

---

# FABRICATION ADDITIVE MÉTALLIQUE TECHNOLOGIES ET OPPORTUNITÉS

---

---



Etude financée par Normandie AeroEspace

Réalisation : INSA Rouen  
Département Mécanique et Centre Commun d'Usinage

Avril 2015

*Normandie AeroEspace, filière d'excellence en Normandie, regroupe l'ensemble des acteurs industriels et académiques qui travaillent sur les secteurs de l'aéronautique, du spatial, de la défense et de la sécurité. Elle travaille sur quatre axes spécifiques (Business et Performance - Communication - Emploi et Formation - Recherche, Technologie et Innovation). C'est dans le cadre de la Recherche, Technologie et Innovation que NAE a identifié le potentiel important de la fabrication additive. Cette nouvelle technologie est une réelle révolution et permet de relever de nouveaux défis technologiques sans précédents. Que ce soit sur un axe matériau ou plus largement dans le cadre de l'usine du futur, la fabrication additive est un réel levier de croissance mais de nombreux travaux de recherche sont encore à mener afin de perfectionner cette nouvelle technologie.*

*C'est pourquoi Normandie AeroEspace a voulu s'associer à l'INSA de Rouen dans l'objectif de dresser un état des lieux de cette nouvelle technologie aussi bien sur un plan économique que scientifique.*

*Ce document, se veut être un outil afin de vous aider dans votre choix de développement vers ce nouveau process de fabrication. Il permettra d'appréhender les avantages mais aussi les risques d'une telle technologie et ainsi vous donner les clefs pour vous développer dans la fabrication additive métallique.*

*Les acteurs qui ont œuvré dans la réalisation de cette étude bibliographique restent bien entendu à votre disposition pour vous informer et vous renseigner sur vos questions éventuelles.*

*Vous souhaitant une très bonne lecture, j'espère que ce document vous apportera une vision globale de la fabrication additive métallique."*

Samuel CUTULLIC

Responsable RTI de Normandie AeroEspace

Cette étude a été réalisée par Clément Margueray et Loïc Volland, sous la direction de Thomas Breteau en collaboration avec Fabrice Barbe, dans le cadre des activités du Département Mécanique INSA Rouen, et du Centre Commun d'Usinage INSA Rouen.

Contacts scientifiques : Thomas.Breteau@insa-rouen.fr  
Fabrice.Barbe@insa-rouen.fr

Contacts commerciaux : **ARCAM**, Ryberg L. : lars.ryberg@arcam.com  
**BeAM**, Schehr F. : fs@beam-machines.com  
**Multistation** (revendeur Optomec, SLM Solution, Arcam)  
Soury-Lavergne H. : henri.soury-lavergne@multistation.com  
**Optomec**, Kardos M. : mkardos@optomec.com

# Table des matières

|          |                                                                                                                                                        |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>La Fabrication Additive (FA)</b>                                                                                                                    | <b>6</b>  |
| 1.1      | La fabrication additive en quelques mots . . . . .                                                                                                     | 6         |
| 1.2      | Enjeux économiques . . . . .                                                                                                                           | 6         |
| 1.3      | Principales technologies . . . . .                                                                                                                     | 8         |
| <b>2</b> | <b>Fusion/frittage laser sur lit de poudre</b>                                                                                                         | <b>9</b>  |
| 2.1      | Principe de la fusion/frittage laser sur lit de poudre . . . . .                                                                                       | 9         |
| 2.1.1    | Distinction entre fusion et frittage . . . . .                                                                                                         | 9         |
| 2.1.2    | Fusion par faisceau d'électrons . . . . .                                                                                                              | 10        |
| 2.2      | Géométrie des pièces . . . . .                                                                                                                         | 10        |
| 2.3      | Matériaux utilisés . . . . .                                                                                                                           | 11        |
| 2.4      | Constructeurs et machines . . . . .                                                                                                                    | 12        |
| 2.4.1    | Arcam . . . . .                                                                                                                                        | 12        |
| 2.4.2    | 3D Systems . . . . .                                                                                                                                   | 12        |
| 2.4.3    | EOS . . . . .                                                                                                                                          | 13        |
| 2.4.4    | SLM Solutions . . . . .                                                                                                                                | 13        |
| 2.4.5    | Machines et caractéristiques dimensionnelles . . . . .                                                                                                 | 14        |
| 2.5      | Analyse économique . . . . .                                                                                                                           | 14        |
| 2.5.1    | Coût d'investissement machine . . . . .                                                                                                                | 14        |
| 2.5.2    | Coût consommables (matière) . . . . .                                                                                                                  | 14        |
| 2.6      | SWOT fusion/frittage sur lit de poudre . . . . .                                                                                                       | 15        |
| <b>3</b> | <b>Fusion/frittage laser par projection de poudre</b>                                                                                                  | <b>16</b> |
| 3.1      | Principe de la fusion/frittage laser par projection de poudre . . . . .                                                                                | 16        |
| 3.2      | Caractéristiques des dépôts laser par projection . . . . .                                                                                             | 16        |
| 3.3      | Géométries réalisées . . . . .                                                                                                                         | 17        |
| 3.3.1    | Géométries en fabrication 3D directe . . . . .                                                                                                         | 18        |
| 3.3.2    | Géométries en rechargement / réparation . . . . .                                                                                                      | 18        |
| 3.3.3    | Géométries en rechargement / réparation . . . . .                                                                                                      | 19        |
| 3.4      | Matériaux utilisés . . . . .                                                                                                                           | 19        |
| 3.5      | La projection de poudre appliquée au cas du rechargement (ajout de forme sur pièce support, rechargement de pièces à haute valeur ajoutée. . . ) . . . | 20        |
| 3.5.1    | Rappel des différentes techniques de rechargement métallique . . .                                                                                     | 20        |
| 3.6      | Comparaison entre le rechargement laser et le TIG . . . . .                                                                                            | 21        |
| 3.7      | Constructeurs . . . . .                                                                                                                                | 24        |
| 3.7.1    | BeAM . . . . .                                                                                                                                         | 24        |
| 3.7.2    | DMG Mori Seiki . . . . .                                                                                                                               | 25        |
| 3.7.3    | Trumpf . . . . .                                                                                                                                       | 25        |
| 3.7.4    | Optomec . . . . .                                                                                                                                      | 26        |
| 3.7.5    | Machines et caractéristiques dimensionnelles . . . . .                                                                                                 | 26        |
| 3.8      | Analyse économique . . . . .                                                                                                                           | 27        |
| 3.8.1    | Coût d'investissement machine . . . . .                                                                                                                | 27        |
| 3.8.2    | Coût consommables . . . . .                                                                                                                            | 27        |
| 3.9      | SWOT fusion/frittage par projection de poudre . . . . .                                                                                                | 28        |

|          |                                                                              |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4</b> | <b>Process d'obtention d'une pièce par fabrication additive</b>              | <b>29</b> |
| 4.1      | Préparation de l'état de surface devant accueillir le dépôt de matière . . . | 29        |
| 4.2      | Prise en compte de la géométrie de la pièce . . . . .                        | 29        |
| 4.3      | Génération des programmes ISO et stratégie de fabrication . . . . .          | 30        |
| 4.4      | Opérations de post-traitement . . . . .                                      | 31        |
| 4.5      | Qualification de la pièce . . . . .                                          | 32        |
| <b>5</b> | <b>Comparaison des technologies et analyse SWOT</b>                          | <b>33</b> |
| 5.1      | Résumé des caractéristiques des principales technologies . . . . .           | 33        |
| 5.2      | SWOT de la fabrication additive métallique . . . . .                         | 33        |
| <b>6</b> | <b>Impact environnemental de la fabrication additive</b>                     | <b>34</b> |
| <b>7</b> | <b>Bibliographie</b>                                                         | <b>36</b> |

## Glossaire

| Acronyme | Définition                                                                                                                                                                                                                                     |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CAO      | Conception Assistée par Ordinateur                                                                                                                                                                                                             |
| CLAD     | Construction Laser Additive Directe (§ 3.7.1)                                                                                                                                                                                                  |
| CNC      | Machine CNC pour computer numerical control, Machine à commande numérique                                                                                                                                                                      |
| EBM      | Electron Beam Melting : fusion laser par faisceau d'électrons (§ 2.1.2)                                                                                                                                                                        |
| FAO      | Fabrication Assistée par Ordinateur                                                                                                                                                                                                            |
| LMD      | Laser Metal Deposition : Fusion/Frittage laser par projection de poudre (§ 3)                                                                                                                                                                  |
| MAG      | Soutage MAG : Metal Active Gas, soudage sous gaz qui réagit avec le métal                                                                                                                                                                      |
| MIG      | Soutage MIG : Metal Inert Gas, soudage sous gaz inerte                                                                                                                                                                                         |
| NAE      | Normandie AeroEspace cf 2                                                                                                                                                                                                                      |
| PTA      | Soudage Plasma par Arc Transféré                                                                                                                                                                                                               |
| SLM      | Selective Laser Melting : Fusion laser sur lit de poudre (§ 2)                                                                                                                                                                                 |
| SLS      | Selective Laser Sintering : Frittage laser sur lit de poudre (§ 2)                                                                                                                                                                             |
| SWOT     | Strengths (forces), Weaknesses (faiblesses), Opportunities (opportunités), Threats (menaces).<br>Outil de stratégie d'entreprise permettant de déterminer les options stratégiques envisageables au niveau d'un domaine d'activité stratégique |
| TIG      | Soutage TIG : Tungsten Inert Gas, soudage avec électrode en tungstène et sous gaz inerte                                                                                                                                                       |
| TTH      | Traitement THermique                                                                                                                                                                                                                           |
| ZAT      | Zone Affectée Thermiquement                                                                                                                                                                                                                    |

TABLE 1 –

# 1 La Fabrication Additive (FA)

## 1.1 La fabrication additive en quelques mots

La Fabrication Additive (FA) est un procédé de fabrication qui a commencé à se développer dans les années 80 et qui atteint actuellement une maturité qui lui permet d'être utilisé de manière rentable et fonctionnelle par les industriels. La fabrication additive est définie comme étant le procédé de mise en forme d'une pièce par ajout de matière, à l'opposé de la mise en forme traditionnelle par enlèvement de matière (usinage).

La fabrication additive était à l'origine réservée au prototypage et donc à la partie pré-production du cycle de vie d'un produit. Actuellement elle est aussi utilisée dans la phase de production d'un produit. Elle présente cependant la limite de se révéler beaucoup moins productive que l'usinage traditionnel et se limite donc aux productions de pièces en petite et moyenne séries. La fabrication additive s'insère également dans la phase post-production du cycle de vie d'un produit. En effet, elle peut être utilisée pour réparer des pièces endommagées ou bien pour remplacer des pièces anciennes dont la production en série est terminée et qui n'existe plus en stock.

