteur automatique illustré à la Figure 0.2. Fait intéressant, les principaux travaux sur la FA en titane à faible coût ont ciblé les applications automobiles, le faible coût est toujours une préoccupation majeure de l'industrie automobile. (1)



6.5 Capacités pour les grandes pièces

L'intérêt récent pour le titane FA s'est concentré sur des pièces aérospatiales plus grandes en utilisant la technologie DED. Des chercheurs du State Key Laboratory en Chine ont construit des bandes de recouvrement d'aile Ti-6Al-4V pour l'avion C919 avec FA. La longueur de bande est de 3100 mm. La durée de vie en fatigue à cycle élevé de cet échantillon serait plus élevée que celle de la pièce forgée. Outre, de grandes pièces de démonstration en titane pesant de 9 kg à 24 kg ont été fabriquées par le procédé WAAM à Cranfield Université, Royaume-Uni, pour l'industrie aérospatiale (Figure 0.3). La relaxation intermittente des contraintes utilisant des techniques telles que le grenailage par choc laser haute fréquence ou le grenailage par impact ultrasonique est à l'étude comme moyens potentiels d'atténuer la contrainte résiduelle, tout en traitant des pièces de grande taille.

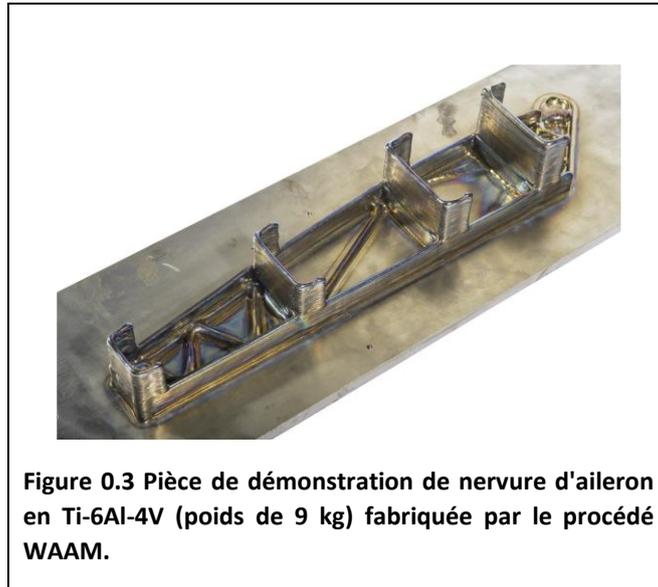


Figure 0.3 Pièce de démonstration de nervure d'aileron en Ti-6Al-4V (poids de 9 kg) fabriquée par le procédé WAAM.

6.6 Nouvelles technologies d'inspection

Un autre axe de recherche majeur pour la FA est dédié aux processus de surveillance, contrôle et inspection en ligne. Comme la FA implique une accumulation couche par couche, elle offre une opportunité unique pour l'inspection en ligne de chaque couche pendant la construction. Diverses enquêtes sont en cours pour développer des outils d'inspection en ligne pour les procédés de FA par ultrasons, Rayons X et autres outils. Une combinaison des dernières technologies de capteurs avec des algorithmes de contrôle prédictif ont permis d'obtenir une compensation pour la sur ou sous-construction d'une couche causée par des problèmes dus au chevauchement de trajectoires d'outil ou au captage de poudre (1). L'analyse spectroscopique en ligne du plasma de la cuve de fusion a donné des promesses de surveillance et éventuellement de contrôle de la chimie des matériaux de fabrication. Les domaines de développement suivants ont été identifiés comme hautement prioritaires du point de vue de l'inspection et du contrôle de la qualité :

- Manque de capacité pour la vidéo haute vitesse et le thermographe haute vitesse
- Manque de surveillance et de mesures des matériaux en temps réel
- Incapacité à effectuer une détection in situ des anomalies de traitement conduisant aux discontinuités : gradients thermiques, vides et inclusions
- Contrôle de rétroaction inefficace pour la composition des matériaux et la microstructure ; l'intégration des capteurs est impossible avec les contrôleurs de boîte noire actuels.

6.7 Utilisation projetée de la fabrication additive pour les composants en titane

L'industrie aérospatiale reconnaît depuis longtemps les avantages des alliages de titane à haute performance pour réduire le poids des structures de fuselage et des revêtements d'aéronefs, des appareils intérieurs, des composants de moteurs d'avion et des trains d'atterrissage des avions. Des alliages sophistiqués se trouvent dans les pales et les disques de ventilateur de moteur, les logements de palier avant, les aubes de compresseur et de turbine, les disques, les aubes et les tubes hydrauliques. Pour l'industrie aérospatiale (militaire et commerciale), l'utilisation potentielle de la

technique de FA est particulièrement intéressante en raison des rapports buy-to-fly élevés que l'on trouve souvent avec ces pièces (des nombres aussi élevés que 20 : 1 se produisent souvent).

Les alliages de titane sont en cours d'évaluation pour une utilisation dans les hanches et les genoux artificiels et l'ostéosynthèse (procédures chirurgicales qui stabilisent et réparent les os cassés à l'aide de dispositifs mécaniques tels que des plaques métalliques, des broches, des tiges, des fils ou des vis).

De nombreux équipementiers automobiles recherchent activement la FA en titane pour la fabrication de composants volumineux. Les exemples incluent les bielles, le pommeau de levier de vitesses, les soupapes, la roue de turbocompresseur, les ressorts de suspension, le système d'échappement et les vis de jante de roue. Si la fabrication de poudre de titane à faible coût et les processus FA à haut débit à base de PTA (arc transféré en plasma) deviennent réalité, la FA peut avoir une percée sur ce marché automobile hautement sensible aux coûts. (1)

Le besoin constant du secteur de la défense de réduire le poids des équipements a créé de nombreuses opportunités pour le titane. De l'armure balistique à composants du moteur et de la carrosserie, le titane est une alternative légère aux aciers dans un nombre croissant d'applications. Le besoin de la production à faible volume avec un coût par pièce plus élevé font de l'industrie de la défense un bon marché pour la FA. L'utilisation potentielle des poudres métalliques Ti dans la fabrication additive pour l'industrie de la défense (c'est-à-dire non aérospatiale) peut être potentiellement assez importante, mais difficile à prévoir.

Il peut également y avoir des applications pour les composants en titane fabriqués par FA dans l'industrie de transformation chimique et l'exploration / distribution de pétrole et de gaz, mais il n'est pas considéré que ceux-ci seront très étendus. Diverses autres industries étudient la possibilité d'utiliser la FA pour fabriquer des composants en titane.

À mesure que les technologies FA continuent de mûrir, les prix de la poudre de titane devraient baisser tandis que la vitesse du processus s'accélère. Une combinaison de ces facteurs stimulera la fabrication additive de titane et favorisera une croissance continue de cette technologie passionnante.

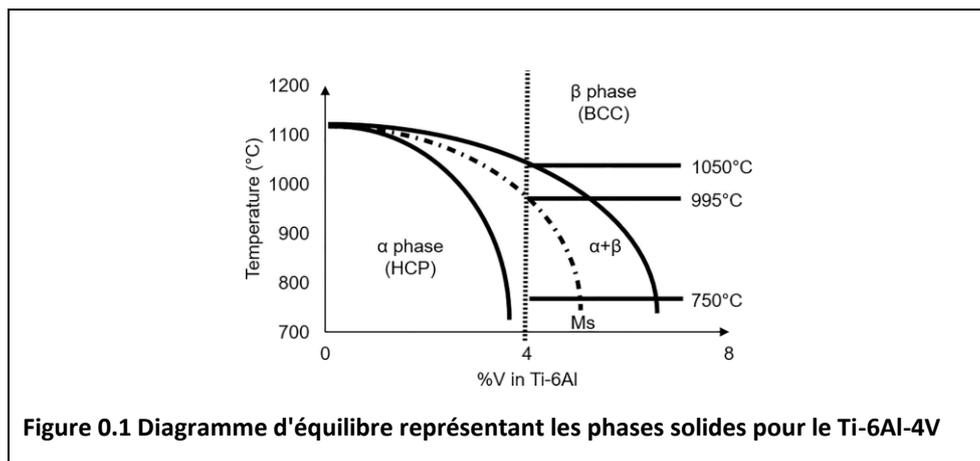
DEUXIEME PARTIE : ETUDE DES
PROPRIETES MICROSTRUCTURALES ET
MECANIQUES DE L'ALLIAGE Ti-6Al-4V
PRODUIT PAR FABRICATION ADDITIVE

CHAPITRE I :
MICROSTRUCTURE ET PROPRIETES
MECANIQUES

CHAPITRE I : MICROSTRUCTURE ET PROPRIETES MECANIQUES

6.1 Introduction

Les processus de FA impliquent une fabrication couche par couche qui conduit à de multiples cycles de chauffage et de refroidissement pour les couches inférieures. Cela signifie en d'autres termes la refusion de la ou des couches précédentes, et le réchauffage et les transformations de phase pour les couches situées en dessous. Pour un alliage de titane, le traitement inclut non seulement la transformation liquide en solide (β), mais également de la transformation CC- β en HC- α lors d'un refroidissement supplémentaire, l'évolution de la microstructure pendant le traitement FA est très complexe et est affectée par toute variation des paramètres de processus en relation avec la vitesse de refroidissement et de réchauffage. (voire la Figure 0.1)

