

# LA FABRICATION ADDITIVE PAR ARC ELECTRIQUE

La fabrication additive est un processus pour la fabrication de produits sur la base de modèles 3D, en ajoutant du matériau couche par couche, ceci contrairement aux méthodes de production conventionnelles, telles que l'usinage de matériaux. Le terme 'fabrication additive' comprend une large gamme de technologies, telles que le selective laser melting (SLM), la direct laser fabrication ou les processus avec un arc électrique pour l'ajout de fil. Ces technologies sont utilisées dans diverses branches de l'industrie, de l'automobile, de l'électronique, des articles de consommation comme pour les applications médicales. Beaucoup d'entreprises montrent un intérêt dans la fabrication additive pour la conception de meilleurs produits, à cause des avantages du processus par rapport aux techniques traditionnelles.

Thomas Baaten, Koen Faes – Institut Belge de la Soudure  
Coauteur: Aurélie Anne, Laurent Dubourg - Institut MAUPERTUIS - Centre de Ressources Technologiques en Productique & Mécatronique

## CONTEXTE

Sous le terme d' « l'impression 3D », se regroupent différents procédés de fabrication additive (additive manufacturing). Les appellations et les principes techniques diffèrent, mais l'idée de base est commune : réaliser des « pièces » par ajout de matière, en

opposition au concept traditionnel par enlèvement de matière.

Cette révolution dans la façon de fabriquer, comme beaucoup d'innovations, présente de forts enjeux économiques et techniques. Ce présent bulletin se focalisera sur les intérêts, applications et limites de la fabrication additive de pièces métalliques par arc électrique (Figure 1).

## PRINCIPE

Comme le suggère son nom, la fabrication additive par arc emploie une énergie électrique pour mettre en fusion un fil d'apport. Ce type de technologie s'apparente à la technologie traditionnelle du soudage. Elle progresse en raison du développement de plus en plus pointu et spécifique des équipements de soudage : géométrie des torches, synergies et capacité des générateurs de courant, etc.

## INTERETS ET APPLICATIONS

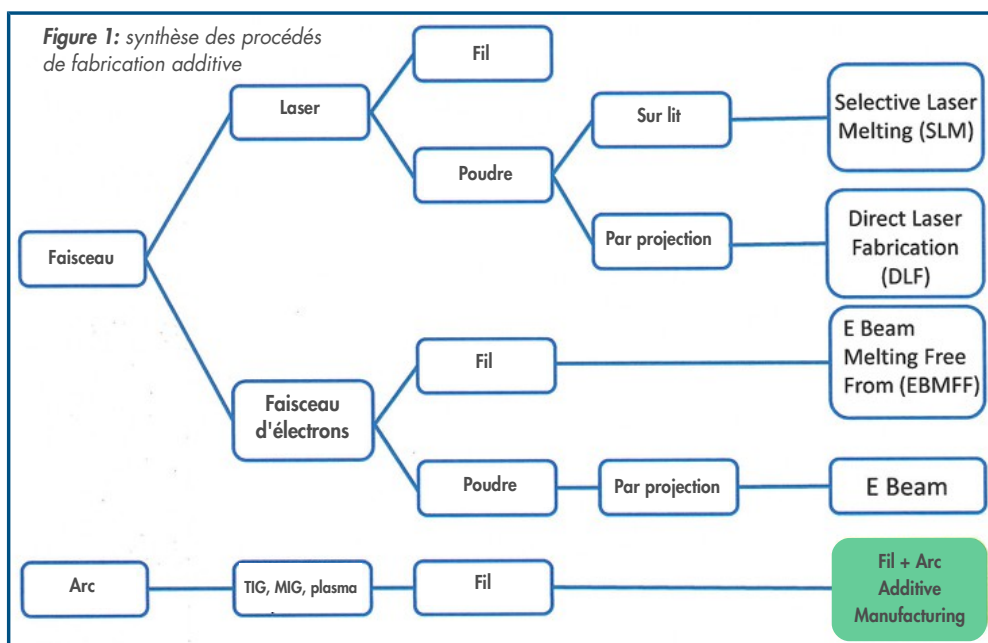
Tout comme les autres procédés de fabrication additive, la technologie arc permet la fabrication de pièces complexes (liberté dans la conception) et coûteuse (faible taux de déchets). Outre ces avantages généraux communs par rapport à l'usinage, la fabrication par arc présente des intérêts qui lui sont propres en termes de :