La FA présente de nombreux avantages, elle permet notamment de fabriquer des formes très complexes, certaines irréalisables avec les procédés conventionnels, et avec une grande diversité de matériaux. Cela permet également de réaliser des pièces monobloc, c'est-à-dire des pièces sans assemblage. Les délais de fabrication sont également intéressants pour des productions de pièces en petite série (pas d'outillage). En fonction des pièces, la fabrication additive peut permettre une réduction importante des coûts de fabrication et une simplification du processus global (suppression de certains traitements thermiques, pas d'opérations multiples tournage + fraisage).

Les domaines d'applications de la FA sont à l'heure actuelle déjà très variés. Elle est très utilisée pour le prototypage rapide lors de la conception d'un objet avec pour but de réduire les temps de fabrication des prototypes et de diminuer leur coût. La fabrication additive trouve également beaucoup d'applications dans des domaines tels que l'aéronautique (Safran réalise des pièces pour le moteur Silvercrest), la médecine (réalisation de substituts osseux sur mesure, d'implants dentaires) ou encore l'automobile (Koenigsegg réalise un grand nombre de pièce pour son modèle One : 1).

La FA est donc un procédé de fabrication relativement nouveau qui, utilisé correctement, présente de nombreux avantages : celui de produire différemment mais aussi, ce qui représente un potentiel de rupture important en ingénierie, celui de *concevoir* des systèmes basés sur de nouvelles géométries et de nouvelles combinaisons de matériaux. Cette bibliographie présente les différentes technologies de FA métaux, les différents constructeurs de machines associés à celles-ci et propose une analyse SWOT permettant de peser le pour et le contre d'un investissement sur l'une ou l'autre des technologies présentées. Une analyse approfondie de la technologie de rechargement par laser est fournie, permettant d'illustrer dans le détail les conséquences métallurgiques de ce procédé, en regard du procédé conventionnel d'apport par soudage.

## 1.2 Enjeux économiques

La rupture technologique apportée par la fabrication additive dans le domaine de la fabrication, en permettant de repenser l'ingénierie de conception et de production de systèmes, pousse le secteur industriel à augmenter la part d'investissement sur ce secteur prometteur de fabrication. L'évolution du chiffre d'affaire de la fabrication additive à

l'échelle mondiale va être multiplié par 4,9 pour atteindre la somme de 10800 M\$ d'ici à 2020 (figure 1).

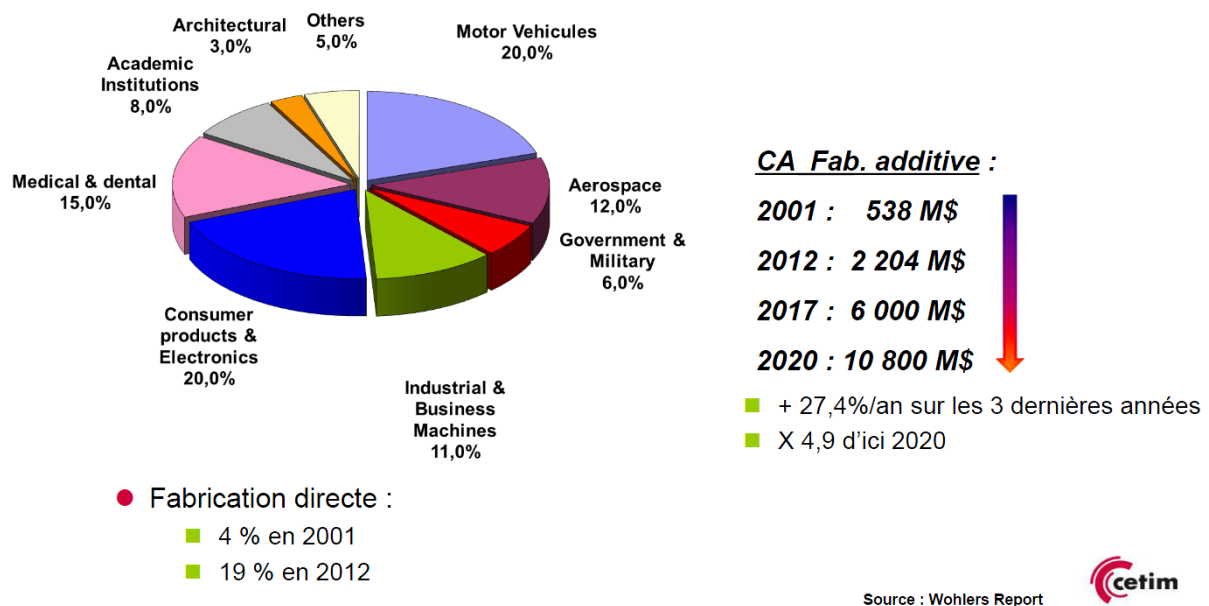


FIGURE 1 – Part de marché de la fabrication directe dans le monde et prévisions (source [Ver14])

Parmi les grands domaines industriels intéressés par cette nouvelle technologie : l'automobile, l'aérospatiale et dans une moindre mesure, le biomédical et l'éolien (figure 2).

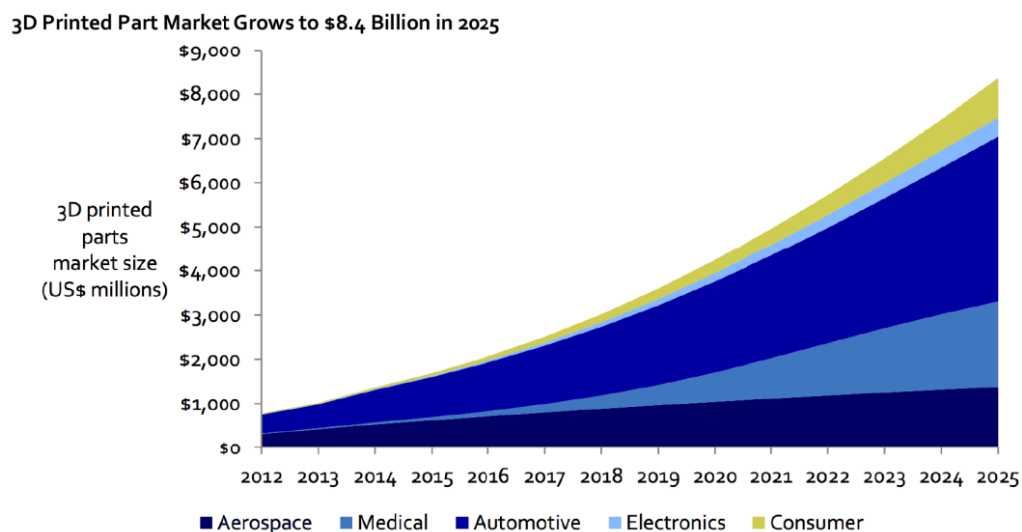


FIGURE 2 – Part de marché, par domaines industriels, de la fabrication additive et son évolution (source Lux Research)

### 1.3 Principales technologies

La fabrication additive métallique se base principalement sur deux technologies qui présentent des propriétés et des applications différentes. Le tableau 2 présente ces deux grandes familles de technologies ainsi que leurs caractéristiques. Ces technologies sont ensuite détaillées partie 2 et partie 3.

| Nom Anglais                                 | Nom Français                                   | Matériaux                     |        | Principe                                                                                                                                                                              |
|---------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                             |                                                | Matières                      | Etat   |                                                                                                                                                                                       |
| Selective Laser Melting/Sintering (SLM/SLS) | Fusion/Frittage laser sur lit de poudre        | Métaux, polymères, céramiques | Poudre | Un laser ou un faisceau d'électrons vient fondre ou fritter une couche fine d'un matériau poudreux. Une seconde couche est ensuite déposée puis fondue/frittée.                       |
| Laser Metal Deposition (LMD)                | Fusion/Frittage laser par projection de poudre | Métaux                        | Poudre | Un laser vient fondre la surface métallique de la pièce sur laquelle est simultanément projeté un jet de poudre. Cette poudre fond et forme une couche qui fusionne avec le substrat. |

TABLE 2 – Technologies de fabrication additive métallique

## 2 Fusion/frittage laser sur lit de poudre

### 2.1 Principe de la fusion/frittage laser sur lit de poudre

Le principe des techniques de fabrication additive de fusion/frittage laser sur lit de poudre (aussi appelées frittage sélectif laser, *Selective Laser Sintering* en anglais) est de faire fondre une fine couche de poudre (métallique, plastique, céramique, ...) à l'aide d'un laser de forte puissance.

Ces techniques sont basées sur les mêmes étapes résumées ci-dessous :

1. Une fine couche de poudre est étalée par un rouleau sur un piston de fabrication (au début de la réalisation de la pièce le piston est à son point le plus haut).
2. Cette couche est frittée/fondue par un laser de forte puissance qui trace une section 2D sur la surface de la poudre, la solidification a lieu immédiatement après l'arrêt du laser.
3. Le piston supportant le modèle 3D en cours de réalisation descend de l'épaisseur de la couche réalisée tandis que les cartouches d'alimentation en poudre ajustent leur niveau avec celui du plateau.
4. Une nouvelle couche de poudre est étalée et le processus se répète jusqu'à l'obtention du modèle 3D.

L'atmosphère de la chambre de construction de la machine doit être contrôlée lors de tout le processus de réalisation de la pièce afin d'assurer l'homogénéité des propriétés de la pièce. Les principaux éléments constitutifs d'une machine de fusion/frittage sur lit de poudre sont présentés sur la figure 3

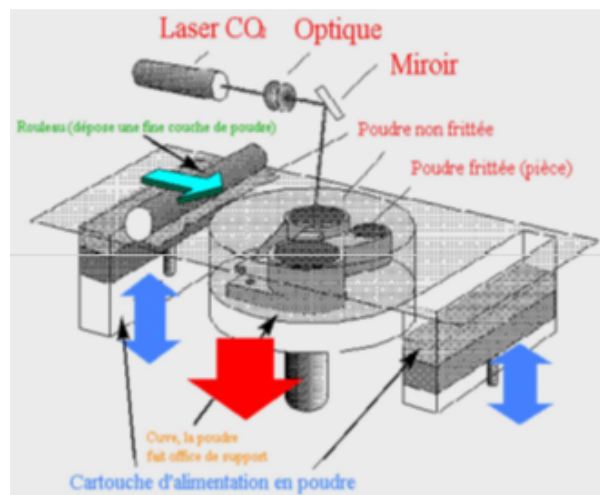


FIGURE 3 – Principe du frittage laser sur lit de poudre

#### 2.1.1 Distinction entre fusion et frittage

Une distinction importante se fait entre la fusion laser (**Selective Laser Melting, SLM**) et le frittage laser (**Selective Laser Sintering, SLS**). Le frittage est un procédé consistant à chauffer une poudre sans la mener jusqu'à la fusion. Sous l'effet de la chaleur, les grains se soudent entre eux et donnent sa cohésion à la pièce. La seule différence entre le frittage et la fusion laser est donc la puissance du laser utilisé. Le frittage permet d'obtenir certaines propriétés qui peuvent être intéressantes pour des applications bien définies

(limite élastique élevée par exemple). Pour des applications industrielles, on cherchera plutôt à utiliser la fusion car elle permet de minimiser le nombre et la taille des porosités.

