



**HAL**  
open science

## **Simulation thermique d'empilement de dépôts de fil d'Aluminium A4043 avec le procédé MIG-CMT**

Sébastien Rouquette, Arturo Gomez, Luis Corona, Frédéric Deschaux- Beaume

### ► **To cite this version:**

Sébastien Rouquette, Arturo Gomez, Luis Corona, Frédéric Deschaux- Beaume. Simulation thermique d'empilement de dépôts de fil d'Aluminium A4043 avec le procédé MIG-CMT. 26ieme congrès de la société française de thermique, May 2018, pau, France. <hal-04539578>

**HAL Id: hal-04539578**

**<https://hal.science/hal-04539578v1>**

Submitted on 9 Apr 2024

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

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



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC 4.0 - Attribution - Non-commercial use - International License

# Simulation thermique d'empilement de dépôts de fil d'Aluminium A4043 avec le procédé MIG-CMT.

Sébastien ROUQUETTE\*, Arturo GOMEZ, Luis CORONA, Frédéric DESCHAUX-BEAUME.

LMGC, Université de Montpellier, CNRS, Pl. Eugène Bataillon, 34095 MONTPELLIER.

(\*auteur correspondant : [sebastien.rouquette@umontpellier.fr](mailto:sebastien.rouquette@umontpellier.fr))

## Résumé

Un procédé de fabrication additive arc et fil a été développé pour la réalisation de dépôts d'aluminium. Les premiers essais ont consisté à déterminer des plages de fonctionnement qui permettent d'obtenir des dépôts réguliers. On a remarqué un pompage thermique important de la plaque support lors des 6 premiers dépôts. Une modélisation thermique du procédé a été entreprise dans le but de comprendre les phénomènes thermiques survenant lors de l'opération de déposition. On a remarqué que l'effet de pompage thermique de la plaque support est négligeable après le 9<sup>ième</sup> dépôt.

## Nomenclature

### Abbréviations

FA Fabrication Additive

EBM Electron Beam Melting

SLM Selective Laser Melting

PWD Plasma Wire Deposition

PM Poudre Métallique

MIG Metal Inert Gas

CMT Cold Metal Transfer

PLA Poly-Lactic acid

ABS Acrylonitrile butadienestyrene

### Symboles

$\Omega$  domaine d'étude

$R^3$  espace vectoriel Euclidien

L longueur

l largeur

e épaisseur

$\vec{x}$  vecteur dans l'espace  $R^3$

$\Gamma_i$  frontière i du domaine  $\Omega$

$t_f$  temps final de la simulation

$T_{(\vec{x},t)}$  température, K

$\rho_{(T)}$  masse volumique, kg.m<sup>-3</sup>

$C_p(T)$  capacité thermique, J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

t temps, s

$\partial$  dérivée partielle

$\lambda_{(T)}$  conductivité thermique, W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

$\Delta H_{fus} = 397 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  chaleur latente de fusion

$T_f = 909 \text{ K}$  température de fusion AA4043

$h_{(T)}$  coefficient d'échange convectif, W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>

$\epsilon$  coefficient d'émissivité

$\sigma$  constante de Stefan, W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-4</sup>

$T_{amb}$  température ambiante, K

$\vec{n}$  vecteur normal

$R_{thc}$  résistance thermique de contact, m<sup>2</sup>.K.W<sup>-1</sup>

$V_s$  vitesse de soudage, mm/min

I intensité de soudage, A

U tension de soudage, V

$\eta$  rendement du procédé MIG

a, b, c semis-axes de l'ellipsoïde dans les directions x, y, z

$f_i$  fraction d'énergie déposée dans la zone i de l'ellipsoïde

$Q = \eta \cdot U \cdot I$  source de chaleur volumique, J.m<sup>-3</sup>

## 1 La fabrication additive à l'arc et fil

La Fabrication Additive est une technologie prometteuse car elle permet d'économiser de la matière première et de réduire le temps entre la fabrication et la mise à disposition de la pièce. De plus, la conception de la pièce FA permet de créer des formes « libres » ce qui permet, par exemple, d'améliorer une propriété fonctionnelle ou de diminuer le poids de la pièce. Un système de FA classique se compose d'un système de translation/rotation, d'une source de chaleur et d'un matériau qui peut être sous forme de fil ou de poudre. Plusieurs procédés de FA ont été développés depuis le début des années 2000 pour la fusion localisée de

poudres métalliques. Ces procédés utilisent soit un faisceau d'électron, soit un laser ou un arc plasma comme source de chaleur pour fondre la poudre métallique. La PM est soit déposée sur une plaque (on parle de lit de poudre) soit projetée. Ces procédés de FA sont déjà employés dans l'industrie aéronautique pour la réalisation de pièces critiques : des longerons, parties du train d'atterrissage [1]. Ces procédés de FA : EBM, SLM, ..., ont un prix d'achat qui démarre à partir de 500k€ à plusieurs M€. Les pièces réalisées sont d'une très grande précision, elles sont généralement de petite taille (chambre de fabrication < 0,5m) et le taux de dépôt du matériau est faible 0,05 à 0,9 kg [2].