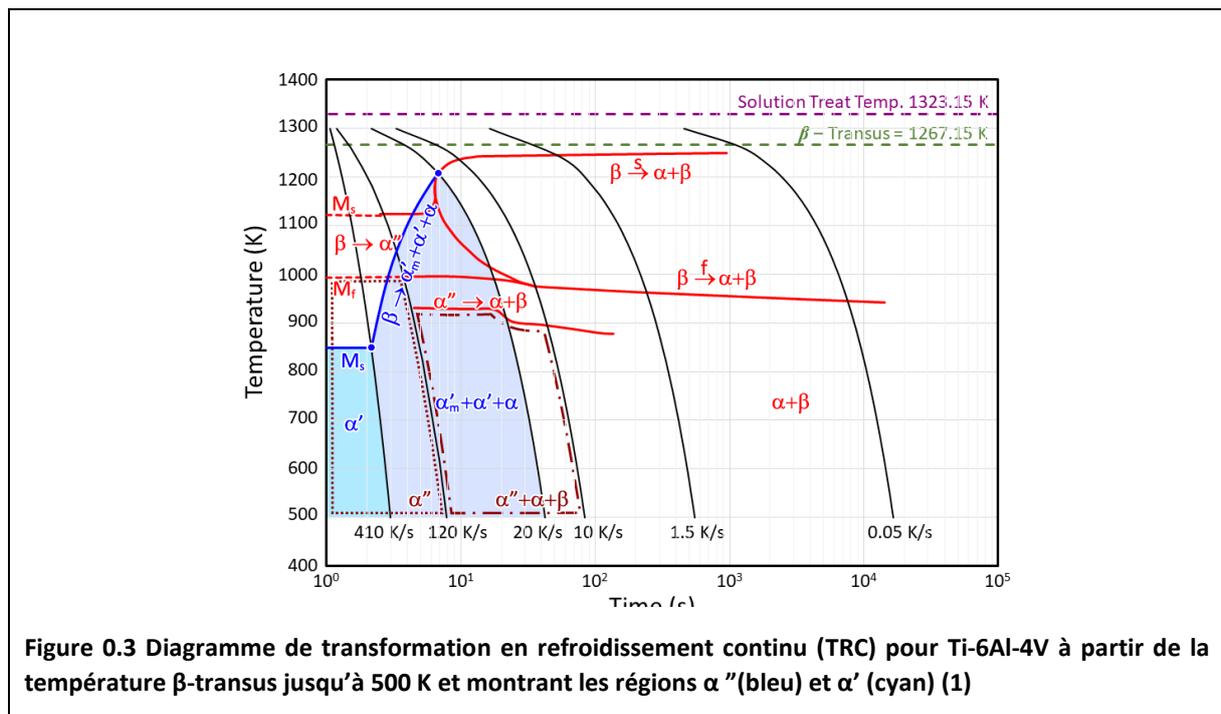
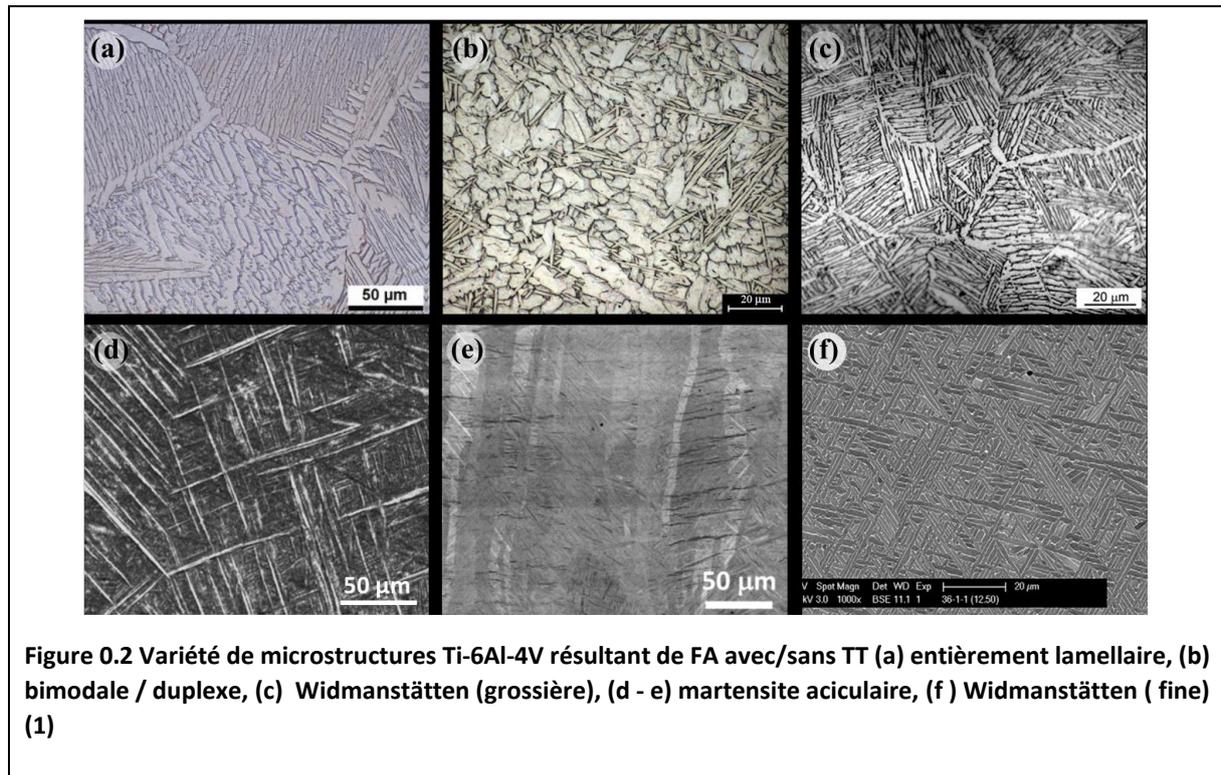


6.2 Caractéristiques microstructurales

6.2.1 Variétés microstructurales

Les microstructures du Ti-6Al-4V de FA typiques sont illustrées à la Figure 0.2 . On peut voir qu'avec le traitement thermique post-fabrication et / ou HIP, des microstructures similaires au Ti-6Al-4V forgé conventionnel peuvent être produites - telles que la structure entièrement lamellaire représentée sur la Figure 0.2a et structure duplex / bimodale représentée sur la Figure 0.2b. Sans traitements post-process, la microstructure du Ti-6Al-4V tel que construit fabriqué à partir de la fusion sur lit de poudre par faisceau d'électrons (EB-PBF) consiste généralement en une structure très fine de Widmanstätten / vannerie (Figure 0.2c) en raison de la des vitesses de refroidissement élevées ($10^3 \sim 10^5$ K / s) combinées avec des substrats chauffés par faisceau (~ 697 °C, supérieure à la température de décomposition des phases martensitiques). La FA au laser a des vitesses de refroidissement plus élevées ($10^4 \sim 10^6$ K / s) et des substrats de construction qui ne sont généralement pas chauffés comme dans les processus EB-PBF, et qui ont donc tendance à produire une structure martensitique, qui contient des caractéristiques aciculaires ultrafines (les Figure 0.2d et Figure 0.2e montrent phase martensite α' typique). Une structure Widmanstätten ultrafine (Figure 0.2f) peut également résulter de processus FA à base de laser, car le réchauffage répété pendant la construction des couches suivantes peut amener la température de la pièce au-dessus de la température de décomposition de la martensite. La microstructure du Ti-6Al-4V est déterminée par l'historique thermique spécifique qu'une région du matériau a connu, à savoir la fusion-solidification-réchauffage-refroidissement répétés pendant la construction FA et le traitement thermique post-construction. Ci-dessous, une

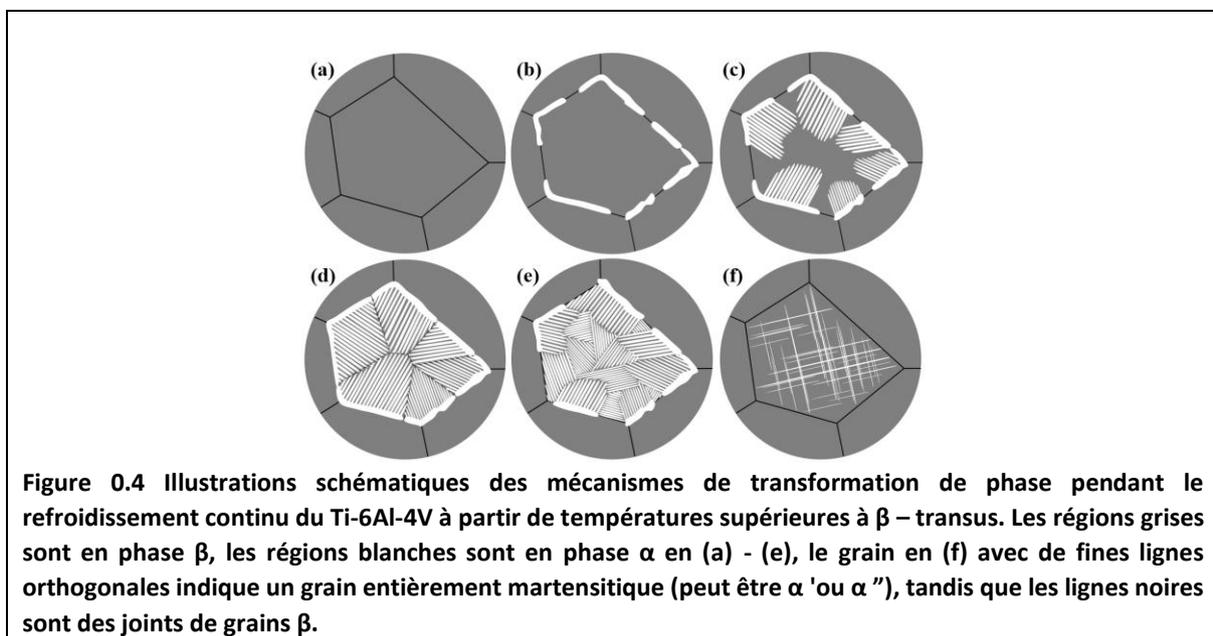
description du comportement de refroidissement continu et des phases résultantes du Ti-6Al-4V est fournie pour une large gamme de vitesses de refroidissement (de 0,05 K / s et moins à 410 K / s et plus sur la Figure 0.3), couvrant les scénarios typiques rencontrés pendant la FA et le TT post-fabrication.



6.2.2 Solidification

Au-dessus de la température de transus- β , Ti-6Al-4V est purement en phase CC (Figure 0.4a). La granulométrie de la phase β dépend de la vitesse de refroidissement entre les températures du liquidus et de solidus. La solidification dominée par la germination est favorisée sous des vitesses de refroidissement plus élevées et cela se traduit par des tailles de grains β plus petites, tandis que la solidification dominée par la croissance des grains β est favorisée sous des vitesses de refroidissement plus faibles, ce qui entraîne des tailles de grains β plus grandes.

Lorsque la température descend en dessous de la température β -transus (1267K), la germination commence par phase α -HC et croît le long des joints de grains et des points triples de la phase β schématiquement illustrée sur la Figure 0.4 b. La longueur de la phase α qui se forme aux limites des grains antérieurs de la phase β dépend de sa germination en fonction de sa vitesse de croissance et, dans une certaine mesure, de la taille du grain β antérieur. L'interface entre les phases α et β est semi-cohérente, c'est-à-dire qu'elle contient des dislocations inadaptées. Au fur et à mesure que le refroidissement se poursuit, la phase α germine et se développe à partir des frontières de cette phase (Figure 0.4c), ainsi qu'à partir des joints de grains β (si elle n'est pas complètement entourée de la frontière du grain α). Cette phase α se développe sous forme de plaques (lamelles). Dans de nombreux cas, il se produit à une vitesse qui perturbe la distribution des éléments d'alliage de telle sorte que les plaques voisines β germinent elles aussi, conduisant à une structure lamellaire de phases α et β . De telles structures sont souvent appelées colonies.