### 2.1.2 Fusion par faisceau d'électrons

Une autre technologie très proche de la fusion et du frittage laser à base de poudre est la fusion laser par faisceau d'électrons (Electron Beam Melting en anglais), figure 4. La principale différence avec les procédés évoqués précédemment est, comme son nom l'indique, l'utilisation d'un faisceau d'électrons à la place du laser. Ce faisceau d'électrons est obtenu en chauffant sous vide un filament de tungstène. Ce dernier libère ainsi des électrons qui sont ensuite accélérés et dirigés par des électro-aimants afin d'être projetés à grande vitesse sur la surface de la poudre. La poudre est ainsi amenée au point de fusion. Les poudres utilisées avec cette technologie doivent être à base de matériaux conducteurs sans quoi aucune interaction avec le faisceau d'électrons n'est possible. On privilégiera donc des poudres métalliques. Un des points forts de cette technologie est la vitesse de fabrication, en effet, certains constructeurs avancent que le faisceau d'électron peut être séparé pour chauffer plusieurs endroits simultanément. Mais cela se fait au détriment de la précision car le faisceau d'électrons est plus large qu'un faisceau laser lorsqu'il atteint la poudre [Mar14].

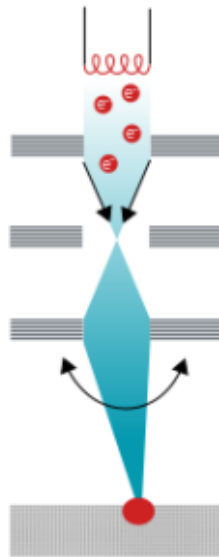


FIGURE 4 – Fonctionnement d'un faisceau d'électrons

## 2.2 Géométrie des pièces

La technologie de fusion/frittage laser sur lit de poudre présente pour principal avantage de permettre la réalisation de pièces de géométries extrêmement complexes. En effet, la poudre non fondue/frittée par le laser peut servir de support aux couches suivantes de matière étalées par le rouleau. Ainsi, l'obtention de formes en contre-dépouilles (ce qui est compliqué avec des procédés de moulage) est facilitée. Des canaux non rectilignes (ce qui est délicat avec de l'usinage classique), des pièces creuses (figure 5) peuvent être réalisées.



FIGURE 5 – Pièce de démonstration en titane réalisée par SLS

Le procédé de fusion/frittage laser sur lit de poudre ne présente pas que des avantages en ce qui concerne la géométrie de la pièce. En effet, le lit de poudre nécessite une surface plane pour être étalé par le rouleau, si la surface n'est pas plane, le rouleau risque de heurter la pièce et ainsi d'abîmer la machine. Un autre point important est le fait que les constructions par fusion laser sur lit de poudre présentent le plus souvent une anisotropie dans le sens de la construction avec un grain allongé selon cet axe. Ce phénomène est dû en partie à la refusion de la couche  $n - 1$  lorsque que l'on construit la couche  $n$ . Cette orientation " naturelle" entraîne donc une anisotropie des propriétés mécaniques (figure 6). Il est cependant possible d'atténuer ce phénomène en appliquant des traitements thermiques post production (TTH) afin d'homogénéiser la structure [Hen14]. Ce TTH peut néanmoins s'avérer être une opération délicate : non adapté non seulement à la composition de l'alliage mais aussi au procédé d'obtention de la pièce par FA, il pourra conduire à une dégradation significatives des propriétés ; ce TTH a aussi pour objectif de réduire les contraintes internes, comme pour les procédés de fonderie. Il y a donc du point de vue TTH post-production un savoir-faire supplémentaire à maîtriser par les acteurs.

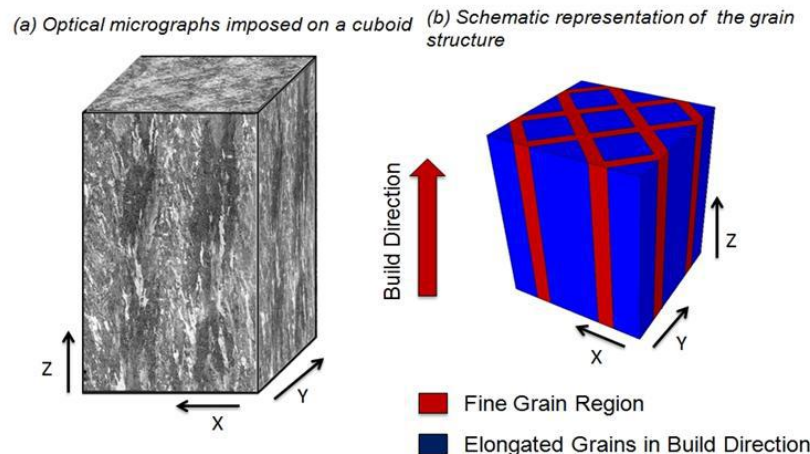


FIGURE 6 – Anisotropie de la microstructure des pièces construites par SLM [Hen14]

## 2.3 Matériaux utilisés

Les techniques de fabrication additive par fusion ou par frittage permettent de réaliser des pièces à base d'une gamme de poudres relativement diversifiée, incluant des poudres métalliques, plastiques ou céramiques. La nature de la technologie de fusion/frittage laser sur lit de poudre permet de construire des couches qui sont fortement liées entre elles. En

effet, à chaque fois qu'une couche de matière est fusionnée/frittée, les couches inférieures proches sont elle-même refondues et une forte cohésion apparaît ainsi.

## 2.4 Constructeurs et machines

Les technologies de frittage/fusion laser sur lit de poudre arrivant à maturité, le nombre de constructeurs de machines utilisant ces procédés est en augmentation. Actuellement, les principaux sont Arcam, 3D Systems, EOS et SLM Solutions. Quelques-unes de leurs machines sont présentées ci-après.

### 2.4.1 Arcam



**Arcam** est une entreprise suédoise fondée en 1997 et cotée au NASDAQ OMX de Stockholm. Cette entreprise est spécialisée dans la fabrication de machine de fabrication additive réalisant de la fusion par faisceau d'électrons. Arcam propose trois machines différentes basées sur la même technologie mais possédant des volumes utiles différents et des propriétés différentes. L'Arcam Q10 est ainsi conseillée pour la production d'implants orthopédiques alors que l'Arcam Q20 est plutôt dédiée à la production de composants aéronautiques comme des aubes de turbines. L'Arcam A2X est quant à elle conçue pour améliorer la productivité en utilisant notamment un système avec plusieurs lasers.

**Arcam** propose également un certain nombre de poudres ainsi que des équipements permettant une manipulation facile et sûre des poudres comme des nettoyeurs anti-déflagrations, des systèmes de récupération des poudres ou encore des chariots de manutention pour poudre [Arc15].

### 2.4.2 3D Systems



**3D Systems** est une entreprise américaine fondée en 1986 dont le siège social se situe à Rock Hill aux USA. Cette entreprise fabrique plusieurs gammes de machine dédiées à la fabrication additive :

- une gamme dédiée aux particuliers avec comme souci principale la démocratisation de la fabrication additive pour les étudiants et les passionnés. Cette gamme vise avant tout à simplifier le procédé et à mettre à disposition des machines peu coûteuses pour le plus grand nombre.
- une gamme dédiée aux professionnels permettant de fabriquer des petits objets plastiques et répondant aux exigences du prototypage rapide.
- une gamme dédiée à la production de modèles conceptuels, de prototypes fonctionnels, de moules pour l'outillage et de pièces d'utilisation finale réelle. Cette

gamme est basée sur plusieurs procédés dont un procédé appelé Direct Metal Printing comparable à la fusion laser sur lit de poudre qui permet de réaliser des pièces métalliques.

**3D Systems** propose également un certain nombre de logiciel et de scanner permettant le traitement pré-fabrication des pièces et prototypes à réaliser.

#### 2.4.3 EOS



**EOS** est une entreprise allemande fondée en 1989 et qui se réclame comme l'un des leaders mondiaux de la fabrication additive par fusion laser. EOS propose quatre machines basées sur le procédé de frittage laser sur lit de poudre et réalisant des pièces métalliques. EOS offre également une large sélection de poudres métalliques pouvant répondre à un grand nombre d'applications.

#### 2.4.4 SLM Solutions



**SLM Solutions** est une entreprise allemande fondée en 2006 et spécialisée dans la fabrication de machine. Basé sur le nombre de vente en 2012, SLM Solutions est le troisième plus gros vendeur au monde de machines de fabrication additive. L'un des avantages de SLM Solution est leur expérience en ce qui concerne la technologie multi-laser. Alors que de nombreuses entreprises commencent seulement à développer cette technique, SLM Solution l'utilise déjà depuis plus de trois ans. Ainsi les machines SLM 280 HL et SLM 500 HL sont toutes deux équipées de deux lasers de puissances différentes pouvant opérer en même temps. Un autre avantage des machines SLM est la possibilité d'utiliser une grande variété de poudres, fournies par différents fabricants.

### 2.4.5 Machines et caractéristiques dimensionnelles

| Fabricant     | Machine        | Dimensions de la zone de travail (mm <sup>3</sup> ) |
|---------------|----------------|-----------------------------------------------------|
| Arcam         | Arcam Q10      | 200*200*180                                         |
|               | Arcam Q20      | φ350*380                                            |
|               | Arcam A2X      | 200*200*380                                         |
| 3D Systems    | ProX 100       | 100*100*80                                          |
|               | ProX 200       | 140*140*100                                         |
|               | ProX 300       | 250*250*300                                         |
|               | ProX 400       | 500*500*500                                         |
| EOS           | EOSINT M280    | 250*250*325                                         |
|               | EOSINT M290    | 250*250*325                                         |
|               | EOS 400        | 400*400*400                                         |
|               | PRECIOUS M 080 | φ80*100                                             |
| SLM Solutions | SLM 125 HL     | 125*125*125                                         |
|               | SLM 280 HL     | 280*280*350                                         |
|               | SLM 500 HL     | 500*280*325                                         |

TABLE 3 – Machines et leurs caractéristiques dimensionnelles

## 2.5 Analyse économique

### 2.5.1 Coût d'investissement machine

Les gammes de prix pour des machines de FA dépendent du matériau, des technologies et des dimensions. De 5k€ pour une machine FDM polymère à usage de prototypage rapide de pièces de petites dimensions ( $\sim 10$  cm) jusqu'à 2 M€ pour une CLAD métaux pour des pièces d'une taille de l'ordre de 100 cm.

Les machines dédiées polymères sont sur des ordres de prix de 5 à 200 k€ tandis que pour les métaux, il faut compter par exemple entre 500 k€ et 2 M€. Un autre exemple est donné ci-dessous pour la société ARCAM. Les ordres de prix des machines proposées par Arcam sont :

- Arcam Q10 : 625 k€
- Arcam Q20 : 850 k€
- Arcam A2X : 775 k€

Ces prix comprennent les systèmes complets : machine, système de récupération des poudres, aspirateurs, trousse à outils,...