- Investissement: l'investissement initial de la technologie est analogue à celui d'un équipement de soudage. Le budget machine requis est moins élevé qu'un procédé par faisceau ;
- Rendement: les procédés arc présentent des taux de déposition plus importants que les procédés par laser (figure 2).
- Dimension des pièces: la robotisation des procédés et le type de technologie s'accordent bien à la réalisation de pièces de taille importante (géométrie 3D des figures 4 et 5).
- Matériaux: contrairement aux applications par laser, la fabrication additive par arc n'est pas dépendante de la réflectivité des matériaux (cas des Aluminium, Titane, Bronze).

### Cas d'application sur Titane:

La fabrication additive est particulièrement adaptée pour la création de pièces complexes à forte valeur ajoutée.

Les applications titane sont donc logiquement visées. Elles se retrouvent notamment dans l'aérospatial, le médical, l'outillage, ...



| TECHNOLOGIE                      | TAUX DE DEPOT A L'HEURE (KG/H) |
|----------------------------------|--------------------------------|
| DIRECT LASER FABRICATION (DLF)   | 0,9 – 4,5                      |
| SELECTIVE LASER MELTING (SLM)    | 0,06 – 0,12                    |
| ELECTRON BEAM MELTING FREE       | 10                             |
| SOUDAGE TIG AVEC FIL D'APPORT    | 1,5                            |
| SOUDAGE PLASMA AVEC FIL D'APPORT | 1,8                            |
| COLD METAL TRANSFER (CMT)        | 2,6                            |

Figure 2: taux de déposition de différentes technologies de fabrication additive [1]

Figure 3: composant aérospatial réalisé en Plasma+fil [1]

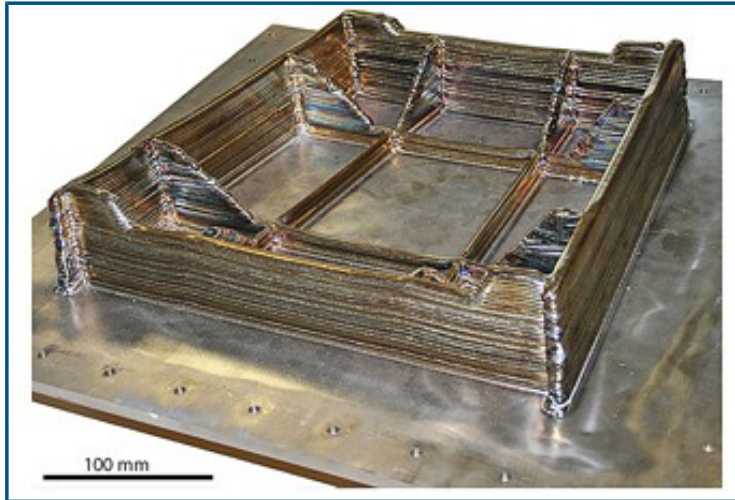
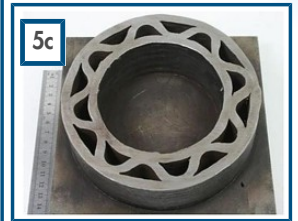


Figure 4: essais MX3D projet de fabrication additive de structure de pont [3]

Figure 5: fabrication d'ogives par MIG pulsé [4] –

hauteur: 800 mm; diamètre: 160 mm; épaisseur: 18,8 mm; masse: 32 kg



L'Université de Cranfield a démontré la faisabilité de fabrication rapide de pièces titane présentant de bonnes reproductibilités de qualité de dépôt (figure 6).

Une modélisation des effets des paramètres sur la géométrie du cordon leur a permis de visualiser des volumes de CAO prédictifs de pièces fabriquées. Cette étape permet de mieux appréhender la stratégie de trajectoire et de la modé-

liser hors ligne. Ces travaux ont également mis en évidence l'effet de l'empilage des passes sur la microstructure et le phénomène de distorsion longitudinale.

D'une manière générale, la première et la dernière passe présentent des structures martensitiques, alors que les passes du milieu présentent des croissances de grains colonnaires stimulées par le chauffage des passes suivantes.