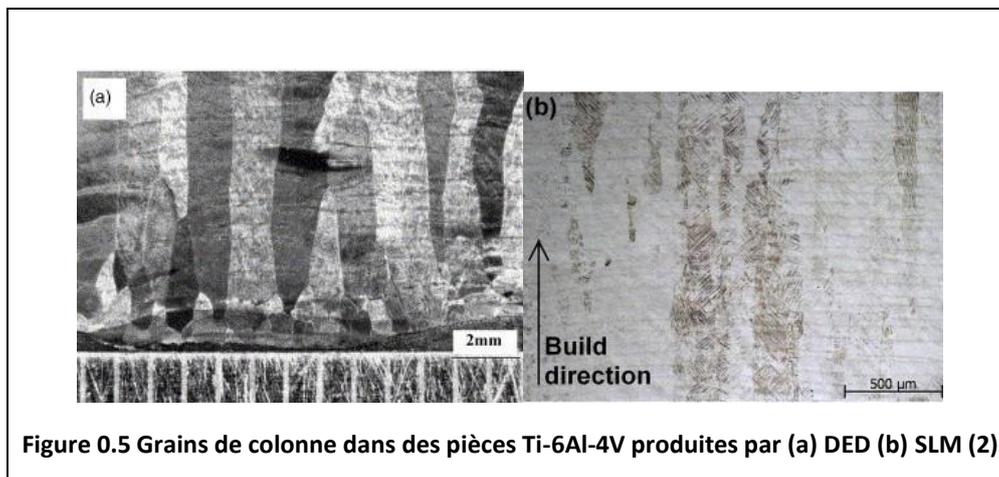


Si la vitesse de refroidissement est relativement faible, les colonies α se développent et rencontrent celles émanant du côté opposé du grain β , et une microstructure $\alpha + \beta$ entièrement lamellaire se forme (Figure 0.4d, Figure 0.4a). Dans ce cas, la taille des colonies est régie par la taille de grain β antérieur. À des taux de refroidissement accrus, la tendance à la germination de nouvelles colonies augmente et les colonies germinent à partir des colonies existantes. Cela conduit à une réduction de la taille moyenne des colonies. La microstructure résultante est souvent appelée Widmanstätten (Figure 0.4e), et est couramment observée dans les pièces FA Ti-6Al-4V. Dans l'ensemble, des taux de refroidissement plus élevés entraînent un «tissage» plus fin; par exemple, la microstructure de la Figure 0.2e (dépôt laser alimenté par fil, refroidissement plus rapide) est beaucoup plus fine que la

Figure 0.2 d (fusion du faisceau d'électrons, refroidissement plus lent) et contient des plaques α inter-saillantes qui indiquent une interruption / un développement médiocre des colonies α dues à la germination rapide de la phase α . Lors de la transformation de phase $\beta \rightarrow \alpha + \beta$, les éléments de stabilisation de phase α et β , à savoir respectivement Al et V, sont redistribués dans la phase respective. Si Ti-6Al-4V est refroidi à une vitesse suffisamment élevée, une transformation martensitique totale est attendue et α' ou α'' pur, ou une combinaison de phases α' et α'' , sont attendus comme le montre la Figure 0.4f. Le processus de transformation martensitique se produit sans diffusion ; et par conséquent, les phases résultantes ont la même composition que la phase β parente. La phase α' a une structure cristalline HC, mais avec des paramètres de réseau légèrement différents de α , tandis que la phase α'' a une structure orthorhombique à faces centrées (OFC).

6.2.3 Grains en colonne

les grains β -antérieurs montré sur la Figure 0.5, approximativement parallèles aux directions de croissance préférentielles des cristaux. Ceci est le résultat du début de la solidification à 1660 ° C, où la fusion passe dans une phase d'état cristallographiquement ordonnée caractérisée par une structure cristalline cubique centrée (CC). Cependant, dans la plupart des cas de Ti-6Al-4V, les branches secondaires ou d'ordre supérieur des grains de colonne dendritique se fusionnent, et la transformation élimine la morphologie originale du grain. Pour étudier la microstructure de solidification d'origine du Ti-6Al-4V fabriqué par FA, la technique de diffraction électronique rétrodiffusée (EBSD) est fréquemment utilisée. Le grain β -antérieur peut être caractérisé par le résultat de la reconstruction EBSD pour fournir les informations d'orientation cristalline et la morphologie approximative du grain également.



La raison pour laquelle les grains colonnaires traversent plusieurs couches est le comportement dit de « croissance épitaxiale » dans la FA. Du point de vue énergétique, cela économisera plus d'enthalpie libre si la germination commence à partir de grains partiellement fondus dans la couche précédente plutôt que d'en générer une nouvelle. Les grains nouvellement formés hériteront des informations cristallographiques telles que les orientations cristallines et la taille des grains des cristaux existants. Ceux dont la direction de croissance préférentielle s'aligne avec le gradient thermique ont tendance à se démarquer des autres grains dont la croissance est compétitive et à se développer encore plus grâce à ce processus de formation. Dans un alliage Ti-6Al-4V fabriqué par DED à titre d'exemple, l'épaisseur des grains de la colonne arrive à se développer au niveau millimétrique et peut-être vue à l'œil nu en raison de la différence visible en capacité d'absorption de la lumière entre les différentes orientations cristallines et limites des grains de la colonne.

La morphologie des grains colonnaires dans les échantillons FA conduit à des propriétés mécaniques anisotropes à l'état tel que construit. En fonction de la direction de solidification par rapport à l'orientation morphologique des grains colonnaires, des différences de ductilité ont également été découvertes dans les éprouvettes de test fabriquées horizontalement et verticalement. Pour éliminer l'effet défavorable des grains de la colonne, de grands efforts ont été faits pour obtenir la morphologie des grains équiaxes en étudiant le phénomène de transition colonnaire à équiaxe (CET) à l'aide de modèles numériques.

6.2.4 Germination et croissance épitaxique

En terme de germination dans la FA, la croissance épitaxique est un phénomène courant. Par exemple, un monocristal peut traverser plusieurs couches de dépôt de matériau dans des échantillons de Ti-6Al-4V fabriqués par DED.

Dans certains cas, les grains de la colonne se développent même sur toute la longueur de la pièce imprimée. Si l'on considère le cristal partiellement fondu comme le substrat pour démarrer la germination, il y aura une compatibilité parfaite entre les phases solide et liquide. Théoriquement, il n'y a pas de barrière d'énergie de germination et l'angle de mouillage est nul. Cela signifie qu'il y a peu ou pas de noyaux nouvellement formés dans le processus de dépôt de matière. Ainsi, la germination instantanée peut également être négligée, et les grains de colonne croissent directement par épitaxie à partir d'un substrat. Cependant, des facteurs externes tels que les impuretés, les défauts et la recristallisation sont la principale raison de l'apparition de nouveaux noyaux dans la FA. Ces facteurs externes, difficiles à prévoir pendant le processus, fourniront également des positions de germination supplémentaires et modifieront la microstructure.

6.2.5 Composition de phase

Les cycles thermiques dans le procédé FA entraînent généralement une composition de phase qui change le long de la direction de construction (Figure 0.6). Diverses conditions de composition en phase solide ainsi que les couches de dépôt nouvellement ajoutées peuvent être décrites comme dépendant de la position dans les « cartes » microstructurales basées sur des relations connues de l'histoire thermique et de l'évolution microstructurale. Des études montrent également que la microstructure α' entraîne une faible ductilité et que la taille de la colonie α est également un facteur déterminant pour les propriétés mécaniques. En appliquant des traitements thermiques pour décomposer α' en microstructures constituées de phases α et β (c.-à-d. Microstructure lamellaire), la ductilité peut être améliorée de manière significative. (1)