### 2.5.2 Coût consommables (matière)

Les prix des poudres dépendent de la granulométrie et des matériaux. Ils varient de une à plusieurs centaines d'euros ; rarement en dessous.

A titre d'exemple, la poudre de titane fournie par Arcam est à 185 €/kg.

## 2.6 SWOT fusion/frittage sur lit de poudre

|                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Forces</b></p> <p>Géométrie de pièces complexes<br/>Rapidité d'exécution grâce au multi-lasers<br/>Machines moins chères que pour la projection de poudre</p>                                                                | <p><b>Faiblesses</b></p> <p>Technologies relativement récentes<br/>Inadapté aux grandes séries actuellement<br/>Nécessité d'avoir un support plan<br/>Gestion de l'anisotropie et des contraintes internes par TTH</p> |
| <p><b>Opportunités</b></p> <p>Nouvelles possibilités de fabrication<br/>réalisation de pièce impossible en usinage traditionnel<br/>→ nouvelles opportunités de conception<br/>Variation continue de propriétés fonctionnelles</p> | <p><b>Menaces</b></p> <p>Obsolescence rapide des machines dûe aux développements de nouvelles technologies<br/>Qualification des performances des pièces en fonctionnement réel</p>                                    |

TABLE 4 – SWOT fusion/frittage sur lit de poudre

### 3 Fusion/frittage laser par projection de poudre

#### 3.1 Principe de la fusion/frittage laser par projection de poudre

Cette technique consiste à venir fondre la surface d'une pièce métallique à l'aide d'un laser. Simultanément, un jet de poudre est projeté sur la zone en fusion. Cette poudre fond sur la zone en fusion et vient ainsi former une couche qui fusionne avec le substrat (figure 7). Plusieurs passages peuvent être nécessaires pour obtenir l'épaisseur désirée [Tru12].

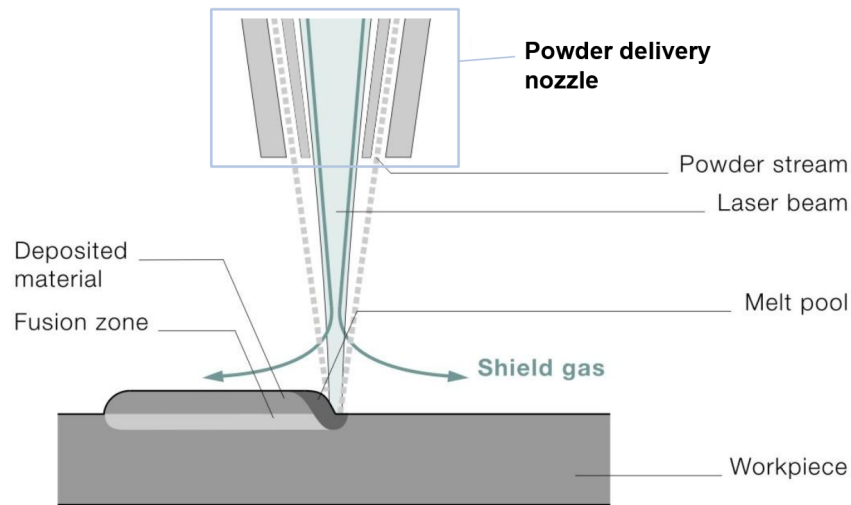


FIGURE 7 – Frittage laser par projection de poudre [Tru12]

Cette technologie est utilisée à la fois pour créer des pièces 3D à partir de rien et pour réparer des pièces. Elle présente notamment l'avantage d'obtenir une très bonne cohésion métallurgique entre le revêtement appliqué et le substrat. Cette technique peut également être utilisée pour faire des traitements de surfaces spéciaux avec pour but final d'améliorer la résistance à la corrosion ou à l'usure.

Le procédé de projection de poudre s'appuie sur la fusion (ou frittage) laser, en s'inspirant du rechargement par soudage. La poudre est injectée par une buse montée sur une machine 5 axes qui en se déplaçant, crée des cordons de soudure. Cela offre une grande flexibilité géométrique. Contrairement au lit de poudre il est ainsi possible de créer complètement une pièce, de recharger des parties usées ou de réaliser un revêtement en surface. [Har11]

#### 3.2 Caractéristiques des dépôts laser par projection

Dans le domaine de la projection de poudre, deux techniques existent : la poudre peut être injectée latéralement (figure 8(a)) ou coaxialement au faisceau laser (figure 8(b)). La première technique, d'une grande simplicité de fabrication implique un difficile asservissement de la position de l'injecteur par rapport au déplacement de la buse pour réaliser des formes complexes. Cela explique le recours à des buses coaxiales dans la majorité des cas pour le rechargement multidirectionnel. Cette deuxième technique permet également une meilleure homogénéité du dépôt, due à une irradiation du matériau d'apport plus longue et régulière. Enfin les buses à projection latérale sont bien souvent plus encombrantes.

La prise en compte de leur volume englobant lors de la programmation des trajectoires de fabrication en est d'autant plus délicat [Mac13].

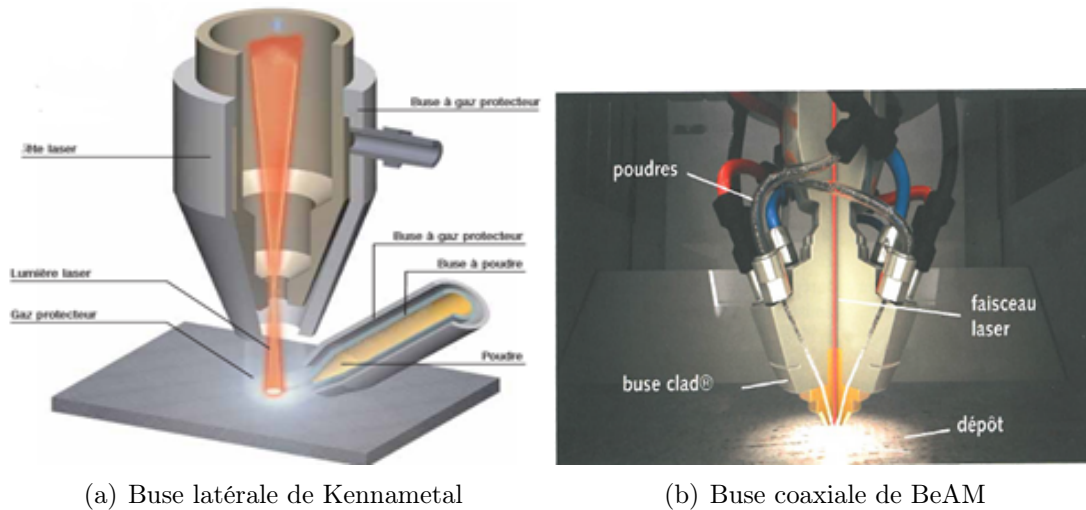


FIGURE 8 – Types de buses

### 3.3 Géométries réalisées

La buse utilisée pour la projection de poudre est généralement montée sur une machine à commande numérique 5 axes, ce qui offre une grande flexibilité géométrique, une grande précision de trajectoire ainsi que de faibles reprises d'usinage quand celles-ci sont nécessaires. Cependant, un post traitement s'avère nécessaire si on veut améliorer l'état de surface (usinage) ou les propriétés microstructurales et mécaniques (TTH), notamment pour réduire les contraintes internes.

Cette technologie ne nécessite pas l'utilisation d'un lit de poudre, ceci présente des avantages mais aussi quelques inconvénients. La projection de poudre offre la possibilité de travailler sur des supports non plans, ce qui est impossible avec les lits de poudre car la racle viendrait heurter les parties qui dépassent lors de l'étalement de la poudre comme l'illustre la figure 9. Cela offre également l'avantage de ne consommer que la quantité de poudre dont on a besoin pour réaliser la pièce.

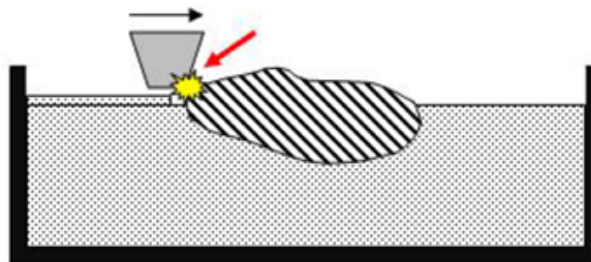


FIGURE 9 – Contrainte géométrique du frittage lit de poudre [Har11]

Cependant, certaines formes réalisables sur lit de poudre sont impossibles par projection, il est nécessaire d'avoir un support pour déposer le métal fondu, il est ainsi

impossible de fermer un prisme droit par un plan par projection de poudre, comme illustré figure 10.

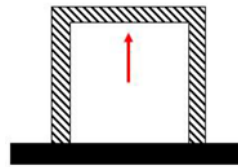


FIGURE 10 – Géométrie impossible par projection de poudre [Har11]

La localisation de l'impact thermique permet le travail sur des zones critiques telles que des parois fines ou des arêtes [Har11],[Mac13].

### 3.3.1 Géométries en fabrication 3D directe

La figure 11 illustre les possibilités " géométriques " offertes par la fabrication additive laser par projection de poudre (ici le procédé CLAD de BeAM) dont les avantages sont :

- repousser les limites des techniques traditionnelles (usinage...)
- économie de matière (peu ou pas de copeaux)
- fabrication unitaire et petite série
- pièces de grandes dimensions (jusqu'à 1500 x 800x 800 mm)



FIGURE 11 – Géométries réalisables en fabrication additive directe (procédé CLAD de BeAM)

### 3.3.2 Géométries en rechargement / réparation

La figure 12 illustre les possibilités " géométriques " offertes par la fabrication additive laser par projection de poudre (ici le procédé CLAD de BeAM) dont les avantages sont :

- réparation fine de surfaces et volumes
- remise aux cotes
- correction des erreurs d'usinage et de conception

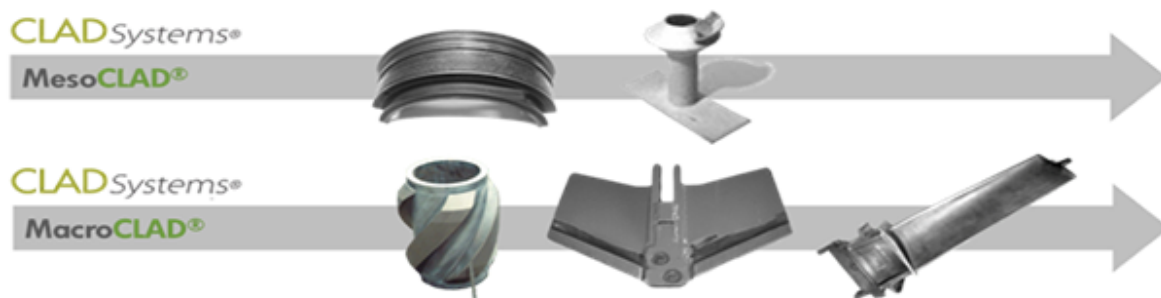


FIGURE 12 – Géométries réparables en fabrication additive laser par projection de poudre (procédé CLAD de BeAM)

### 3.3.3 Géométries en rechargement / réparation

La figure 13 illustre les possibilités " géométriques " offertes par la fabrication additive laser par projection de poudre (ici le procédé CLAD de BeAM) dont les avantages sont :

- fabrication additive localisée et non globale (comme par lit de poudre)
- travail sur des pièces ébauchées par procédé conventionnel (usinage, forge, moulage...)
- dépôts possibles sur des surfaces gauches (pièces à haute valeur ajoutée)



FIGURE 13 – Ajout de forme(s) en fabrication additive laser par projection de poudre (procédé CLAD de BeAM)

## 3.4 Matériaux utilisés

Le recours à la fusion ou au frittage laser pour le rechargement permet d'obtenir des dépôts homogènes et denses, la forte densité s'explique par le fait que le dépôt se réalise sur une couche elle-même refondue par le laser, cela permet également de limiter les risques de délaminage<sup>1</sup>. Les caractéristiques d'une pièce obtenue par fusion laser sont proches de celles obtenues par forge ou fonderie.