Récemment, un procédé dédié au soudage, le MIG, a été employé comme procédé de FA en utilisant un fil métallique. La fusion du matériau, un fil-électrode fusible, est obtenue grâce à l'arc électrique généré entre le support et l'extrémité du fil. La protection contre l'oxydation est généralement réalisée par l'apport d'un gaz inerte (Argon) dans la zone de fusion. La société Fronius a mis au point un générateur MIG dit CMT qui permet de contrôler le transfert de chaleur et de matière avec précision. Ce générateur de soudage : MIG-CMT, est un procédé très prometteur pour la réalisation de pièces par FA à l'arc et fil. Ce procédé permet de réaliser des pièces de grandes dimensions (plusieurs mètres) mais avec un état de surface grossier. Les pièces réalisées par FA à l'arc et fil à l'aide du procédé MIG-CMT nécessite un parachèvement mécanique de type usinage, par exemple, ainsi qu'un traitement thermique pour éliminer les contraintes résiduelles. Le coût d'une installation FA avec le procédé MIG-CMT (robot, procédé CMT, positionneurs ...) est inférieur à 200k€. Il est très intéressant pour la réalisation de pièces de moyenne (0,5m) à grandes dimensions.

Depuis plus de deux ans, nous travaillons sur la FA à l'arc avec du fil en alliage d'aluminium Al5Si. Un banc expérimental a été développé, il comprend une table permettant des déplacements dans les 3 directions (XYZ) associé à un générateur MIG-CMT dont la torche de soudage est fixe. Les essais expérimentaux ont consisté à déterminer l'effet des paramètres du procédé CMT (tension, vitesse de déplacement, intensité, ...) sur la géométrie du dépôt (largeur, hauteur, mouillage). Les essais ont montré que la géométrie du dépôt était fortement transitoire lors des 10/15 premiers millimètres et qu'elle se stabilisait par la suite. L'empilement de plusieurs dépôts a montré que l'incrément de hauteur entre dépôts diminuait et que la largeur augmentait jusqu'au 6ième dépôt pour les paramètres opératoires utilisés. Afin de mieux comprendre les transferts thermiques mis en jeu au cours du dépôt, nous avons décidé de modéliser les transferts thermiques lors de l'empilement de plusieurs dépôts. Cette simulation thermique servira, par la suite, à évaluer les contraintes résiduelles finales du « mur » (superposition de plusieurs dépôts) ou encore à prédire la microstructure finale de ce « mur ». Un modèle thermique 3D est défini. La source de chaleur provenant de l'arc électrique est modélisée à l'aide d'une gaussienne à double ellipsoïde. Plusieurs simulations sont réalisées pour aller jusqu'à 12 dépôts afin de mieux comprendre l'effet du pompage thermique de la tôle support sur les caractéristiques géométriques des dépôts empilés.

## 2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est présenté sur la figure 1. Le banc d'essai est inspiré des imprimantes 3D utilisées pour le dépôt de fil en PLA ou ABS. L'idée principale a consisté à mettre au point un dispositif FA « peu coûteux ». Le dispositif sans le générateur de soudage a coûté moins de 2 k€. Le générateur MIG-CMT a coûté 25k€. Le dispositif développé permet de travailler dans un volume de 0,3x0,3x0,3m<sup>3</sup>. Le pilotage des déplacements est assuré à l'aide de logiciels « libres » : Marlin et carte Arduino pour le contrôle des moteurs pas à pas, Slicer pour le « tranchage » de la géométrie en épaisseurs et Repetier pour le pilotage de la fabrication. Le générateur MIG-CMT a été choisi car il contrôle électroniquement la chaleur qui sert à fusionner le fil métallique. L'intensité de soudage, la tension ainsi que la vitesse de dévidage du fil sont contrôlés par le générateur. Le cycle CMT est montré dans la figure 2 et il

est défini à l'aide de 8 paramètres. Il a été conçu pour le soudage des fines épaisseurs car il permet d'utiliser des niveaux d'énergie de soudage très faibles.