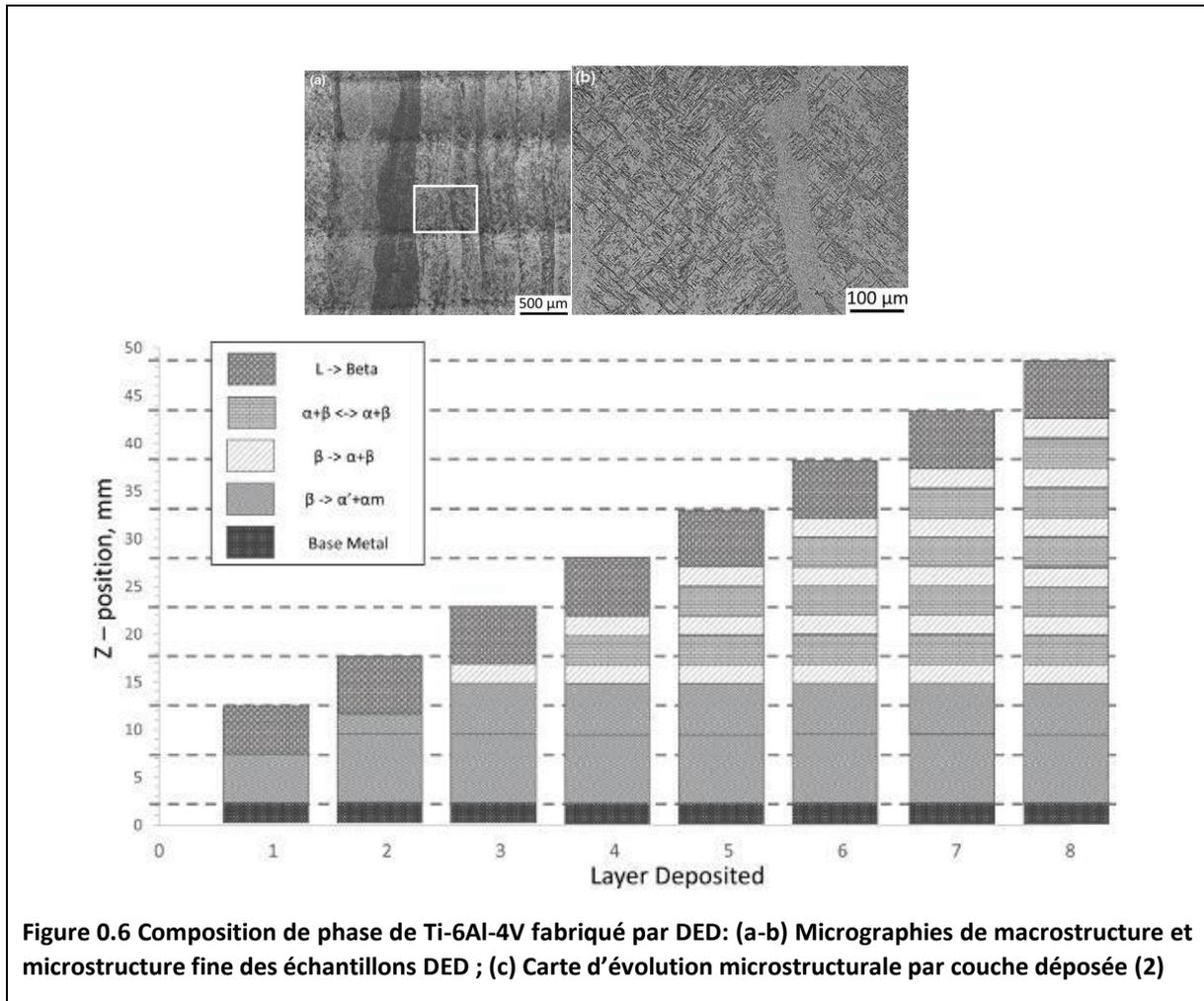


Figure 0.6 Composition de phase de Ti-6Al-4V fabriqué par DED: (a-b) Micrographies de macrostructure et microstructure fine des échantillons DED ; (c) Carte d'évolution microstructurale par couche déposée (2)

6.3 Influence du traitement post-fabrication

Comme indiqué au chapitre 3, de nombreuses applications impliquant la FA des alliages Ti nécessitent une opération de pressage isostatique à chaud (HIP). La Figure 0.7 montre la microstructure du matériau issu du processus DMD sans et avec le traitement HIP. La microstructure brute montre la structure α' martensitique typique attendue pour Ti-6Al-4V refroidi rapidement à partir de la phase β , tandis que celle du matériau traité (HIP + vieillissement) montre les joints de grains attendus β et les plaques grossières inter-granulaires α . Cette transition d'état microstructural dans le matériau traité est également reflétée par ses propriétés mécaniques. Alors que la résistance à la traction et limite élastique sont un peu plus faible après HIP et vieillissement, la ductilité s'améliore considérablement en raison du changement de la microstructure : de la structure martensitique à la structure β transformée (α précipité). Un autre avantage du HIP est la décomposition de la structure de solidification en colonne et l'évolution de la microstructure équiaxe conduisant à un comportement isotrope amélioré du matériau entre la direction de construction et sa normale (voir Tableau 0.1).

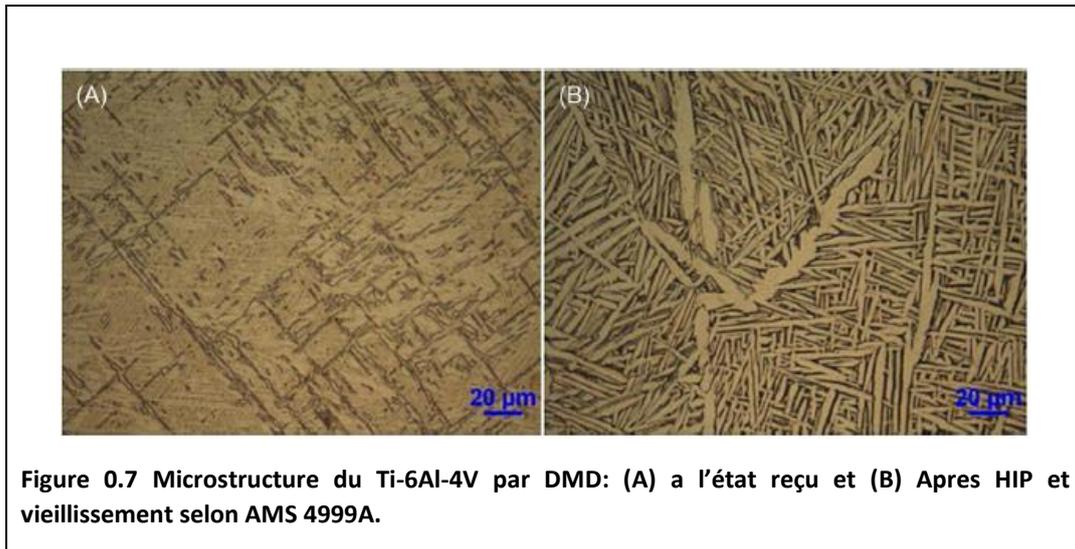


Tableau 0.1 Comportement en traction du Ti-6Al-4V le long de la direction de fabrication et suivant la normale à cette direction

Direction de l'essai	Limite élastique (Mpa)	Résistance ultime (Mpa)	Allongement (%)
selon X-Y	881	971	15.7
Selon Z (⊥ X-Y)	864	950	14.4

6.4 Evolution de la prédiction microstructurale du Ti-6Al-4V de la FA

Le Ti-6Al-4V est l'un des matériaux FA les plus couramment étudiés, car une caractérisation expérimentale suffisante est disponible dans la littérature pour comparer et valider les résultats de la modélisation.

En appliquant la méthode des automates cellulaires – éléments finis (CAFE), Zhang et al. a prédit l'historique thermique du Ti-6Al-4V à 25 couches de DED et a simulé la morphologie du grain β en 2D. Zinovieva et coll. a simulé en outre l'orientation cristallographique des grains β résultants en utilisant la méthode CAFD. Les méthodes CA appliquées dans les deux études ci-dessus ont permis de prédire la morphologie et la texture des grains à l'échelle mésoscopique, mais n'ont pas pu prendre en compte la transformation de phase à l'état solide.

L'historique thermique et la distribution de la température affectent non seulement la morphologie et l'orientation des grains, mais également la microstructure à l'intérieur des grains β . Baykasoglu et coll. et Irwin et al. a appliqué l'équation de Johnson – Mehl – Avrami – Kolmogorov (JMAK) pour calculer la croissance concurrente des microstructures de lattes et de colonies. Plusieurs constructions Ti-6Al-4V fabriquées avec différents traitements DED des paramètres ont été utilisés pour valider les résultats de calcul obtenus pour diverses conditions de traitement, révélant une bonne concordance. Un modèle de fraction de phase similaire a également été adopté par Vastola et al., Avec l'ajout d'une formation martensitique et d'une décomposition.

L'approche de la variable d'état interne est une méthode qui prend la densité comme approche de de modélisation et qui calcule la fraction de chaque phase. Pour la modélisation microstructurale dans les

processus de FA, cette approche est la plus couramment appliquée en combinaison avec le modèle de largeur de latte développé par Charles et Jarvstrat. Elle a été utilisée pour prédire l'évolution de la microstructure dans Ti-6Al-4V, la fraction résultante des phases α et β et l'épaisseur de latte correspondante. (1)

Bien que l'approche de la variable d'état interne puisse prédire quantitativement la transformation de phase à diverses étapes de solidification et de refroidissement au cours du processus, elle n'offre pas d'informations sur la morphologie ou la taille des grains. Les modèles de champ de phase (PFM) intègrent la mobilité aux limites des grains et peuvent prédire non seulement les morphologies des grains mais également la formation de la texture. Dans le modèle PF multi-échelles développé par Ji et al., L'ensemble du modèle d'évolution de la microstructure a été découpé en trois sous-modèles à différentes échelles de longueur : un thermomécanique macroscopique modèle par FEM, un modèle microscopique de solidification et de croissance des grains par PFM pour prédire la morphologie β -antérieure, et un modèle de transformation de phase à l'état solide pour prédire le β en transformation. Le modèle a pu prédire la morphologie des grains colonnaires β pour diverses épaisseurs de couche et vitesses de balayage, et la morphologie α / α' dans un monocristal β à diverses vitesses de refroidissement.

Les méthodes Cinétiques de Monte-Carlo (KMC) ont été utilisées pour simuler la microstructure pour le moulage, le frittage et le soudage. Elles sont également capables de modéliser le changement de microstructure pendant la recristallisation et la croissance des grains. Mishra et DebRoy ont utilisé le model de MC pour prédire la taille des grains dans la ZAT en raison de la solidification et de la croissance des grains dans le Ti-6Al-4 V pendant le soudage. Les modèles ont montré un potentiel d'utilisation pour simuler des réparations à l'aide de la FA, en particulier sur du métal traité avec une ZAT. Les modèles thermiques sont également couplés avec MC pour prédire structures des grains en soudage. Cependant, les modèles n'ont pas été validé par rapport aux données expérimentales. (1)

La méthode KMC est donc adaptée pour étudier la microstructure développée au fond du bain de fusion. Les microstructures du processus sont comparées par rapport à un paramètre, soit, la vitesse de balayage illustrée à la Fig. La taille moyenne des grains colonnaires dans la zone de fusion et des grains équiaxes dans la zone affectée par la chaleur a été étudiée et comparée quantitativement aux expériences. Cela peut être attribué à l'efficacité de calcul de la méthode KMC (kinetic monte Carlo) qui peut être lancée dans des échelles de temps et de longueur expérimentalement accessibles fournissant un résultat de simulation pratique. En raison de la croissance épitaxiale des grains dans la FA, la croissance des grains du liquide vers la phase solide est simplement traitée comme héritant des informations des grains partiellement fondus selon la direction maximale du flux thermique. Dans les couches de dépôt, la croissance des grains est simulée par les modèles KMC comme la migration des joints de grains causée par le temps MC. (1)

- Comparaison des différents modèles de simulation microstructurale

Une comparaison de l'échelle de longueur et de la précision des différents modèles est présentée dans la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** . Plus l'échelle de longueur est petite, plus le pas de temps de simulation nécessaire est petit, ceci à une grande quantité de données créées. Les modèles à plus haute précision ont tendance à avoir plus d'équations et de variables à résoudre, ce qui nécessite plus de ressources de calcul. En général, les modèles précis ont de petites échelles de longueur, des pas de temps courts limitant ainsi le volume que le modèle peut simuler. Les modèles PFM simulent quelques dendrites tandis que les modèles CA et MC simulent la structure des grains.