## LIMITATIONS

Certaines limitations sont inhérentes aux procédés arc:

- Le soudage arc présente de très fortes projections et distorsions des dépôts. Ceci limite l'empilage de dépôts avec une qualité répétable (Figure 7).

Des variations de la hauteur du dépôt de l'ordre du millimètre ont été observées sur des applications TIG et Plasma+ fil [2]. Les phases d'amorçage sur substrat froid peuvent générer des surépaisseurs, alors que les extinctions peuvent conduire à des affaiblissements de matière.

La multidirectionnalité des passes et l'homogénéité d'empilement sont des challenges techniques de la fabrication additive par arc.

- Refroidissement inter-passes: suivant les matériaux, les temps de refroidissement nécessaires entre passes peuvent être supérieurs à ceux de dépose; ceci, pour des raisons de qualité de dépose, de contraintes résiduelles et d'homogénéité de propriétés au sein de la pièce.
- Cavité et porosité: les procédés avec apport de fil peuvent présenter une moins bonne compacité de dépôt, comparés à des procédés poudre. Les tensions de surface et angles de raccordement des cordons peuvent aussi générer des problématiques de porosité lors de la juxtaposition de passes.

## LE PROCÉDE CMT (COLD METAL TRANSFERT)

Le procédé CMT (développé par Fronius) favorise la stabilité de l'arc et semble répondre en partie aux problématiques exprimés ci-avant. Le principe d'avance et de recul du fil permet de minimiser l'apport de chaleur, de réduire les projections et d'assurer une déposition plus précise.

Une réduction de l'ordre de 50% des dilutions par rapport à un procédé MIG ou TIG fil froid est annoncée par Fronius. Ceci présente un fort intérêt technique au niveau des déformations. Le procédé CMT a évolué ces dernières années en étant plus spécifique aux applications demandées, en l'occurrence :

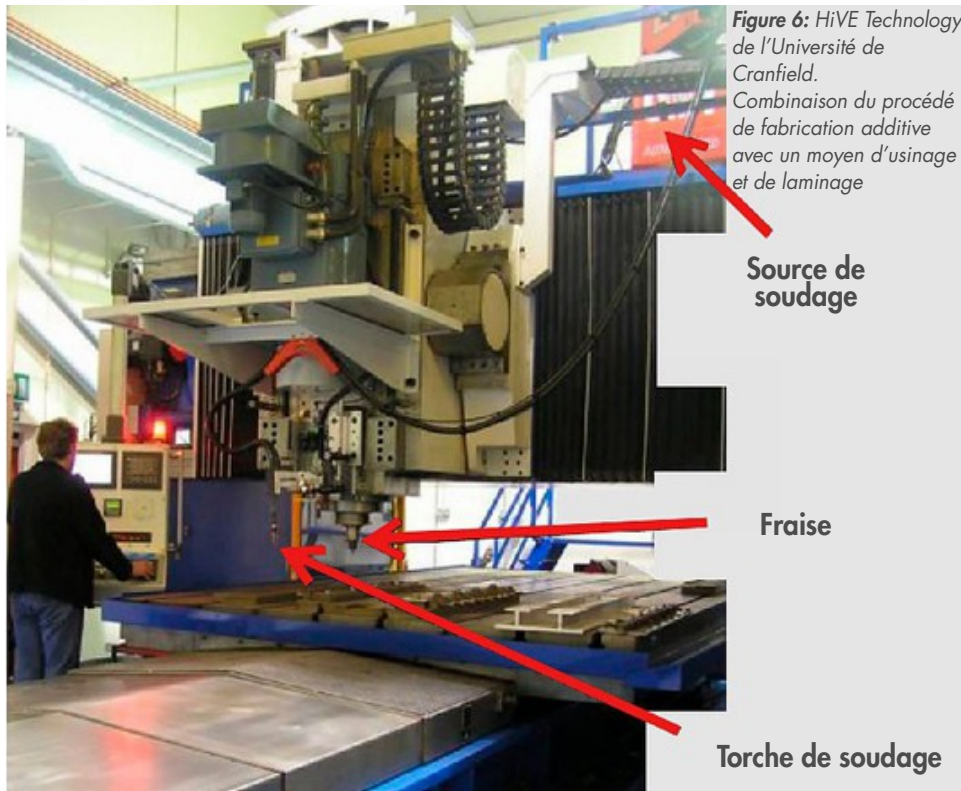


Figure 6: HiVE Technology de l'Université de Cranfield. Combinaison du procédé de fabrication additive avec un moyen d'usinage et de laminage