Ce procédé s'applique à une grande variété de matériaux tels que des bases fer, des bases cobalt, des bases nickel ou encore des alliages d'aluminium. Tous les matériaux métalliques susceptibles d'être atomisés sous forme sphérique peuvent être utilisés.

1. Délaminage : séparation des couches de matière déposées les unes sur les autres par les passes successives

La projection de poudre permet également la réalisation de pièces à gradient de matière, la présence de plusieurs réservoirs sur certaines machines permet d'utiliser différentes poudres tout en contrôlant à chaque couche le pourcentage de chaque poudre. Il faut cependant vérifier la compatibilité métallurgique des différents matériaux mis en œuvre. Cette possibilité de passer d'une propriété fonctionnelle à une autre au sein d'une même pièce est aussi source de rupture technologique importante : contrairement aux procédés conventionnels, cette variation peut être introduite sans introduire d'interfaces, c'est à dire sans introduire des sources supplémentaires de dégradations physiques (fissurations interphases, oxydation, ...).

Un autre avantage de la projection de poudre est la rapidité du cycle thermique, qui permet l'obtention de microstructures très fines ainsi que des duretés supérieures aux techniques de rechargement par soudage. La rapidité du cycle thermique ainsi que le faible volume chauffé permet de limiter le traumatisme subi par la pièce et la Zone Affectée Thermiquement (ZAT).

En projection de poudre, la dilution, qui correspond au rapport de volume de substrat fondu sur le volume de matière fondu est maîtrisable et peut être faible (inférieure à 5% dans le cas des aciers), ce qui permet de conserver les propriétés du matériau déposé [Har11], [Mac13].

### 3.5 La projection de poudre appliquée au cas du rechargement (ajout de forme sur pièce support, rechargement de pièces à haute valeur ajoutée...)

#### 3.5.1 Rappel des différentes techniques de rechargement métallique

Les différents procédés de rechargement existants sont le soudage TIG, MIG/MAG et le plasma (PTA pour Plasma Arc Transféré). Avant une comparaison détaillée avec le rechargement laser, le tableau suivant donne les caractéristiques essentielles des différentes méthodes de rechargement.

| Procédé | Densité locale d'énergie <sup>1</sup> | Dilution (%) | Déformation <sup>2</sup> | Vitesse dépôt (kg/h) | Epaisseur min (mm) |
|---------|---------------------------------------|--------------|--------------------------|----------------------|--------------------|
| MIG/MAG | 4                                     | 10 à 40      | 4                        | 1 à 6                | 3                  |
| TIG     | 3                                     | 10 à 20      | 4                        | 0,5 à 4              | 2,5                |
| PTA     | 2                                     | 5 à 20       | 2                        | 0,5 à 7              | 0,8                |
| Laser   | 1                                     | 1 à 5        | 1                        | 0,5 à 4              | 0,5                |

TABLE 5 – Comparaison des différentes technologies de rechargement [Har11]

1. Il s'agit de valeurs relatives (indice 1 le plus performant)  
 2. Il s'agit de valeurs relatives (indice 1 le plus performant)

**La dilution** correspond au rapport de volume de substrat fondu sur le volume de matière fondue. La figure 14 schématise cette caractéristique.

$$Dilution(\%) : D = \frac{B}{B+A}$$

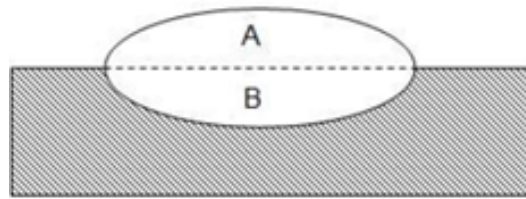
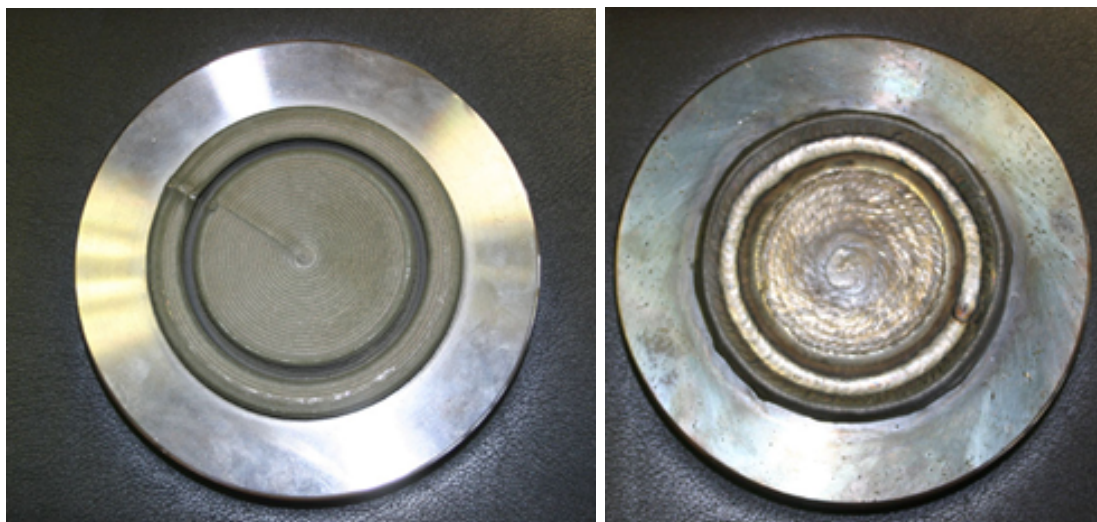


FIGURE 14 – Calcul de la dilution [Har11]

### 3.6 Comparaison entre le rechargement laser et le TIG

Plusieurs études ont été réalisées afin de comparer la technologie laser cladding et le TIG (Tungsten Inert Gas). Dans la plupart des cas, ces études sont réalisées afin de promouvoir le rechargement laser, il est ainsi difficile de trouver des arguments contre le rechargement laser.

La précision du laser par rapport à la soudure TIG permet de réaliser des pièces complexes, nécessitant moins de reprise d'usinage comme l'illustre la figure 15.



(a) Rechargement Laser

(b) Rechargement TIG

FIGURE 15 – Géométrie issue de rechargement laser et TIG

Le procédé TIG, comme le MIG est caractérisé par une importante augmentation de la température dans la pièce, ce qui entraîne une recristallisation et un affaiblissement de l'alliage de base dans la zone de travail, comme on peut le constater sur le graphique de la figure 16.

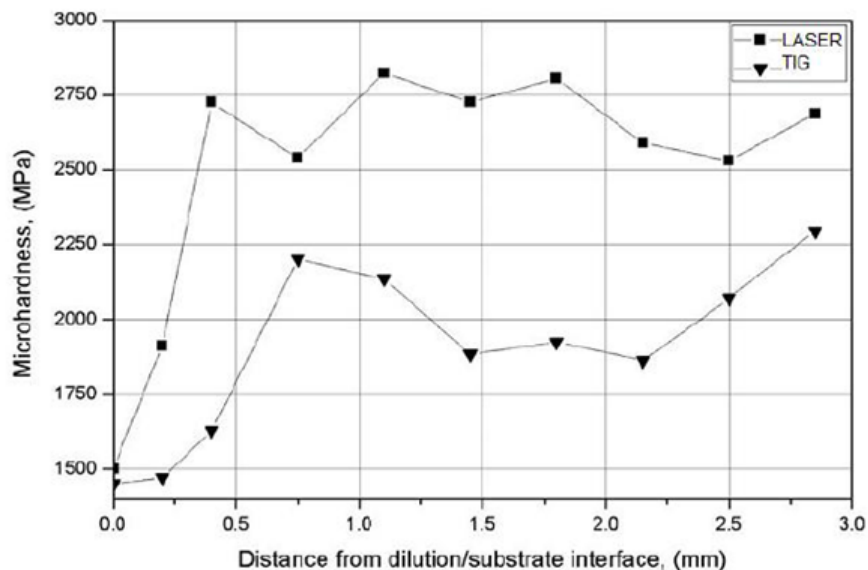


FIGURE 16 – Evolution de la microdureté en fonction de la distance à la zone rechargée pour un revêtement Inconel 625 rapporté par laser ou TIG

Concernant le laser cladding, la zone de chauffage étant plus localisée, la zone affectée thermiquement (ZAT), qui est le siège de modifications métallurgiques du métal de base pouvant induire des fragilités, des baisses de résistance mécanique, des manques de ductilité est plus faible. Pour les mêmes raisons les déformations induites dans la pièce par l'augmentation thermique sont moins importantes (figure 17).