En comparant les modèles, la PFM donne non seulement des formes de dendrites réalistes, mais il tient également compte de la distribution du soluté entre les bras de la dendrite. Lorsqu'elle est combinée avec des bases de données des courbes TTT et TRC, la PFM peut non seulement avoir des détails très précis sur la distribution des solutés et les formes et tailles des dendrites, mais également prédire la composition des diverses compositions intermétalliques, la transformation et la croissance des précipités. Tous les modèles PFM pour FA étaient en 2D et ne simulaient que quelques dendrites. Cela est probablement dû aux ressources de calcul requises, ce qui rend les modèles 3D longs et de haute complexité computationnelle. Le CA a été modélisé en 3D et s'est avéré plus efficace et plus rapide que la PFM tout en ayant des résultats similaires, cependant, des simulations sont également effectuées sur un petit nombre de dendrites. En comparaison, CA et MC ont été utilisés pour simuler plusieurs pistes et couches capturant uniquement les grains, produisant ainsi des résultats tels que la taille des grains, le rapport hauteur/ largeur et les angles de grain CA (1). Une comparaison de tous les modèles est présentée dans le Tableau 0.2.

Tableau 0.2 Comparaison entre les différents modèles de prédiction microstructurale

méthode	Complexité computationnelle	avantages	défis
Champ de phase (PF)	Très élevée	Permet la simulation de la solidification et de la transformation de phases à l'état solide	N'est pas adéquate à grande échelle
Automate cellulaire (CA)	Moyenne à élevée (dépend de l'échelle)	Permet la prédiction de texture cristallographique. Simule la transformation de phases à l'état solide	Le maillage CA peut introduire une anisotropie artificielle La pression du model dépend de l'échelle
Cinétique de Monte-Carlo (KMC)	moyenne	Permet la simulation sur un large domaine (des centaines de couches)	Ne peut pas simuler la transformation de phases à l'état solide Ne prend pas en compte l'effet de l'accumulation de température pendant l'addition de couches sur la géométrie du bain de fusion Ne permet pas la prédiction de la texture cristallographique pour le moment
Variable d'état interne	basse	Permet une prédiction quantitative des fractions de phase	Ne permet pas la prédiction de la formation de texture cristallographique

6.5 Propriétés mécaniques

6.5.1 Comportement en traction

Les propriétés de traction du Ti-6Al-4V fabriqué par un certain nombre de techniques FA sont illustrées à la Figure 0.8. Résistance à la traction, limite d'élasticité et allongement de l'alliage Ti-6Al-4V construit à l'aide de divers procédés FA. Tous les processus font preuve de force de niveaux supérieurs ou comparables au matériau conventionnel (coulé, forgé, et recuit travaillé). Les matériaux tels que construits dans les processus laser, tels que DMD, LENS et DMLS, présentent moins de ductilité en raison de la formation de la phase α' de martensite, cependant, la ductilité peut être améliorée grâce à une opération ultérieure de traitement HIP et / ou un traitement thermique. En raison de la réduction de la contrainte résiduelle et de la microstructure α - β . Le Ti-6Al-4V traité par EBM montre une plus grande ductilité par rapport au Ti-6Al-4V.

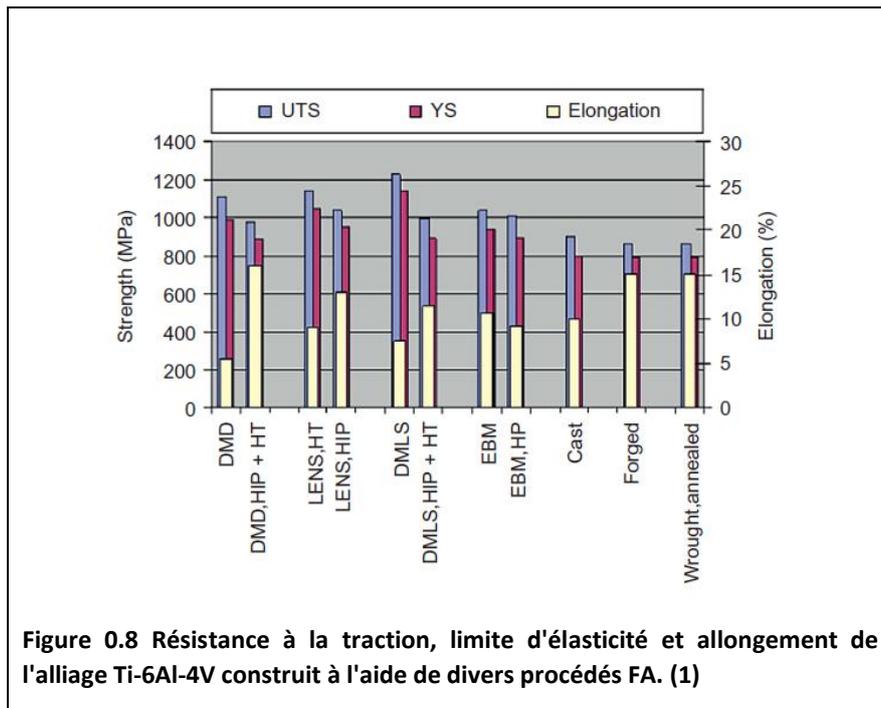
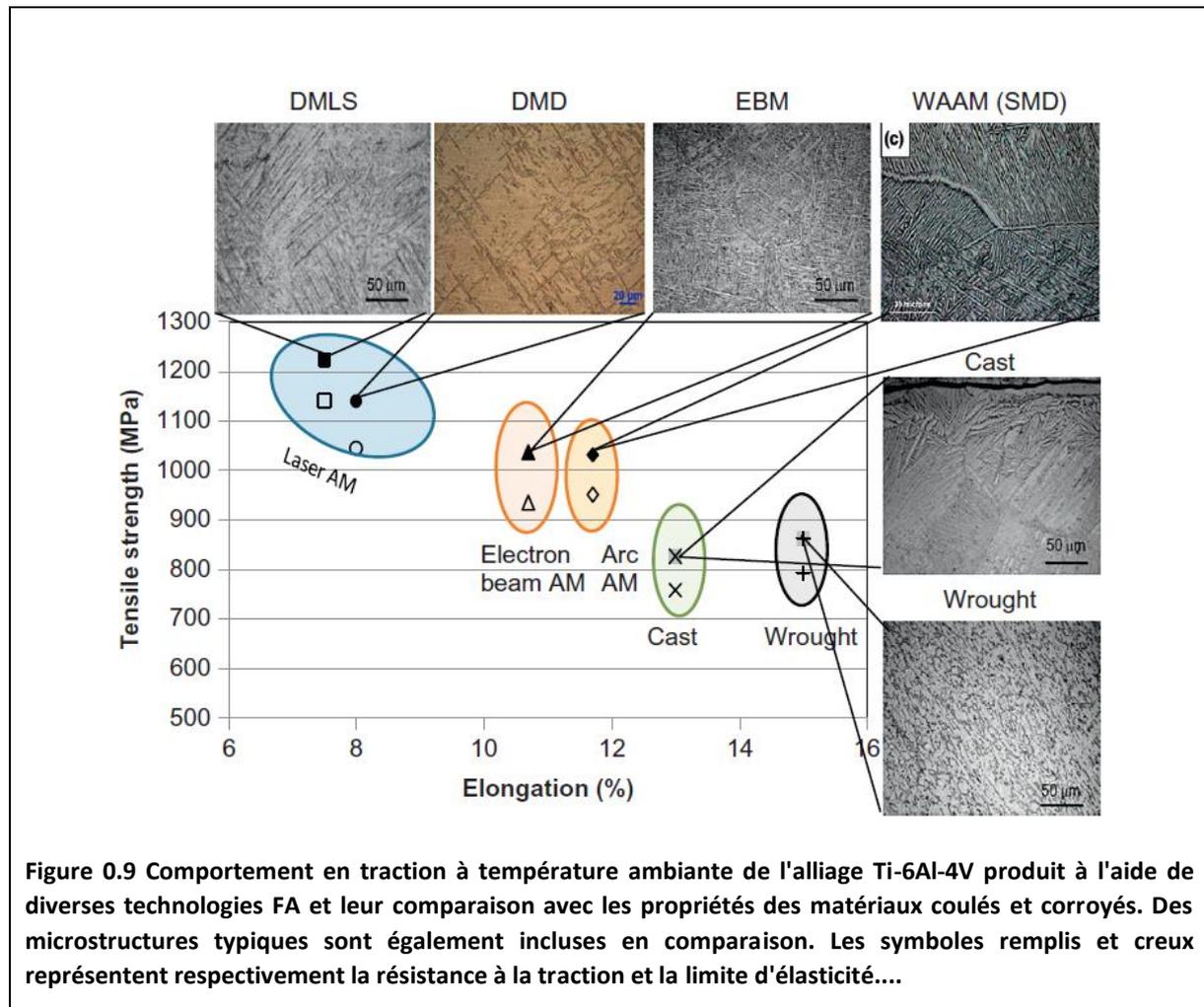


Figure 0.8 Résistance à la traction, limite d'élasticité et allongement de l'alliage Ti-6Al-4V construit à l'aide de divers procédés FA. (1)

La Figure 0.9 Comportement en traction à température ambiante de l'alliage Ti-6Al-4V produit à l'aide de diverses technologies FA et leur comparaison avec les propriétés des matériaux coulés et corroyés. Des microstructures typiques sont également incluses en comparaison. Les symboles remplis et creux représentent respectivement la résistance à la traction et la limite d'élasticité....montre les microstructures typiques de l'alliage Ti-6Al-4V à l'état reçu à partir de divers procédés FA. Les propriétés de traction correspondantes (résistance à la traction UTS et limite élastique YS) sont également tracées en fonction de l'allongement pour montrer l'effet de la microstructure sur les propriétés mécaniques. De toute évidence, les technologies à base de laser offrent une résistance supérieure et une ductilité inférieure en raison de la formation d' α' -martensite résultante d'un refroidissement rapide. Les matériaux traités par faisceau d'électrons présentent une microstructure α - β en raison d'un refroidissement plus lent dans une atmosphère sous vide et un substrat chaud, et se traduisent par une résistance à la traction inférieure et une ductilité plus élevée. En comparaison, la microstructure est plus grossière dans le matériau tel que coulé tandis que le matériau corroyé a une microstructure α - β équiaxe. Le matériau traité à l'arc (WAAM) offre une microstructure similaire

à la structure coulée, mais avec une échelle de longueur plus fine. L'effet de ces différentes microstructures est bien démontré dans leur comportement en traction.