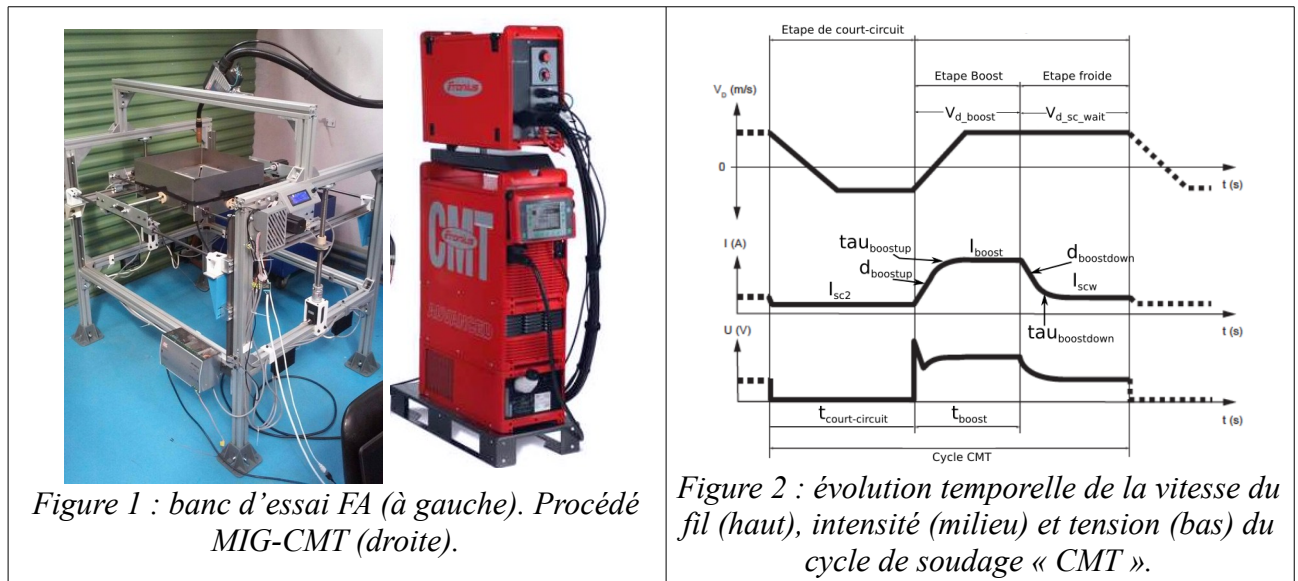


Figure 1 : banc d'essai FA (à gauche). Procédé MIG-CMT (droite).

Figure 2 : évolution temporelle de la vitesse du fil (haut), intensité (milieu) et tension (bas) du cycle de soudage « CMT ».

Les premiers essais ont consisté à définir les points de fonctionnement du générateur CMT intéressants. Les points de fonctionnement correspondent à un diamètre de fil donné et à un matériau donné. Pour le point 5, il correspond à un fil d'Al5Si de diamètre 1,2mm, le point 6 à un fil de diamètre 1,5 mm, ... Pour chaque point de fonctionnement, on a réalisé des dépôts de 80 à 90mm de long et on a fait varier la vitesse de déplacement. Ces résultats sont exposés dans les figures 3 et 4. On remarque que lorsque la vitesse augmente, la largeur du dépôt diminue jusqu'à obtenir des dépôts discontinus (au delà de 2400 mm/min). On constate aussi un problème au démarrage du dépôt (haut de la photo, figure 3) : une grosse goutte suivie d'une réduction de la section du dépôt puis le reste du dépôt semble garder une forme géométrique constante. Ceci est dû à la conductivité thermique élevée de l'aluminium. Le plateau support absorbe toute la chaleur, empêchant le métal liquide de s'étaler, puis monte en température rapidement permettant un étalement du métal liquide.