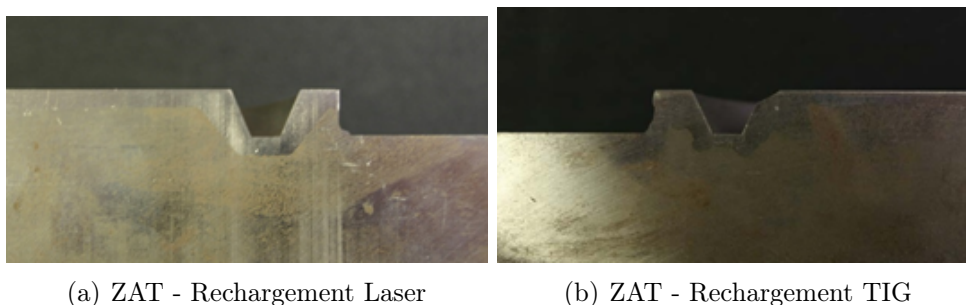
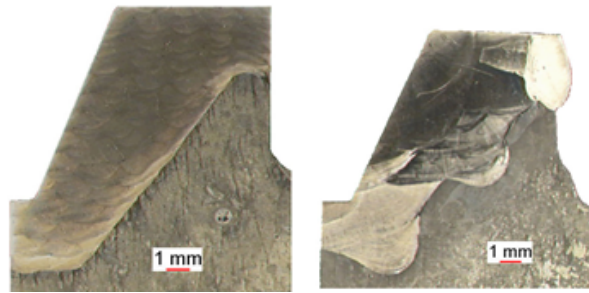


FIGURE 17 – ZAT après rechargement laser et TIG

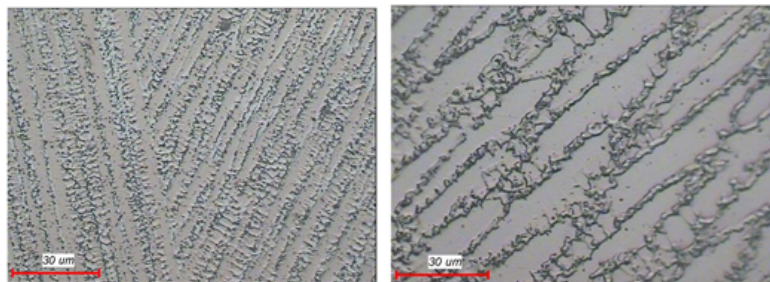
Un autre avantage du rechargement laser est la plus faible zone de dilution par rapport à la soudure TIG, cette faible zone de dilution permet d'obtenir un dépôt homogène et possédant les caractéristiques souhaitées sur toute son épaisseur, contrairement à la soudure TIG qui présente une forte dilution, dégradant la qualité du rechargement et une profondeur de fusion irrégulière. Cette caractéristique est illustrée figure 18.



(a) Dilution - Recharge-  
ment Laser (b) Dilution - Recharge-  
ment TIG

FIGURE 18 – ZAT après rechargement laser et TIG

Les analyses de la microstructure révèlent une structure plus fine dans le cas du laser cladding que dans le cas de la soudure TIG. La concentration de l'énergie dans le cas du laser permet d'obtenir une vitesse de refroidissement plus élevée, ce qui diminue la taille des grains et donc augmente la dureté du matériau. Dans le cas d'un stellite 6, nous avons une dureté de 48-50 HRC contre seulement 40-42 HRC dans le cas de la soudure TIG. La figure 19 montre ces différences de microstructure.



(a) Microstructure - Recharge-  
ment Laser (b) Microstructure - Recharge-  
ment TIG

FIGURE 19 – Microstructure après rechargement laser et TIG [Har11]

Le plasma à arc transféré (PTA) utilise comme source d'énergie le plasma thermique créé par l'ionisation partielle d'un gaz plasmagène (Ar, He, H, N). Cela crée une atmosphère fortement ionisée conductrice de courant. De plus, l'arc est fortement concentré, ce qui permet d'atteindre des températures très élevées (jusqu'à 14000K contre 10000K en TIG). Le procédé est généralement alimenté en poudre par injection directe dans le jet de plasma. Par rapport au TIG, une densité plus élevée est obtenue et grâce à la concentration de l'arc, la zone affectée thermiquement est réduite ainsi que le taux de dilution. Au niveau de la microstructure, le procédé laser présente une microstructure fine et uniforme, avec une zone de transition entre 10 et 25  $\mu m$  alors que le plasma présente une microstructure plus grossière et une zone de transition entre 120 et 160  $\mu m$ . Des fissures et des porosités ont été détectées lors d'essais avec le procédé plasma. Les deux figures 20(a) et 20(b) illustrent les différences de microstructure.

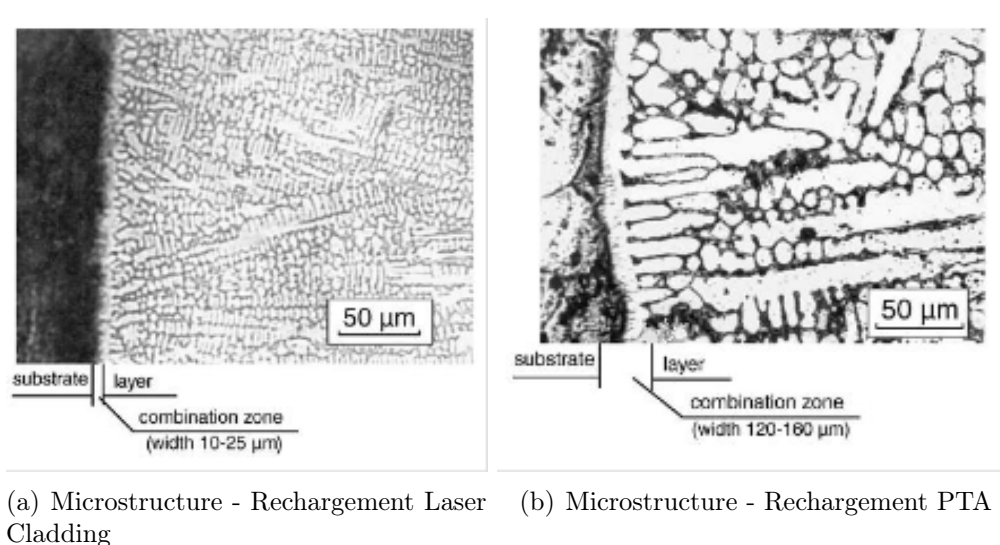


FIGURE 20 – Microstructure après rechargement laser cladding et PTA

Les essais de microdureté révèlent également des différences : les revêtements réalisés par rechargement laser présentent une dureté comprise entre 740 à 860 HV contre 520 à 560 HV pour le revêtement plasma. Le procédé plasma a également révélé un taux de diffusion plus important que dans le cas du laser.

Des essais de résistance à l'abrasion et à l'usure ont été réalisés entre des revêtements issus de laser et de plasma. Ces essais ont montré que le laser cladding permettait l'obtention d'un revêtement offrant une meilleure résistance, particulièrement à l'usure. Sous faible charge et à température ambiante la différence est faible, en revanche, pour une charge de 300N, le revêtement laser a perdu 0.22mg contre 0.48 mg pour le plasma lors d'un essai de résistance à l'abrasion. Lors d'un test d'usure à haute température (800°C) le revêtement laser avait perdu 1,2 mg contre 2,53 mg pour le revêtement plasma.

Finalement, une étude a constaté que la frontière entre le substrat et le revêtement était moins lisse pour le plasma que pour le laser, ce qui pourrait entraîner des concentrations de contraintes [Har11], [Las15].

### 3.7 Constructeurs

#### 3.7.1 BeAM



**BeAM** est le premier constructeur européen de machines de fabrication additive par dépôt de poudres métalliques. Ces machines, en 3 et 5 axes sont conçues pour la construction et la réparation de pièces. Les machines de fabrication additives sont basées sur le procédé CLAD (Construction Laser Additive Directe) qui consiste à fondre des poudres métalliques par laser afin de générer un dépôt aux dimensions maîtrisées. Cela permet également l'utilisation d'un mélange homogène, composé de poudres de natures

différentes afin de réaliser un dépôt multi matériaux avec d'excellentes qualités métallurgiques. Cela conduit à la possibilité d'une variation *continue* d'un matériau à un autre et donc d'une propriété souhaitée à une autre, au sein d'une même pièce, sans introduire les sites favorables de dégradation que constituent des interfaces entre matériaux de natures différentes. Ce procédé est issu de la recherche appliquée et a été développé en partenariat avec des industriels utilisateurs. Les principaux domaines d'applications industrielles sont l'aéronautique, l'aérospatiale, la défense, le nucléaire et le médical. Les machines produites permettent de construire un objet depuis un substrat, ajouter une fonction à un objet existant, ou encore de réparer des formes endommagées

### 3.7.2 DMG Mori Seiki



**DMG** est une compagnie japonaise de machine outils fondée en 1946 dont le siège social est situé à Nakamura-ku. La filiale française DMG Mori-Seiki France SAS est basée à Roissy en France et Saint Priest.

**DMG MORI** propose des machines hybrides qui intègrent une technique générative de dépôt laser de métaux à des machines de tournage/fraisage et à 5 axes complètes. La NT4300 présente les avantages suivants :

- association unique de dépôts laser de métaux et du fraisage pour une précision des composants et une finition des surfaces optimale
- soudure par dépôts laser à l'aide d'une buse à poudre : 20 fois plus rapide que les procédés à l'aide d'un banc à poudre
- possibilité de produire des composants complets
- possibilité de réaliser de nombreuses géométries en 3D, dont des zones non coupées, sans l'aide de structures de support
- réparation des composants de la turbine et fabrication dans l'outil/le moule
- application de surfaces d'usure
- usinage complet avec changement entièrement automatique entre le fraisage et l'opération laser
- grande zone de travail pour les pièces de 650 mm de diamètre, 360 mm de hauteur et 1.000 kg maximum pour la solution à 5 axes et 660 mm de diamètre, 1.500 mm de longueur et 1.500 kg maximum pour la solution de tournage/fraisage

### 3.7.3 Trumpf

Le groupe **Trumpf** se classe parmi les leaders mondiaux des fabricants de laser et de technologie de production. Leurs machines destinées à la fabrication additive sont celles de la série 7000. Avec un système de laser flexible, il est possible de traiter des composants en 2 ou 3 dimensions, et des tubes. Ces machines peuvent être utilisées pour la réalisation de prototypes ou pour de la production en série. Ces machines combinent la découpe laser, le soudage laser et le rechargement laser.

### 3.7.4 Optomec

La société **Optomec** est située au Nouveau Mexique. Elle est spécialisée dans le développement de solutions dans la fabrication additive. Les solutions LENS utilisent le procédé de dépôt de poudre par laser. Optomec réalise des machines de fabrication additive comme la LENS 850-R mais aussi un module, le PRINT ENGINE qui peut être intégré à des machines-outils CNC existantes ou nouvelles.

### 3.7.5 Machines et caractéristiques dimensionnelles

| Fabricant      | Machine            | Dimensions de la zone de travail (mm <sup>3</sup> ) |
|----------------|--------------------|-----------------------------------------------------|
| BeAM           | Mobile CLAD        | 400*250*200                                         |
|                | CLAD Unit Q20      | 1000*700*700                                        |
|                | MAGIC              | 1500*800*800                                        |
| Optomec        | LENS 450           | 100*100*100                                         |
|                | LENS MR-7          | 300*300*300                                         |
|                | LENS 850-R         | 900*1500*900                                        |
| DMG Mori Seiki | LASERTEC 65 3D     | 650*650*560                                         |
|                | NT 4300            | φ650*360 à 1000                                     |
| Trumpf         | TruLaser Cell 7006 | 650*1500*750                                        |
|                | TruLaser Cell 7020 | 2000*1500*750                                       |
|                | TruLaser Cell 7040 | 4000*1500*750                                       |

TABLE 6 – Machines et leurs caractéristiques dimensionnelles

### 3.8 Analyse économique

L'analyse économique a été réalisée avec les informations fournies par les entreprises BeAM et Multistation, le revendeur français d'Optomec. Il s'agit ici d'estimations, un coût global d'utilisation peut être déterminé avec plus de détails sur les applications envisagées.