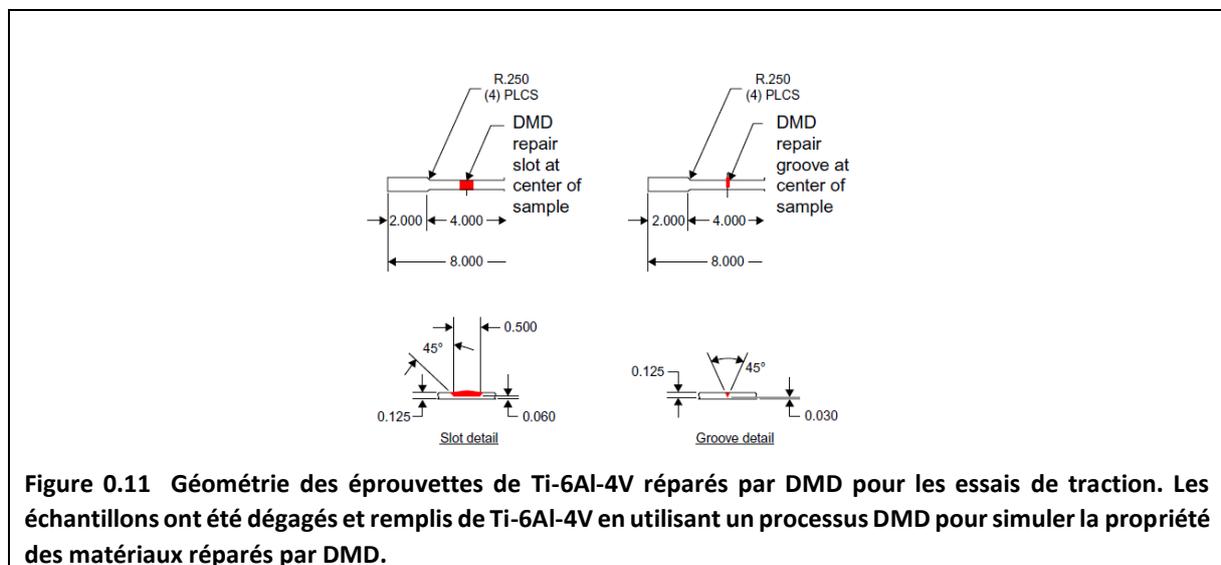
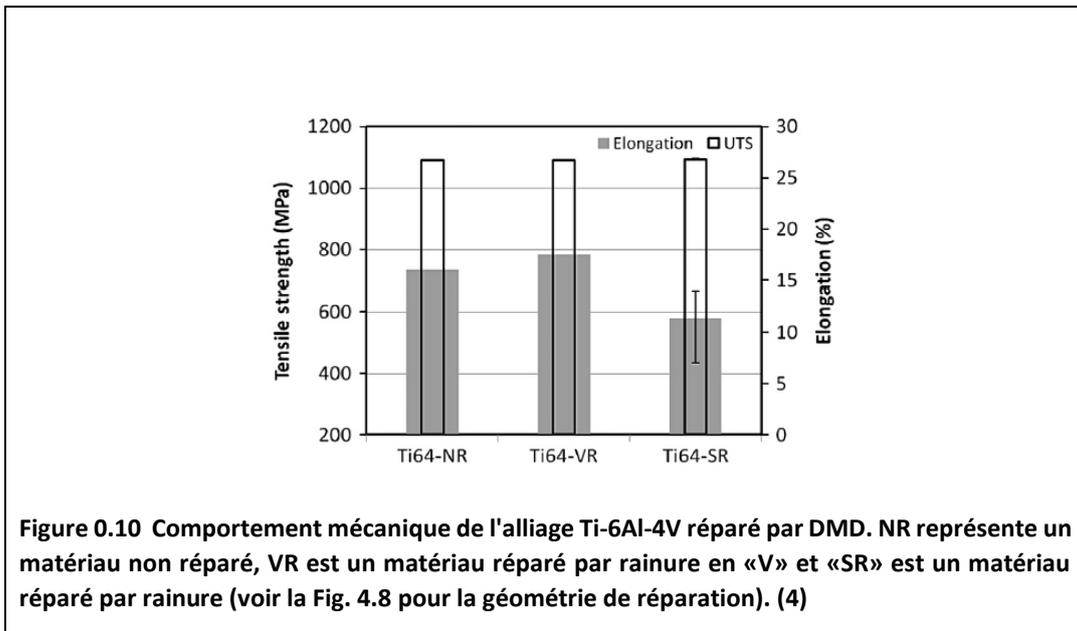


La relation entre l'anisotropie microstructurale et la texture cristallographique, avec la direction de construction, et leur effet sur le comportement en traction a été étudié dans différents travaux. Alors qu'une forte orientation de des grains β antérieurs le long de la direction de construction est observé dans tous les matériaux Ti-6Al-4V traités par FA, la relation entre la direction de construction et la texture cristallographique n'est pas très bien établie. Certains chercheurs rapportent que les grains β croissent dans la direction [100] le long de la direction de fabrication et opposée à la direction du transfert de chaleur. Ils ont en outre observé que la solidification en phase β et la transformation subséquente en phase α suivant la relation de Burgers aboutissent à une texture α , où les figures des pôles HC ressemblent aux figures des pôles CC. D'autres n'ont signalé aucune texture cristallographique claire après transformation en phase α et α' . Une ductilité inférieure en traction a été observée lorsque des échantillons ont été testés le long de la direction X ou Y. La ductilité réduite a été attribuée à la phase α -HC moins ductile présente le long des joints de grains β antérieurs et de la normale à l'axe de traction pour ces échantillons.

Les technologies DED offrent l'avantage de la réparation et de la remise à neuf de pièces endommagées ainsi que la fabrication hybride où les caractéristiques sont ajoutées sur des pièces et préformes existantes (telles que des pièces moulées de forme simple, des extrusions, des pièces forgées, etc.).

Par conséquent, il est d'un intérêt considérable d'examiner les propriétés de ces réparations et les ajouts de caractéristiques. La Figure 0.11 montre la géométrie des échantillons de Ti-6Al-4V qui ont été dégagés et rainures remplies à l'aide du processus DMD au centre de la longueur de la jauge des échantillons de traction. « VR » représente la réparation d'une rainure en V 45° de 1,5 mm de large et «SR » représente la réparation d'une zone de 12,5° mm au centre du spécimen.

La Figure 0.10 montre que les rainures en « VR » et «SR » des échantillons de Ti-6Al-4V réparés présentent une résistance à la traction comparable à celle de l'échantillon Ti-6Al-4V forgé non réparé «NR ». Ces données de traction démontrent le comportement mécanique du matériau réparé par DMD et représentent les réparations effectuées dans les zones d'étanchéité des composants des moteurs à réaction, tels que les carters.



6.5.2 Comportement en fatigue

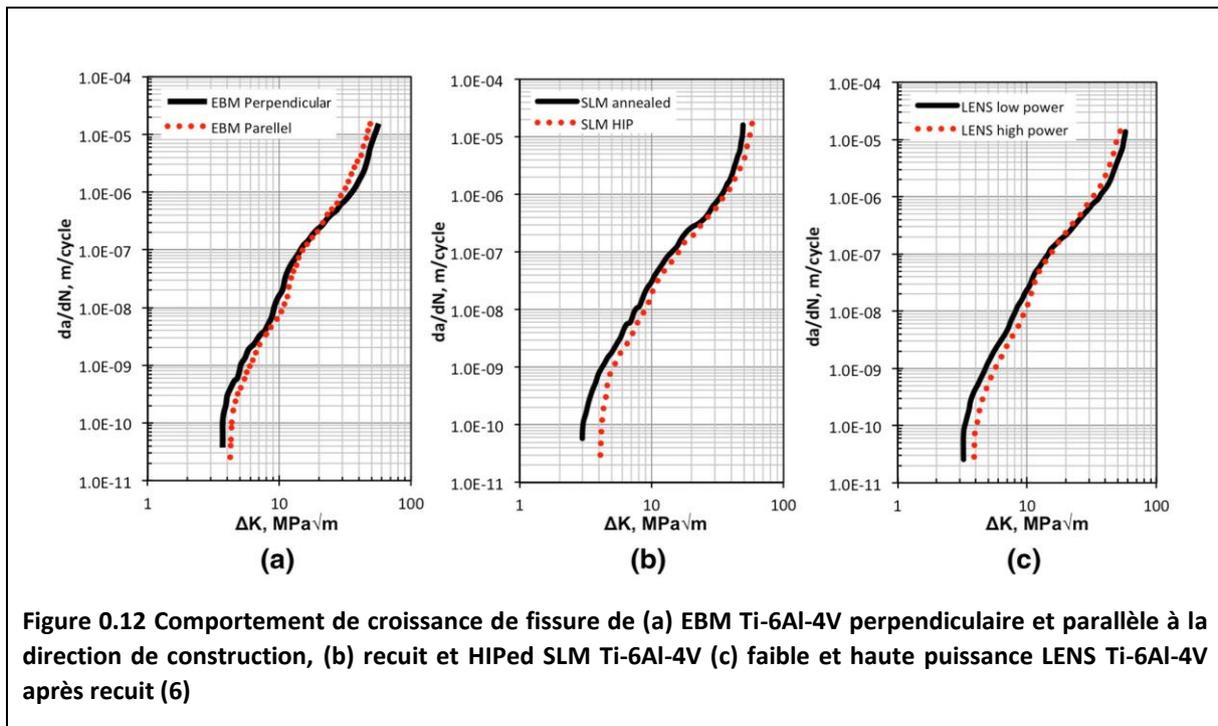
Compte tenu de ses origines physiques, le comportement en fatigue du Ti-6Al-4V de FA est très sensible à de nombreuses variables associées au procédé de fabrication additive. La microstructure unique ainsi que les défauts associés aux pièces Ti-6Al-4V fabriquées par FA rendent la prévision de la durée de vie en fatigue intrinsèquement plus difficile par rapport au Ti-6Al-4V forgé. À ce stade, un examen approfondi de la caractérisation du comportement en fatigue Ti-6Al-4V, est nécessaire pour détailler non seulement la nature complexe du comportement en fatigue vis-à-vis de la FA mais aussi le degré de performance de fatigue observés pour différents processus de FA. Comprendre les relations procédé-structurepropriété et leur lien avec le comportement en fatigue des pièces Ti-6Al-4V est essentielle pour l'avancement de la technologie de fabrication additive.

COMPORTEMENT DE CROISSANCE DE FISSURE DE FATIGUE DU Ti-6Al-4V par FA

La croissance des fissures de fatigue du Ti-6Al-4V par FA est une considération de conception critique affectée par plusieurs paramètres, notamment l'anisotropie microstructurale, le processus FA et les traitements post-fabrication. Même si elles ne sont pas exhaustives, ces variables de contrôle ont été abordées dans la littérature et les principales conclusions sont résumées ici.