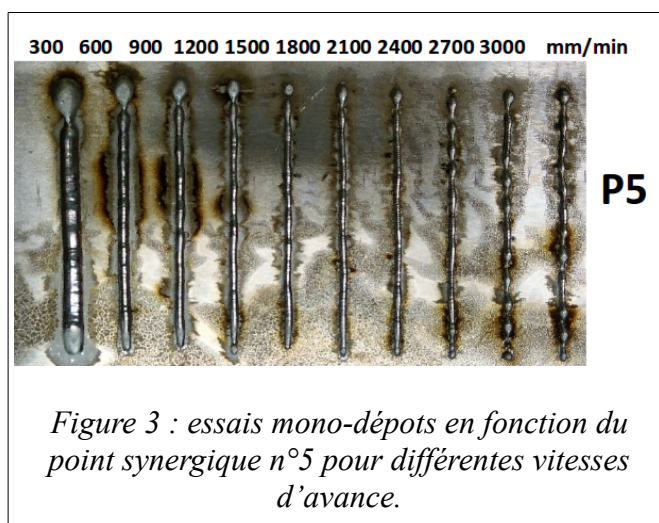


Figure 3 : essais mono-dépôts en fonction du point synergique n°5 pour différentes vitesses d'avance.

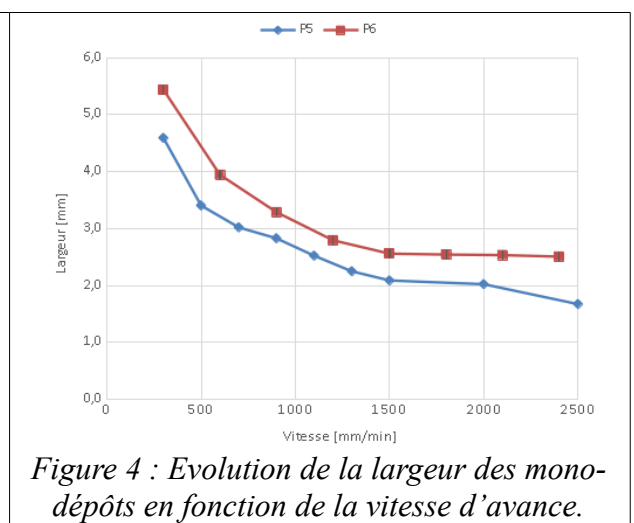
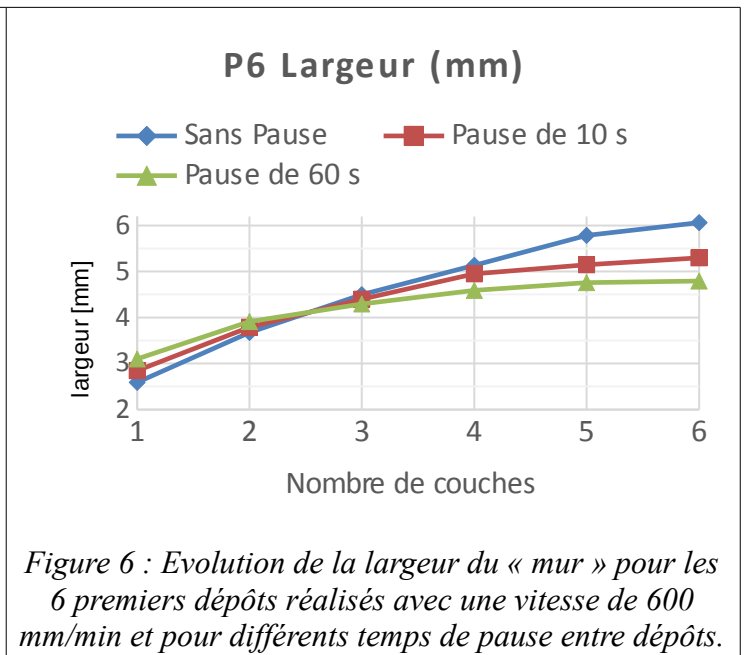
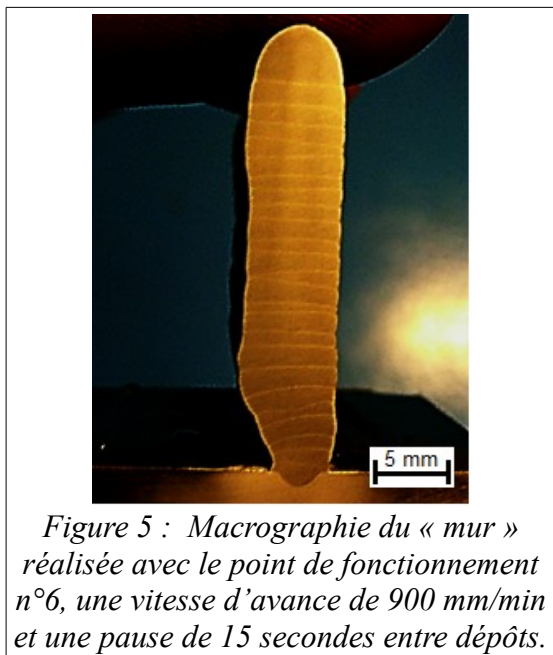


Figure 4 : Evolution de la largeur des mono-dépôts en fonction de la vitesse d'avance.