#### 3.8.1 Coût d'investissement machine

Les ordres de prix des machines proposées par **BeAM** sont :

- MAGIC : 1,2 M€ à 1,6 M€
- CLADUnit : 700k€ à 1,2 M€
- MobileCLAD : 350k€ à 700k€

La fourchette de prix indiquée permet de prendre en compte les options envisageables (atmosphère contrôlée, 5 axes continus,...).

Pour les machines **Optomec**, les ordres de prix sont les suivants :

- Lens 450 : 400 à 450 k€
- MR-7 : 900 k€
- Lens 850 : 1,6 M€
- Print engine : 200 k€ (Module qui permet de transformer une machine à commande numérique pour la projection de poudres)

#### 3.8.2 Coût consommables

Matière :

Le prix des poudres varie en fonction des cours des métaux, cela dit les ordres de grandeurs actuels (Avril 2015) sont les suivants :

- Inox 316L (env. 30 €/Kg)
- Inconel 718 (env. 80 €/Kg)
- Titane TA6V (env. 320 €/Kg)

Des matériaux plus spécifiques ou fabriqués sur demande peuvent facilement atteindre les 500€/Kg.

De nombreux fournisseurs de poudre sont disponibles, la granulométrie des poudres utilisées par ces machines est de 45 - 90 microns, le plus sphérique possible. Certains constructeurs ne permettent que l'utilisation de leurs poudres, dans le cas de **BeAM** et **Optomec**, il est possible d'utiliser n'importe quelle poudre respectant les spécifications énoncées précédemment.

Consommables machine :

Il faut considérer environ 15 000€ par an pour une utilisation normale pour les consommables machines, lentilles, pièces d'usure... (Or opérateurs, électricité, gaz, poudres,...)

Autres consommables :

Gaz neutre (Argon), Electricité, poudres... ces paramètres vont dépendre de l'utilisation de la machine (taux de charge, travail en atmosphère contrôlée, matériaux, type de machine,...)

### Opérateurs :

Il faut partir sur les coûts moyens des techniciens supérieurs ou ingénieurs dédiés, pour les temps de programmation et de surveillance des opérations de fabrication.

## 3.9 SWOT fusion/frittage par projection de poudre

|                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Forces</b></p> <p>Géométrie de pièces très complexes<br/>Ajout de formes sur support complexe<br/>Gain de temps pour des formes complexes<br/>Anisotropie réduite</p>                                                         | <p><b>Faiblesses</b></p> <p>Technologies relativement récentes<br/>Inadapté aux grandes séries actuellement<br/>Géométries impossibles à réaliser (murs horizontaux)<br/>Coût d'investissement élevé</p> |
| <p><b>Opportunités</b></p> <p>Nouvelles possibilités de réalisations<br/>Réalisation de pièce impossible en usinage traditionnel<br/>→ nouvelles opportunités de conception<br/>Variation continue de propriétés fonctionnelles</p> | <p><b>Menaces</b></p> <p>Obsolescence des machines dûe aux développements de nouvelles technologies<br/>Qualification des performances des pièces en fonctionnement réel</p>                             |

TABLE 7 – SWOT fusion/frittage par projection de poudre

## 4 Process d'obtention d'une pièce par fabrication additive

Les technologies/machines permettant d'effectuer une fabrication additive ex-nihilo ou partielle (rechargement) existent. Cependant, une analyse du procédé plus détaillée met en évidence que la maîtrise du moyen n'est pas suffisante pour créer ou réparer une pièce et en assurer le bon fonctionnement. Des opérations de pré-rechargement et de post-rechargement ainsi qu'une étape de validation de la pièce sont nécessaires.

### 4.1 Préparation de l'état de surface devant accueillir le dépôt de matière

**Fabrication ex nihilo :** dans le cas d'une fabrication additive de pièce intégrale la préparation du support se résume à la mise en place d'une plaque support au sein de la machine.

**En réparation/rechargement :** la géométrie et l'état de surface de la pièce à traiter résultent de la phase de vie en situation de fonctionnement. C'est pourquoi, malgré des pièces similaires à l'origine, chaque réparation est "unique". Afin de pouvoir venir ajouter de la matière sur la pièce, il est essentiel que la zone où le rechargement aura lieu soit propre et présente un état de surface favorisant l'adhérence entre la pièce et la matière ajoutée. Comme pour les procédés de soudage classiques, un nettoyage de type sablage/grenaillage est donc essentiel avant que la pièce ne soit rechargée. Il est également parfois nécessaire de retoucher la pièce par usinage traditionnel afin d'obtenir une surface relativement plane et adaptée au rechargement laser.

### 4.2 Prise en compte de la géométrie de la pièce

**En fabrication ex nihilo,** suivant le procédé utilisé (lit ou projection de poudre), une mise en place de supports doit être envisagée au niveau des murs horizontaux. De plus, la direction de fabrication influe sur le nombre de couches, le temps de fabrication et engendre une éventuelle anisotropie. Par conséquent, celle-ci doit être judicieusement déterminée pour générer une pièce satisfaisante au regard du cahier des charges tout en minimisant le temps et le coût de fabrication.

**Dans le cadre du rechargement,** si le volume à rapporter est conséquent les problèmes cités pour la fabrication ex nihilo se posent également. A ceux-ci s'ajoutent des points spécifiques au rechargement. Pour savoir où la matière doit être ajoutée, il est essentiel de connaître la géométrie exacte de la pièce. C'est là l'une des principales différences entre le rechargement laser effectué par une machine et le rechargement par procédé de soudage classique effectué par un homme. L'homme ajoute de la matière là où il voit qu'elle manque, tandis que la machine suit les consignes (trajectoires, épaisseur de matière, vitesse de passe) qu'on lui donne.

Les procédés existants, tel que le logiciel PowerCLAD, ne permettent pas la fonction de traitement de scanning direct des pièces. La prise en compte de la géométrie de la pièce peut cependant se faire grâce à un scan de la pièce, suivi d'une modélisation dans un format compatible et d'un travail sous le logiciel PowerShape. Afin de construire un

volume, que ce soit une réparation de pièces ou l'ajout d'une fonction sur pièce existante, il est nécessaire de modéliser le volume à construire avant de réaliser le programme CN avec PowerCLAD. Pour combler un manque de matière sur une pièce, il faudra donc réaliser la pièce à réparer en l'état, et le complément de matière à déposer. La pièce à réparer devrait normalement avoir une géométrie relativement simple étant donné qu'elle sera passée par un usinage classique dans la phase de préparation de l'état de surface. La définition du complément peut être obtenue en superposant le modèle numérique de la pièce en l'état (issu du scanning) et la pièce à l'état finie. Il faudra ensuite importer cette pièce sous PowerCLAD.

Dans le cadre d'une petite ou moyenne série il peut être judicieux de passer par une phase d'usinage à une cote " standard " avant rechargement. Ainsi les pièces auront des caractéristiques géométriques identiques malgré qu'elles aient eu des situations d'utilisation différentes. Une seule étape de programmation est alors nécessaire et non autant que de pièces à recharger.

### 4.3 Génération des programmes ISO et stratégie de fabrication

Que ce soit pour une fabrication additive totale ou partielle le point de départ est généralement un modèle numérique de la pièce ou partie de pièce à fabriquer. Du fait de la double complexité moyens à mettre en œuvre - géométrie à fabriquer, un recours aux logiciels de FAO est nécessaire. Ceux-ci peuvent aller du logiciel le plus simple, qui se cantonnera à un découpage en tranches de la pièce (pour une machine lit de poudre) et éventuellement une génération automatique de supports pour les parties en contre-dépouille, au logiciel le plus complexe pour la génération de trajectoires dédié aux moyens par projection de poudre comme PowerCLAD (figure 21).

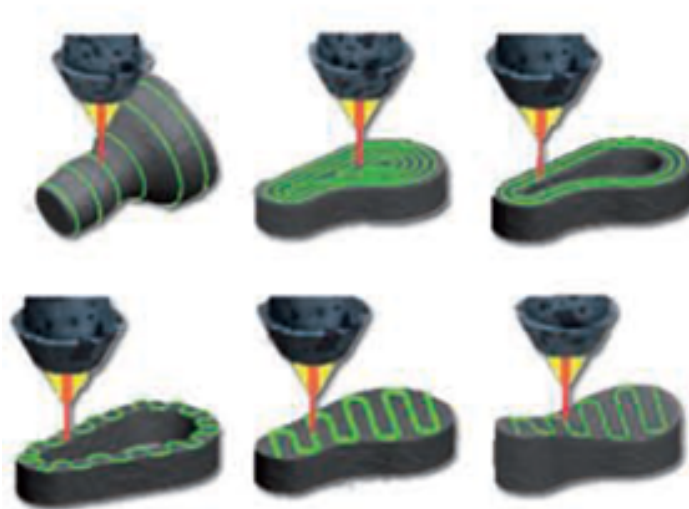


FIGURE 21 – Stratégies de fabrication disponibles dans le logiciel PowerCLAD

Les logiciels dédiés, encore peu nombreux, s'utilisent comme un logiciel de FAO et permettent de générer des trajectoires et des programmes machines à l'aide d'un post-processeur. Si un post-processeur est développé, les logiciels de FAO d'usinage classiques peuvent être utilisés mais ils restent délicats à mettre en œuvre du fait qu'ils sont ini-

tialement prévus pour réaliser de l'enlèvement et non de l'apport de matière. De même de nombreuses machines admettent des programmes en code ISO (code G) mais la programmation " manuelle " nécessite des compétences pointues pour générer des trajectoires complexes (5 axes).

Une offre de logiciel dédié, couplé à la machine de fabrication additive est donc un plus à ne pas négliger. Ce type de logiciel, confèrera une plus grande flexibilité opératoire et permettra certainement une mise en œuvre aisée de la fabrication pour des pièces complexes.

Ainsi la génération de trajectoires de fabrication additive est constituée de 5 étapes (figure 22) comme proposée par D. Boisselier [Boi09]. Attention une étape de CAO permettant de générer le modèle numérique support des étapes de FAO est obligatoire.



FIGURE 22 – Génération de trajectoires d'usinage à l'aide de PowerCLAD

#### 4.4 Opérations de post-traitement

La fabrication réalisée, en fonction du rendu voulu, il est nécessaire de faire subir à la pièce des opérations de finition. Ces finitions peuvent prendre différentes formes. Sur des machines 5 axes comme celles fabriquées par DMG Mori, la finition par fraisage est intégrée et permet d'obtenir de très bons états de surface.