- Effets des processus de fabrication et de l'anisotropie sur la croissance des fissures de fatigue

Galarraga et al. et Leuders et al. ont montré que la croissance des fissures de fatigue dans la direction parallèle à la direction de construction a un seuil de facteur d'intensité de contrainte plus élevé pour la croissance des fissures de fatigue (ΔK_{th}) que celle dans la direction perpendiculaire à la direction de fabrication (par exemple, EBM Ti-6Al-4V sur la Figure 0.12a). La fissure perpendiculaire à la direction de construction se propage le long des couches de balayage et coupe directement à travers les joints de grains antérieurs β sans interaction considérable avec eux. Cependant, pour une fissure qui pousse dans la direction parallèle à la direction de construction, les joints de grains antérieurs β agissent comme un défecteur de fissures. La structure du grain en colonne ramifie également la fissure, ce qui entraîne un taux de croissance de fissure plus lent dans la région I et la région inférieure II dans la direction parallèle. Cependant, une vitesse de croissance des fissures plus rapide a été trouvée dans la direction parallèle dans la région supérieure II et la région III, conduisant à une ténacité plus faible en raison de la grande quantité de joints de grains β -anterieurs affaiblis disponibles pour la propagation des fissures. Les effets opposés ont été observés dans le cas perpendiculaire. (1)



La Figure 0.12 montre le comportement de croissance des fissures du Ti6Al-4V fabriqué par EBM, SLM et LENS. L'une des propriétés de croissance des fissures les plus importantes est le seuil de croissance des fissures, ΔK_{th} . Comme le montrent les figures a et b, le Ti-6Al-4V traité par EBM a un ΔK_{th} plus élevé que celui du traité traité par SLM à l'état recuit (4 MPa√m contre 3 MPa√m). Le Ti-6Al-4V par EBM a une latte α relativement plus épaisse avec un rapport hauteur / largeur plus petit en raison de la vitesse de refroidissement plus lente pour ce processus qui se déroule sur une plate-forme chauffée (600 à 700 °C), qui recuit les pièces déposées en continu. En revanche, les procédés laser (SLM et LENS) produisent des α' et des lattes avec un rapport d'aspect très élevé en raison de la vitesse de refroidissement élevée et de la température inférieure de la plate-forme de fonctionnement. Un ΔK_{th} plus élevé était obtenu pour le LENS Ti-6Al-4V produit avec une puissance laser élevée, comme le montre la Figure 0.12c.

- Effet du traitement de post-fabrication

Diverses méthodes FA et combinaisons de traitement post-traitement donnent du Ti-6Al-4V avec différentes épaisseurs de lattes en raison de leurs historiques thermiques respectifs. Dans les travaux de Leuders et al., le ΔK_{th} a augmenté progressivement de 1,5 à environ 6 MPa√m avec le grossissement des grains par le biais du traitement des pièces à l'état reçu. Par exemple, la figure b indique que la pression isostatique à chaud (HIP) a augmenté le ΔK_{th} du SLM Ti-6Al-4V de 3 MPa√m à 4 MPa√m. Galarraga et al. ont rapporté que le traitement de recuit de β élimine l'anisotropie microstructurale et les différences entre la croissance des fissures de fatigue dans différentes directions, tout en améliorant le seuil de croissance des fissures de fatigue et la ténacité à la rupture.

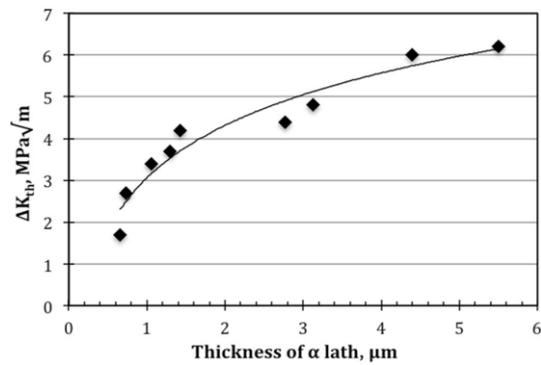


Figure 0.13 La relation entre ΔK_{th} et une épaisseur de grain Ti-6Al-4V obtenue à partir de divers procédés FA (6)

Le Ti-6Al-4V fabriqué de manière additive a une microstructure Widmanstätten très fine. La petite taille des grains favorise une déformation plus homogène, par conséquent la germination des fissures est retardée en raison des concentrations de contraintes réduites dans la microstructure fine homogène. D'autre part, la fissure se développe beaucoup plus rapidement une fois que la zone plastique est libérée des joints grain, ce qui facilite la croissance des fissures dans les grains plus petits. Ainsi, le Ti-6Al-4V à microstructure fine aura un ΔK_{th} beaucoup plus faible. Cependant, des grains plus gros nécessitent des écarts plus importants du trajet de la fissure par rapport au plan de contrainte de traction maximale, ce qui favorise un glissement plus hétérogène, et moins de dislocations par unité de surface seront nécessaires pour sortir des bandes de glissement actives pour s'adapter aux déformations, ralentissant l'accumulation des dommages et entraînant à des seuils plus élevés. (voir Figure 0.13)

La Figure 0.14 indique que la résistance à la fatigue du Ti-6Al-4V fabriqué par EBM augmente d'environ 100 MPa à l'état d'origine à 600 MPa après traitement. L'alliage a une résistance à la fatigue de 200 MPa à l'état reçu par SLM, qui augmente à 300-500 MPa en usinant la surface rugueuse inhérente jusqu'à 700 MPa après HIP et polissage. Une nette amélioration des propriétés en fatigue a été observée pour les échantillons lisses après HIP, qui sont comparables aux meilleurs résultats du Ti-6Al-4V forgé à l'état recuit.

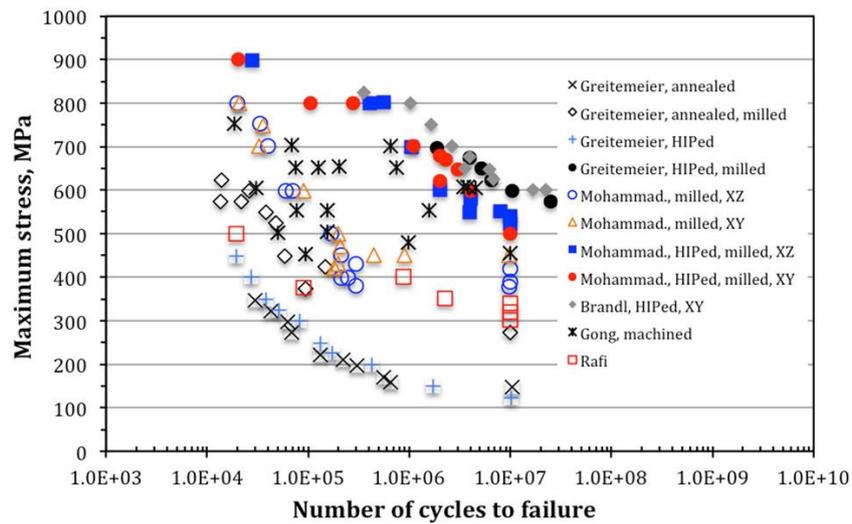


Figure 0.14 Comportement en fatigue du Ti-6Al-4V fabriqué par EBM dans différentes conditions (1)

- Effet de la rugosité de la surface sur le comportement en fatigue

Les propriétés en fatigue des éprouvettes telles que construites indiquent que la rugosité de surface a le plus fort effet négatif sur les performances en fatigue. Les éprouvettes telles que fabriquées ont échoué exclusivement à cause de défauts de surface dus à une rugosité de surface élevée, avec une résistance à la fatigue <20% de la résistance à la traction du matériau. Les fissures sont toujours initiées à partir de la racine de la surface rainurée entre les couches. Le HIP élimine presque toute la porosité interne; cependant, les effets de la réduction des défauts internes sont négligeables par rapport aux effets de rugosité de surface inhérents au procédé. Une rugosité de surface inférieure par SLM est la principale raison de la limite de fatigue plus élevée, environ 200 MPa, par rapport à <150 MPa pour les matériaux EBM à l'état reçu, comme indiqué dans la Figure 0.15.

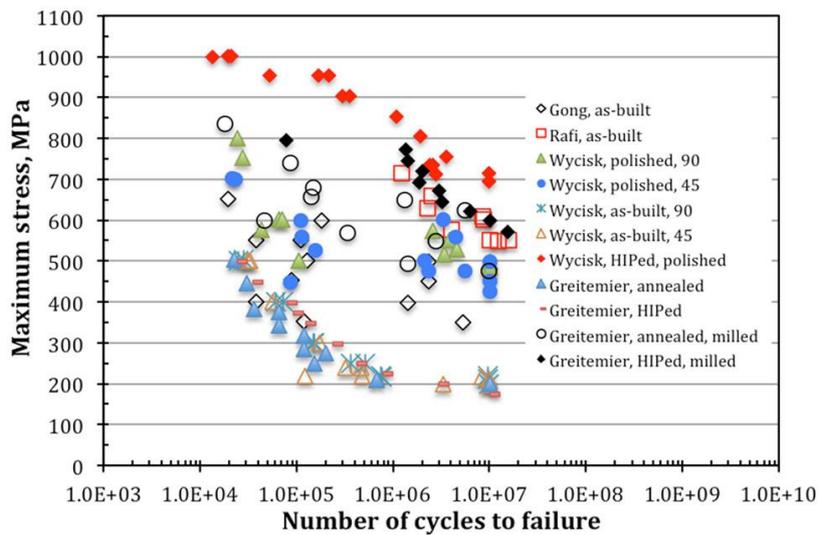


Figure 0.15 Comportement en fatigue de Ti-6Al-4V fabriqué par SLM dans différentes conditions (1)

En raison de l'effet négatif significatif de la rugosité de surface, de nombreuses études ont été menées en mettant l'accent sur la diminution de la rugosité de surface en utilisant différentes poudres et en optimisant les paramètres de traitement.