Par la suite, des empilements de dépôts ont été réalisés, aussi appelés « mur ». On a constaté une différence dans la largeur du mur lors des 6/7 premiers dépôts comme on peut le voir sur la macrographie présentée dans la figure 5. Au delà de la 7ième couche, les dépôts semblent conserver les mêmes caractéristiques géométriques (largeur, hauteur). Ce

phénomène est aussi du à la conductivité thermique élevée de l'aluminium qui propage la chaleur par conduction vers la plaque support. Ce phénomène s'estompe après 6/7 couches. On a remarqué aussi que l'ajout d'une pause entre chaque dépôt (de longueur 90 mm) permet d'obtenir une stabilisation de la largeur après 6 dépôts, figure 6. La mesure de la largeur des dépôts a été réalisée à l'aide d'un scanner 3D Bruker. Le scanner permet d'obtenir un nuage de points représentatif de la surface du dépôt au format STL. Ensuite, le logiciel Geomagic est utilisé pour exploiter ces données afin de déduire la largeur et hauteur moyenne du dépôt avec une précision de 10 $\mu$ m.



Afin de bien appréhender les transferts thermiques au sein de la plaque support et des dépôts empilés, nous avons réalisé une simulation thermique aux éléments finis de ce procédé. Cette simulation thermique pourra servir de base à d'autres études comme : la prédiction des contraintes résiduelles ou la microstructure finale, ...

### 3 Modélisation des transferts thermiques

Le domaine d'étude  $\Omega \in R^3$  est défini par une plaque « support » en aluminium de dimension  $L \times l \times e = 120 \times 15 \times 3$  mm, figure 7. La géométrie considérée possède un axe de symétrie ce qui permet de considérer qu'une moitié de la plaque et du dépôt. Le dépôt a une longueur de 100mm et une section circulaire de rayon 1,9 mm. La section du dépôt « simplifiée », a été extrapolée à partir d'une macrographie, voir figure 8. Le déplacement de la source de chaleur (torche de soudage) est dans la direction (Oy). La plaque support en aluminium est désignée par le symbole  $\Omega$ . Les surfaces du domaine  $\Omega$  sont définies par  $\Gamma_{sup}$  la surface supérieure où est réalisé le dépôt métallique en  $z=3$ mm,  $\Gamma_{inf}$  est la surface inférieure à  $z=0$ mm (cette face est en contact avec le plateau mobile du banc FA),  $\Gamma_{lat}$  est la surface latérale à  $x=15$ mm,  $\Gamma_{ini}$  est la surface à  $y=0$ mm et  $\Gamma_{fin}$  est la surface à  $y=120$ mm.  $\Gamma_{sym}$  est le plan de symétrie de la plaque en  $x=0$ mm.

Soit  $\Omega \in R^3$  le domaine d'étude et le vecteur  $\vec{x} \in \Omega$  défini par  $\vec{x} = (x, y, z)$ . Soit  $I$  l'intervalle de temps de la simulation défini comme  $I = [0, t_f]$ . L'équation de la conduction de la chaleur appliquée au solide immobile  $\Omega$  avec une source de chaleur volumique  $Q$  s'écrit :

$$\frac{\partial(\rho_{(T)} \cdot C_p^{eq}(T) \cdot T)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial \vec{x}} \left( \lambda_{(T)} \frac{\partial T}{\partial \vec{x}} \right) = Q(\vec{x}) \quad \text{dans } \Omega \times I \quad (1)$$

avec  $\rho$ ,  $C_p^{eq}$  et  $\lambda$  sont respectivement la masse volumique, la chaleur spécifique et la conductivité thermique. Ces trois paramètres dépendent uniquement de la température. Le symbole « eq » du paramètre  $C_p^{eq}$  signifie qu'on prend en compte la chaleur latente de fusion  $\Delta H_{fus}$  dans le paramètre chaleur spécifique de la manière suivante :

$$C_p^{eq}(T) = C_p(T) + \Delta H_{fus} e^{-\frac{(T-T_f)^2}{\Delta T_f}} \quad (2)$$

avec  $T_f = \frac{T_{solidus} + T_{liquidus}}{2}$  et  $\Delta T_f = T_{liquidus} - T_{solidus}$ .