Source de soudage

Fraise

Torche de soudage



Figure 7: essai de fabrication additive sur Titane à l'électrode [3]



Figure 8: exemple de 'mur' de Ti6Al4V par Plasma+fil [2]

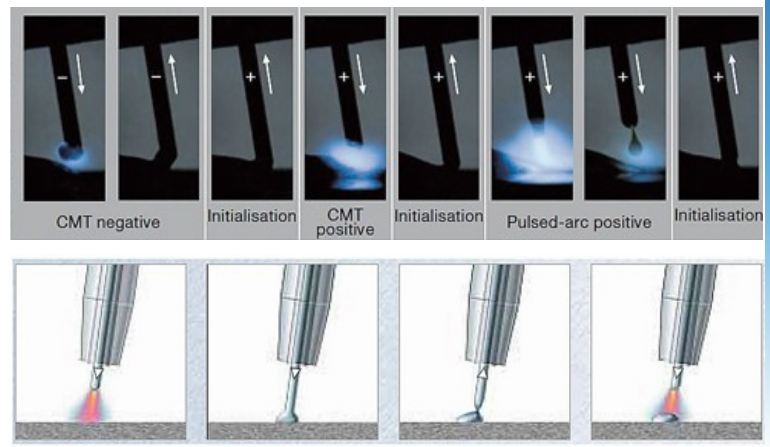


Figure 10: déclinaison de postes CMT (a : CMT, b : advanced pulse)



Figure 9: FRONIUS TransPuls Synergic 3200 CMT G/W – Application du CMT Pin [www.alganmetal.com.tr](http://www.alganmetal.com.tr)

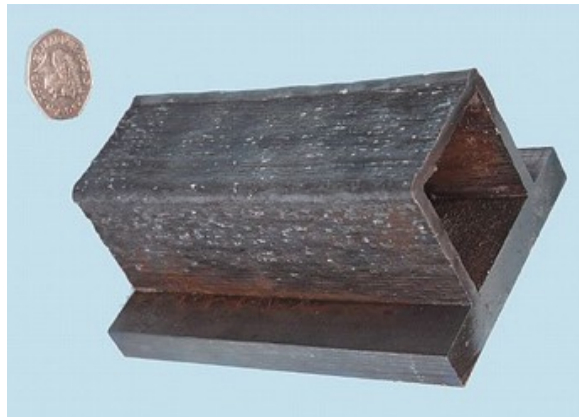
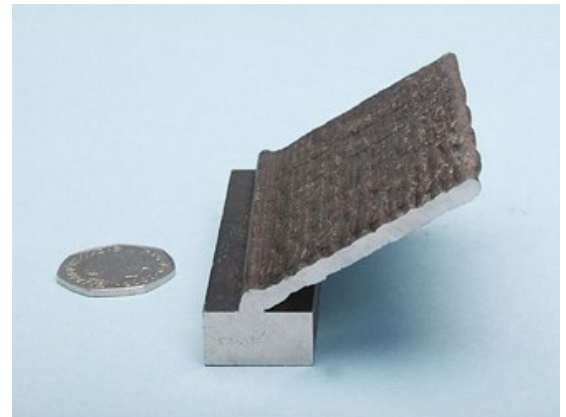


Figure 11: exemples de fabrication de pièces en acier par CMT



- CMT pulse (CMT-P): combinaison de cycle CMT et de cycle d'impulsion de l'arc;
- CMT advanced (CMT-ADV): alternance de polarités positives et négatives en CMT;
- CMT advanced pulse (CMT-PADV): ce procédé pourrait présenter un intérêt pour des applications de fabrication d'alliage aluminium [6];
- CMT pin: construction ponctuelle (figure 9);
- Twin CMT: démarrage synchronisé de deux sources de courant arc (deux fils dans une buse) réglables séparément. L'intérêt majeur se porte sur les vitesses de soudage vis-à-vis de la capacité de déposition. Cependant, cette option limite la capacité de travailler en multi-direction par opposition à un seul arc.