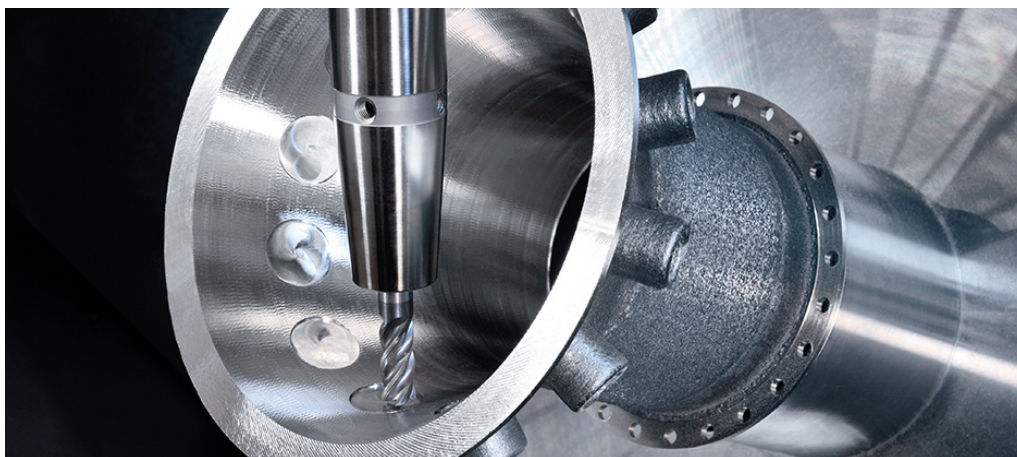


FIGURE 23 – Opération post-rechargement sur machine DMG

Les opérations classiques de finitions comme le polissage ou l'ajustage sont aussi envisageables. Il arrive également qu'avant ces étapes de finition, les surfaces rechargées soient écouvillées avec de la grenaille d'acier et de la poudre céramique. Cela sert à "déstresser" localement la pièce ainsi qu'à diminuer la porosité et à améliorer l'état de surface général [PEP12].

Des opérations métallurgiques, traitements thermiques, sont souvent effectuées pour diminuer voire enlever l'anisotropie de la pièce ou encore avant usinage pour diminuer la dureté de la pièce et ainsi faciliter celui-ci.

## 4.5 Qualification de la pièce

Les procédés de fabrication additive, de fait de leur jeunesse, ne permettent pas encore de s'affranchir d'une phase de validation, au regard du cahier des charges spécifié, de la pièce réalisée. Un contrôle dimensionnel et géométrique et bien entendu nécessaire mais à celui-ci s'ajoute des aspects métallurgiques et mécaniques liés au fait que la matière mise en œuvre est à l'état de poudre et qu'elle est partiellement ou totalement liquéfiée lors de la fabrication.

A l'heure actuelle, en amont d'une fabrication, les essais classiquement réalisés sont :

- mécaniques (traction, torsion, dureté...) sur des éprouvettes faites dans plusieurs directions de fabrication
- de fatigue (tenue dans le temps sous chargement cyclique) sur éprouvette
- de granulométrie. Analyse de la granulométrie de la poudre
- de porosité. Analyse de la porosité de la pièce.

Suite à une fabrication des contrôles non destructifs semblables à ceux réalisés en fonderie (ressuage, radiographie, ultrasons...) peuvent être menés pour vérifier l'intégrité de la pièce.

Ces essais et tests, de part leur complexité, nécessitent parfois de s'adosser à des laboratoires privés ou publiques pour s'assurer que la pièce fabriquée réponde bien aux attentes du client. Cet aspect de la fabrication additive n'est pas à négliger, la maîtrise des essais, tests... ou le recours à des organismes compétents est essentiel et inévitable pour pouvoir se développer dans le domaine de la fabrication additive.

## 5 Comparaison des technologies et analyse SWOT

### 5.1 Résumé des caractéristiques des principales technologies

|                                      | Fusion/Frittage<br>lit de poudre | Fusion/Frittage<br>projection de<br>poudre |
|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------|
| Géométrie par construction ex nihilo | XXX                              | XX                                         |
| Géométrie par ajout de forme         | X                                | XXX                                        |
| Complexité des pièces                | XXX                              | XXX                                        |
| Diversités des matériaux             | XX                               | XX                                         |
| Propriétés mécaniques                | XXX                              | XXX                                        |
| Textures                             | X                                | X                                          |
| Consommation de poudres              | € € €                            | € €                                        |
| Prix des machines                    | € €                              | € € €                                      |

Légende : X=pas adapté ou peu performant  
 XXX=très adapté ou très performant

TABLE 8 – Résumé des caractéristiques des principales technologies

### 5.2 SWOT de la fabrication additive métallique

|                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Forces</b><br>Géométrie de pièces très complexes<br>Technologie innovante<br>Gain de temps pour des formes complexes et petites séries                                                                             | <b>Faiblesses</b><br>Technologies relativement récentes<br>Inadapté à la production en grandes séries actuellement                                               |
| <b>Opportunités</b><br>Nouvelles possibilités de réalisations<br>Réalisation de pièce impossible en usinage traditionnel<br>→ nouvelles opportunités de conception<br>Variation continue de propriétés fonctionnelles | <b>Menaces</b><br>Obsolescence des machines due aux développements de nouvelles technologies<br>Qualification des performances des pièces en fonctionnement réel |

TABLE 9 – SWOT de la fabrication additive métallique

## 6 Impact environnemental de la fabrication additive

Depuis le début des années 2000, l'environnement est devenu un enjeu sociétal majeur et impacte tous les domaines, notamment l'industrie. On cherche ainsi à utiliser des procédés de plus en plus propres et économes à la fois en énergie et en matière. Dans ce contexte, il devient donc légitime de se demander quel est l'impact environnemental de la fabrication additive et si possible de le comparer aux procédés utilisés actuellement. La prise en compte des aspects environnementaux dans les procédés de fabrication est considérée comme l'un des huit piliers majeurs du développement des procédés industriels dans les dix années à venir. Il importe donc de ne pas négliger ce critère qui sera progressivement intégré dans les règles de certification.

Comme évoqué de nombreuses fois, la fabrication additive est définie comme étant le procédé de mise en forme d'une pièce par ajout de matière, à l'opposé de la mise en forme traditionnelle par enlèvement de matière (usinage). Ainsi, à première vue, la fabrication additive présente l'avantage de n'utiliser que la quantité exacte de matière pour produire une pièce, là où la mise en forme traditionnelle par enlèvement de matière va créer des copeaux et ainsi utiliser beaucoup plus de matière pour produire une même pièce. De plus, on parle souvent de conception optimisée lorsque l'on parle de fabrication additive ou d'écoconception. Ces termes regroupent les techniques qui permettent par exemple d'alléger une pièce en exploitant les nouvelles possibilités qu'offre la FA : non seulement la quantité de matière pour obtenir une géométrie donnée peut être réduite par rapport à un autre procédé, mais encore et surtout la FA donne accès à de nouvelles géométries, et donc à de nouvelles conceptions optimisées pour des usages donnés ; c'est sur ce point que les industries du transport, tout particulièrement aéronautique, trouvent un intérêt évident. De nombreux rapports évoquent également l'impact des choix de trajectoires dans la réalisation d'une pièce. En effet, en prenant en compte des facteurs tels que la puissance du laser nécessaire, la consommation de matière ou encore la consommation électrique des moteurs responsables du déplacement des buses, il est possible d'optimiser la stratégie d'usinage d'une pièce afin de réduire son impact environnemental. Le fait de ne pas utiliser d'outils coupants (qui sont des consommables) peut être un paramètre important [Ker13].

Cependant, si on regarde de plus près, le fait d'utiliser la quantité exacte de matière est applicable pour des procédés comme la fusion laser par projection de poudre ou bien le dépôt de fil fondu (polymère) mais pas pour des procédés comme la stéréolithographie ou la fusion sur lit de poudre. En effet, dans ces deux derniers procédés, seule une partie de la poudre utilisée est fondue ou est polymérisée. Il est ensuite possible de réutiliser la poudre non transformée mais elle ne peut être considérée comme neuve. Ainsi pour ces procédés, la poudre déposée avant transformation doit être un mélange présentant un certain pourcentage de poudre neuve que l'on peut combiner avec un certain pourcentage de poudre " recyclée ".

Nous avons également vu précédemment grâce au test comparatif mené par l'Irépa que la fabrication additive présente l'avantage d'être un procédé plus rapide que l'usinage classique. En effet, cette étude montre que pour la réalisation d'une hélice à trois pâles, le temps total de travail sur la pièce (rechargement + usinage) est de 45 min avec un procédé type CLAD alors qu'elle est de 3,5 heures en utilisant seulement l'usinage classique. Le fait d'avoir un temps d'utilisation des machines quasi 5 fois inférieur avec la fabrication additive présente donc un gain énergétique indéniable.

Un autre point positif concernant la fabrication additive est qu'elle permettrait de re-

localiser la production actuellement délocalisée de certains produits au plus proche du consommateur. On économise ainsi tout l'impact du transport de produits venant parfois de l'autre bout du monde.

Les possibilités que la fabrication additive offre en ce qui concerne la réparation peuvent également être intéressantes. S'il devient possible et moins coûteux de réparer un produit rapidement et facilement plutôt que de le jeter un gâchis environnemental conséquent est évité [Hei13].

## 7 Bibliographie

### Références

- [Arc15] Arcam. Products, 2015.
- [Boi09] S. Boisselier, D. & Sankare. Rapid manufacturing by laser cladding : the clad process. In *Assises Européennes du prototypage rapide*, 2009.
- [Har11] T. Hardenne. Application du laser cladding au rechargement et à la fabrication de pièces. Technical report, Université de Liège, 2011.
- [Hei13] P. Heinrich. L'impression 3d - ou fabrication additive. Technical report, Philippe Heinrich Consulting, 2013.
- [Hen14] S. Henry, E. & Vaillant. La fabrication rapide : focus sur la lbm (laser beam melting). *Lettre 3AF - Science et technologie*, 16 Octobre 2014.
- [Ker13] F. & Ponche R. & O. & Mognol P. & Hascoët J-Y. Kerbrat, Le Bourhis. Evaluation de la performance environnementale des procédés de fabrication. In CFM, editor, *Congès Français de Mécanique*. CFM Bordeaux, Aout 2013.
- [Las15] DMA Laser. Comparatif laser cladding - tig. Technical report, DMA Laser, 2015.
- [Mac13] F. Machi. Rechargement et fabrication additive métallique par fusion laser : le temps de l'industrialisation. Technical report, IREPA Laser, Octobre 2013.
- [Mar14] G. Marion. L'impression 3d par fusion de faisceau d'électrons, on vous explique tout !, Mai 2014.
- [PEP12] PEP. L'outillage rapide : la technique de frittage laser par poudre. Technical report, Pole Européen de Plasturgie (PEP), 2012.
- [Tru12] Trumpf. Industrial applications of laser cladding and the equipment required. In *Manufacturing Innovations in Laser Additive Manufacture*, page 4, RMIT University, Melbourne, June 2012. RMIT University.
- [Ver14] B. Verquin. Tour d'horizon des procédés de fabrication additive. In *Journée Technique Blangy-sur-Bresle 14/04/2014*. CETIM, 2014.