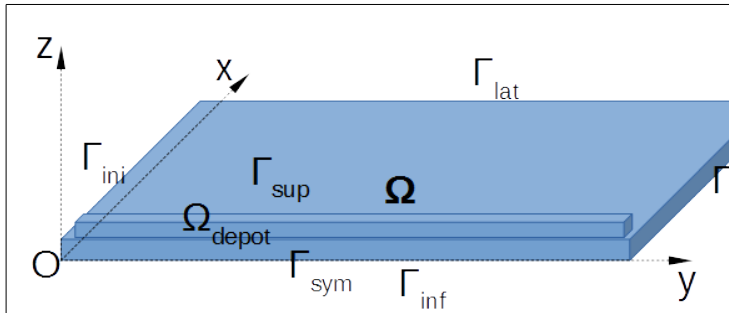


Figure 7 : géométrie utilisée pour la simulation numérique d'un dépôt de fil d'aluminium avec le procédé de soudage MIG-CMT.

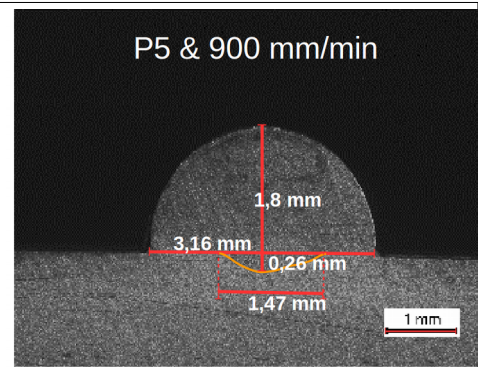


Figure 8 : macrographie d'une section d'un dépôt établie avec un microscope LEICA.

Les différentes frontières du domaine  $\Omega$  sont définies dans la figure 7. Elles sont soumises aux conditions aux limites suivantes :

$$\text{Sur } \Gamma_{sup} : -\lambda \left( \frac{\partial T(\vec{x},t)}{\partial \vec{n}} \right) \cdot \vec{n} = Q_{MIG}(\vec{x},t) + h(T_{(\vec{x},t)} - T_{amb}) + \varepsilon \sigma (T_{(\vec{x},t)}^4 - T_{amb}^4) \quad (3)$$

où le terme de gauche de l'équation (3) représente le flux de chaleur. Le premier terme de droite de l'équation (3)  $Q_{MIG}$  est l'apport de chaleur fourni par l'arc électrique, le second terme de droite représente les pertes de chaleur par convection avec  $h = 20 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  qui est le coefficient de convection thermique et le dernier terme de droite représente les pertes de chaleur par rayonnement avec  $\varepsilon = 0,2$  l'émissivité du matériau (cas de l'hypothèse d'un corps gris) et  $\sigma$  est la constante de Stefan-Boltzmann.

Sur les frontières  $\Gamma_{lat}$ ,  $\Gamma_{ini}$  et  $\Gamma_{fin}$ , on a des échanges thermiques par convection et par rayonnement entre la plaque « support » en aluminium et l'environnement ambiant (air) :

$$-\lambda \left( \frac{\partial T(\vec{x},t)}{\partial \vec{n}} \right) \cdot \vec{n} = h(T_{(\vec{x},t)} - T_{amb}) + \varepsilon \sigma (T_{(\vec{x},t)}^4 - T_{amb}^4) \quad (4)$$

Sur la frontière  $\Gamma_{sym}$ , on applique une condition de symétrie dans le plan (O,y,z) :

$$-\lambda \left( \frac{\partial T(\vec{x},t)}{\partial \vec{n}} \right) \cdot \vec{n} = 0 \quad (5)$$

La surface inférieure  $\Gamma_{inf}$  de la plaque est en contact avec la table mobile. Le matériau du plateau mobile est lui aussi en Aluminium. On modélisera ce contact Aluminium – Aluminium à l'aide d'une résistance thermique de contact  $R_{thc}$  calculée de la manière suivante :  $H_{thc} = \frac{1}{R_{thc}} = \frac{\lambda_{air}}{e_{air}}$ . On supposera une lame d'air d'épaisseur  $e = 0,1 \text{ mm}$  avec une

conductivité thermique de l'air de 0,0262 W/m/K. Cela donne une résistance thermique de contact de  $R_{thc} = 3,81e-3 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$  à la température ambiante. On a donc :

$$-\lambda \left( \frac{\partial T(\vec{x},t)}{\partial \vec{n}} \right) \cdot \vec{n} = H_{thc} (T(\vec{x},t) - T_{plateau}) \quad (6)$$