Greitemeier et coll. a reporté que Les propriétés de fatigue à cycle élevé sont dominées par la rugosité de surface. Une estimation de la durée de vie en fatigue basée sur l'approche EIFS (equivalent initial flaw size) semble être une approche appropriée pour estimer l'influence de la rugosité de surface sur la résistance à la fatigue. (1)

CONCLUSION

Ce travail donne une vue d'ensemble sur les différents aspects de la FA du Ti-6Al-4V dans le but de permettre à un ingénieur fraîchement gradué de se lancer dans ce terrain très prometteur. Ainsi, les points suivants présente l'essentiel de ce qui pourrait être recueilli de ce travail :

- L'optimisation dans la production des poudres pour la FA comprend les techniques de sphéroïdisation des poudres irrégulières afin de contourner au cout élevé des poudres sphériques obtenues par les procédés classiques. L'amélioration des propriétés des poudres en grands lots de production ou la conversion vers des procédés sans fusion sont aussi des sujets d'actualité. La fabrication couche par couche dans la FA, nécessite un contrôle étroit du processus de production et de manipulation de la poudre.
- Deux catégories de procédés, largement utilisées dans la FA du Ti-6Al-4V, sont : PBF et DED. Le 1^{er} fonctionne par balayage d'une source de chaleur sur un lit de poudre, tandis que le 2^{ème} utilise l'injection de matière dans un bain de fusion. Par conséquent, un control de la couche et du débit de poudre sont essentiels pour le PBF et le DED respectivement.
- Une vitesse de refroidissement relativement faible pendant la solidification conduit à une microstructure lamellaire. L'augmentation de cette vitesse conduit à la germination des groupes de lamelles à partir des colonies existantes, ce qui donne une microstructure de Widmanstätten. Des vitesses de refroidissement, plus élevée, notamment dans les procédés par laser, mènent à des microstructures martensitiques, d'où la ductilité plus faible et la résistance à la traction plus élevée dans ces procédés.
- La croissance épitaxiale engendrée par le dépôt de couches consécutives dans la FA, qui permet aux grains colonnaires (monocristaux) de traverser plusieurs couches de dépôt, et la composition de phases qui change le long de ces couches, conduisent à des propriétés mécaniques anisotropes, d'où la nécessité d'un TT et HIP pour obtenir une microstructure equaxés et améliorer l'isotropie de la structure.
- Développer un modèle de simulation robuste et précis pour décrire le comportement de croissance des grains dans un bain de fusion en mouvement est toujours un défi pour la simulation en FA métallique. Un aperçu des méthodes de simulation de microstructure indique qu'il est en effet important de développer un modèle intégré et généralisé pour la FA, en fonction de la géométrie du bain de fusion et de la microstructure résultante
- La SLM est la technique préférée pour la fabrication de Ti-6Al-4V avec des performances en fatigue plus élevées à l'état reçu, en raison de sa meilleure rugosité de surface. Cependant, la résistance à la fatigue du Ti-6Al-4V par FA n'est suffisante pour des applications critiques en fatigue l'application que lorsqu'un HIP, usinage et polissage de surface, soient appliqués.
- La FA est un moyen attractif pour la fabrication des petits lots par rapport aux techniques de fabrication conventionnelle. L'élimination des besoins d'outillage réduit non seulement le coût par pièce, mais réduit également considérablement les délais de fabrication, ce qui se traduit directement par des avantages économiques significatifs. Cependant, un débit relativement plus faible rend la FA moins attrayante pour la fabrication à grand volume.
- À mesure que les technologies FA continuent de mûrir, les prix de la poudre de titane devraient baisser tandis que la vitesse du processus s'accélère. Une combinaison de ces facteurs

stimulera la fabrication additive de titane et favorisera une croissance continue de cette technologie passionnante.

Bibliographie

1. *Defence News*. 10 juin 2013.
2. *Powder metallurgy of titanium alloys, Advances in powder metallurgy*. (Sam), . Froes FH. s.l. : Woodhead Publishing;, 2013.
3. Beaman JJ, Barlow JW, Bourell DL, Crawford RH, Marcus HL, McAlea KP. *Solid freeform fabrication: a new direction in manufacturing*. New York : Springer, 1997.
4. Lutjering G, Williams JC. *Titanium*. Berlin : Springer, 2003.
5. Froes, Ma Qian and Francis H. (Sam). *Titanium Powder Metallurgy*. 2015.
6. Andrew J. Fenn, Graham Cooley, Lee Smith. Exploiting the FFC Cambridge process. *ADVANCED MATERIALS & PROCESSES*. 2004.
7. *Additive manufactured Ti-6Al-4V using welding wire: comparison of laser and arc beam deposition and evaluation with respect to aerospace*. Brandl E, Baufeld B, Leyens C, Gault R. 2010, Physics Procedia.
8. Benefits of Wire vs. Powder Metal 3D Printing. *SCIAKY INC*. [En ligne] [Citation : 2020 07 15.] <https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/wire-vs-powder>.
9. Cooke A, Slotwinski J. *Properties of metal powders for additive manufacturing: a review of the state of the art of metal powder property testing*. s.l. : NISTIR 7873, 2012.
10. International, ASTM. *Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion*. West Conshohocken, PA, 2014.
11. *The Additive Manufacturing (AM) of titanium alloys*. Froes (Sam) F.H, Dutta B. 2017, Metal Powder Report.
12. Moylan S, Slotwinski J, Cooke A, Jurrens K, Donmez MA. *Lessons learned in establishing the NIST metal additive manufacturing laboratory*. 2013.
13. Materialise Magics. *Materialise*. [En ligne] <https://www.materialise.com/en/software/magics>.
14. DM3D. [En ligne] http://www.dm3dtech.com/index.php?option=com_content&view=article&id=194&Itemid=817.
15. LENS Systems – 3D Printed Metals. *Optomec*. [En ligne] <http://www.optomec.com/3d-printed-metals/lens-printers/>.
16. 3D systems. [En ligne] https://www.3dsystems.com/3d-printers#metal-printers?utm_source=phenix-systems.com&utm_medium=301.
17. Additive Manufacturing, Laser Sintering and Industrial 3D Printing . eos. [En ligne] <https://www.eos.info/en/industrial-3d-printing/additive-manufacturing-how-it-works>.
18. GE. Arcam EBM. *GE Additive*. [En ligne] <https://www.ge.com/additive/who-we-are/about-arcam>.
19. *Direct Metal Laser Sintering, Identification of process phenomena by optical in-process monitoring*. Grünberger T, Domröse R. 2015, Laser Technik Journal.

20. *Process Monitoring of 3D Metal Printing in Industrial Scale*. Mohammad hossein Amini, Shing I. Chang. College Station, TX : 13th International Manufacturing Science and Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2018.
21. *Approach to qualification using E-PBF in-situ process monitoring in Ti-6Al-4V*. 2019, Additive Manufacturing.
22. *Additive manufacturing of titanium components: an update*. Froes, F.H. (Sam). 2018, Metal Powder Report.
23. *Applicability of existing materials testing standards for additive manufacturing materials*. John A. Slotwinski, Shawn P. Moylan. 2014, NIST Interagency/Internal Report (NISTIR).
24. Chee Kai Chua, Chee How Wong, Wai Yee Yeong. Measurement Science Roadmap. *Standards, Quality Control, and Measurement Sciences in 3D Printing and Additive Manufacturing*. 2017.
25. *An additive manufacturing test artifact*. Moylan S, Slotwinski J, Cooke A, Jurens K, Donmez MA. 2014, NIST.
26. *Solidification Microstructure Simulation of Ti-6Al-4V in Metal Additive manufacturing: A review*. Jinghao Li, Xianglin Zhou, Mathieu Brochu, Nikolas Provas, Yaoyao Fiona Zhao. 2019, Additive manufacturing.
27. *A Review of the Fatigue Properties of Additively Manufactured*. Cao, F., Zhang, T., Ryder, M. A., Lados, D.A. 2018.
28. *Effect of surface roughness on fatigue performance of additive manufactured Ti-6Al-4V*. Greitemeier, D., Dalle Donne, C., Syassen, F., Eufinger, J., Melz, T. 2016, Materials Science and Technology.
29. additive manufacturing . eos. [En ligne] <https://www.eos.info/en/industrial-3d-printing/additive-manufacturing-how-it-works>.
30. manufacturing the future. [En ligne] <http://www.manufacturingthe.org/>
31. Arcam. [En ligne] <http://www.arcam.com/technology/additive-manufacturing/>.
32. DM3D. [En ligne] <http://www.dm3dtech.com/index.php/expertiseinnovations/experticeandinnovationsdmddtechnology..>
33. *Additive manufacturing of titanium components: An up-date*. Froes, F.H.(Sam). 2018, Metal Powder Report.
34. *Porous Titanium for Dental Implant Applications*. Wally, Z.J., et al. 2016, Metals.
35. *Comparative Analysis of the Oxygen Supply and Viability of Human Osteoblasts in Three-Dimensional Titanium Scaffolds Produced by Laser-Beam or Electron-Beam Melting*. Jonitz-Heincke A, Wieding J, Schulze C, Hansmann D, Bader R. 2013, Materials.
36. *Next Generation Orthopaedic Implants by Additive Manufacturing Using Electron Beam Melting*. Murr LE, Gaytan SM, Martinez E, Medina F, Wicker RB. 2012, International journal of biomaterials.
37. *Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing* . Thomas DS, Gilbert SW. 2014, NIST.

38. *Case study: additive manufacturing of aerospace brackets*. Dehoff R, Duty C, Peter W, Yamamoto Y, Chen W, Blue C. 2013, *Advanced materials processing*.
39. *Roadmap for additive manufacturing identifying the the future of freeform processing*. Bourell DL, Leu MC, Rosen DW. 2009, NIST.
40. *Review on Computational Modeling of Process–Microstructure–Property Relationships in Metal Additive Manufacturing*. 2019, The Minerals, Metals & Materials Society.
41. *Microstructure modelling for metallic additive manufacturing: a review*. Joel Heang Kuan Tan, Swee Leong Sing & Wai Yee Yeong. 2019, *Virtual and Physical Prototyping*.
42. M. Ashraf Imam, F. H. (Sam) Froes and Ramana G. Reddy. There is Low Cost Titanium Componentry Today. *key engineering materials*. 2013.
43. *Case Study: Additive Manufacturing of Aerospace Brackets*. R. Dehoff, C. Duty, W. Peter, W. Chen, C. Blue, Cory Tallman. 2013, *Advanced materials and processes* .
44. LPW Technology: AM materials specialist expands into metal powder production. *Metal AM*. [En ligne] <https://www.metal-am.com/articles/lpw-technology-expands-into-metal-powder-production-for-3d-printing/>.
45. *Additive Manufacturing by Direct Metal Deposition*. Bhaskar Dutta, S. Palaniswamy, Juneho Choi. 2011, *Advanced Materials and Processes*.