## ESSAIS SUR ACIER

Le procédé de fabrication additive par CMT

offre de grandes possibilités en terme de géométrie de pièces. (Figure 11 [7]). La capabilité d'angle d'inclinaison des murs déposés laisse présager une certaine souplesse en terme de trajectoire, dans la mesure où les vitesses de déplacement ne sont pas trop élevées (inférieures à 0,4 m/min. dans le cas de murs horizontaux [7]). La figure 12 donne un aperçu paramétrique des effets du couple vitesse d'avance et de fil sur les largeurs de dépose.

## CAS D'APPLICATION SUR ALUMINIUM

Les procédés conventionnels arcs ne semblent pas adaptés aux applications aluminium en raison du fort taux de porosités générées dans le bain. Le procédé CMT, et plus particulièrement le CMT-PADV, semble plus approprié. L'apport calorifique limité, et l'effet de décapage de l'alumine sur l'extrémité du fil d'apport par l'inversion

de polarité, réduit significativement les porosités. A ce phénomène s'ajoute l'affinement des grains, comparé au CMT-P (figure 13 [6]).

## CONCLUSIONS – PERSPECTIVES

De l'aérospatial à la joaillerie, du prototypage à la réalisation industrielle, du particulier au grand donneur d'ordre, la fabrication additive évolue et intéresse de plus en plus.

La fabrication par arc peut répondre aux attentes d'utilisateurs recherchant une grande productivité et un faible investissement. Cependant, la faible qualité géométrique des dépôts ainsi que le fort chauffage des pièces induisent des distorsions et des hétérogénéités des propriétés limitant les applications.

Les entreprises qui sont intéressées par ces techniques, peuvent toujours contacter l'IBS (Koen Faes, [koen.faes@bil-ibs.be](mailto:koen.faes@bil-ibs.be)). □

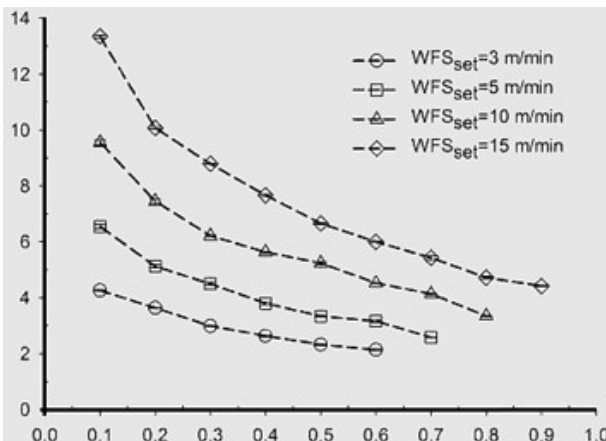


Figure 12: effet de la vitesse de déplacement (TS) sur la largeur efficace du mur (EWT) pour différentes vitesses de fil (WFS)

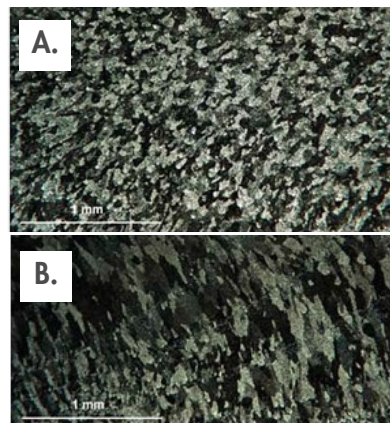


Figure 13: microstructure d'un « mur » Alu 2023 vfil = 6 m/min.  
a) CMT-PADV (va = 0,6 m/min.)  
b) CMT-P (va = 0,8 m/min.)

## REFERENCES

- [1] F. Martina (2014). Investigation of methods to manipulate geometry, microstructure and mechanical properties in titanium large scale wire+arc additive Manufacturing : PHD these. Cranfield University.
- [2] F. Martina. Investigation of benefits of plasma deposition for additive layer manufacture of Ti-6Al-4V. Journal of Materials Processing Technology, Volume 212, Issue 6, June 2012 Pages 1377-1386
- [3] Innovative process model of Ti-6Al-4V additive layer manufacturing using cold metal transfer (CMT). Welding Engineering Research Centre (WERC), Cranfield University
- [4] <http://mx3d.com/about/>
- [5] Dr P. Colegrove. High deposition rate high quality metal additive manufacture using wire + arc technology
- [6] J. Gua. Wire+arc additive manufacture of aluminium
- [7] P. Kazanas. Fabrication of geometrical features using wire and arc additive