Afin de résoudre le système d'équations aux dérivées partielles (1) à (6), on lui associe une condition initiale pour le champ de température dans le domaine  $\Omega$  :

$$T(\vec{x},t=0s) = T_{amb} \approx 293 \text{ K} \quad (7)$$

La source de chaleur provenant de l'arc électrique a été modélisée à l'aide d'une gaussienne à double ellipsoïde comme proposée par Goldak [3]. Goldak et al [3] distinguent la partie avant (front) et arrière de la zone échauffée en les caractérisant avec un jeu de 3 coefficients a, b, c. Une expression gaussienne est aussi employée mais un coefficient différent est utilisé dans les 3 directions du repère. La double ellipsoïde Gaussienne est définie par l'expression mathématique suivante :

$$q_{(x,y,z,t)} = \frac{6\sqrt{3}fQ}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{-\left(\frac{3x^2}{c^2}\right)} e^{-\left(\frac{3y^2}{a^2}\right)} e^{-\left(\frac{3[z+v(\tau-t)]^2}{b^2}\right)} \quad (8)$$

avec  $f=f_f$  à l'avant de la torche et  $f=f_r$  à l'arrière sous la condition  $f_f+f_r=2$ . Le coefficient  $f$  permet d'obtenir des gradients thermiques plus importants à l'avant de la source de la chaleur et moins importants à l'arrière. On retrouve souvent des valeurs respectives pour  $f_f$  et  $f_r$  égales à 0,6 et 1,4 que ce soit pour simuler le soudage par faisceau d'électron [3] ou le soudage MAG [4,5]. Pour des raisons de continuité de la double ellipsoïde, une autre contrainte apparaît sur le coefficient  $c$  qui lui aussi prend une valeur différente sur la partie frontale de la source de chaleur par rapport à la partie arrière. On a

ainsi :  $\frac{f_f}{c_f} = \frac{f_r}{c_r}$  ce qui donne la relation suivante :  $f_f = 2 \frac{c_f}{C_f + C_r} = 2 - f_r$  [6].

## 4 Résultats numériques

Le logiciel libre « ELMER » a été utilisé pour la simulation thermique 3D (<https://www.csc.fi/web/elmer>). La géométrie et le maillage ont été réalisés avec le logiciel libre gmsh [7]. Le maillage créé avec gmsh est constitué de 50325 éléments finis tétraédriques. Dans la zone située entre le plan de symétrie ( $x=0$  mm) et le plan situé à  $x=1,9$  mm, la taille des éléments finis est de 0,3 mm puis elle augmente pour atteindre une taille de 1,67 mm en  $x=15$  mm ( $\Gamma_{lat}$  voir figure 7). Le pas de temps est fixé à 0,05s pour une durée de simulation de 21,67s (6,67s pour la partie chauffage plus 15s de refroidissement). La vitesse de déplacement de la source de chaleur a été fixée à 15mm/s. Le temps de calcul a duré environ 1h20 sur un ordinateur portable avec 4 cœurs fonctionnant à une fréquence 2,4GHz et une mémoire de 4GO (sous Ubuntu). Les éléments finis du dépôt sont « activés » au fur et à mesure de l'avance de la source de chaleur à l'aide d'une subroutine fortran (technique appelée « élément silencieux »). Les propriétés thermophysiques des éléments finis discrétisant le dépôt sont initialement affectées d'une valeur faible, 1e-6, tant qu'ils se situent devant la source de chaleur puis ils prennent les valeurs de l'aluminium 4043. Les expressions pour la densité, la chaleur spécifique et la conductivité en fonction de la température sont les suivantes [8] :

$$\rho_{(T)} = 2680 - 0,212(T - 293) \text{ tant que } T < T_f \text{ sinon } \rho_{liq} = 2385 \text{ kg/m}^3$$

$$C_p(T) = 728,4 + 0,5.T - 8e-4 T^2 \text{ si } T < T_f \text{ sinon } C_{p(liq)}(T) = 1160 \text{ J/kg}$$

$$\lambda_{(T)} = 149,7 + 0,0809.T - 0,0001.T^2 \text{ si } T < T_f \text{ sinon } \lambda_{sol} = 68 \text{ W/m/K.}$$

Les autres paramètres de la simulation sont définis dans la table 1.

paramètre	I (A)	U (V)	V <sub>s</sub>	η	c <sub>f</sub> (mm)	b (mm)	a (mm)	f <sub>f</sub>
Valeur	76	12,3	15	0,79	2	1,1	4	0,6

Table 1 : Paramètres de soudage (P5) et de la double ellipsoïde retenus pour la simulation

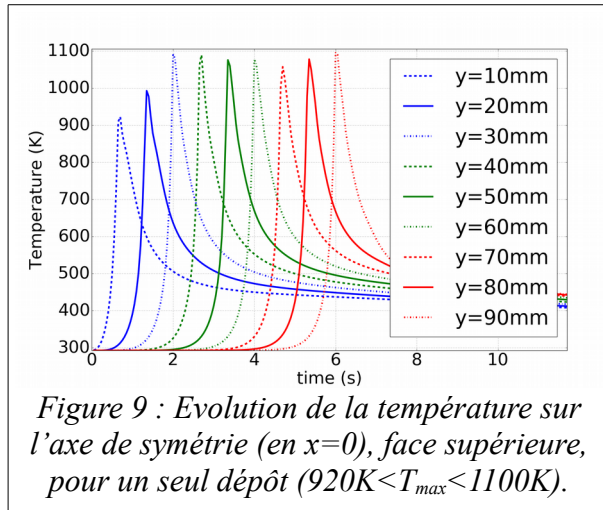


Figure 9 : Evolution de la température sur l'axe de symétrie (en  $x=0$ ), face supérieure, pour un seul dépôt ( $920K < T_{max} < 1100K$ ).

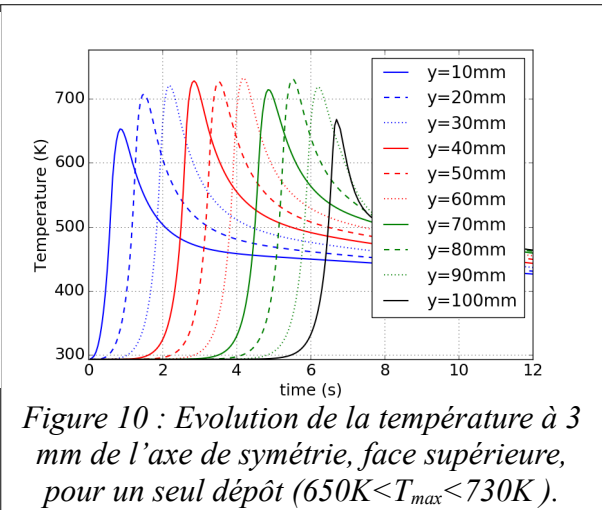


Figure 10 : Evolution de la température à 3 mm de l'axe de symétrie, face supérieure, pour un seul dépôt ( $650K < T_{max} < 730K$ ).

Dépôt	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm	60 mm	70 mm	80 mm	90 mm
n=1ier	922,5	993,1	1094,1	1089,5	1076,1	1078,2	1057,6	1078,2	1095,4
n=2ième	1044,4	1184,5	1175,4	1183,2	1166,2	1174,1	1173,4	1171,7	1178,1
n=3ième	1223,9	1296,2	1316,2	1304,4	1297,2	1335,1	1317,1	1291,1	1292,1
n=6ième	1376,1	1462,6	1464,5	1466,5	1465,1	1461,3	1459,3	1455,3	1445,7
n=9ième	1402,7	1515,1	1544,6	1536,8	1547,6	1521,1	1508,1	1470,9	1491,6
n=12ième	1403,6	1492,1	1540,8	1562,2	1521,8	1511,7	1521,7	1529,6	1510,8

Table 2 : Température maximale (en kelvin) atteinte en différents points situés sur l'axe de symétrie (face supérieure) pour chaque dépôt réalisé (empilement)

Par la suite, nous avons procédé à la simulation de 12 dépôts afin de comprendre l'effet d'élargissement du mur qui se produit lors de l'empilement des dépôts, voir figure 5. Les températures maximales relevées sur l'axe de symétrie, sur la face supérieure soumise à la source de chaleur, sont reportées dans la table 2 ci-dessous. On a reporté les valeurs pour n = 1, 2, 3 puis 6 puis 9 et enfin 12 dépôts. Pour un seul dépôt, la température maximale est d'environ 1100K dans la zone quasi-stationnaire, pour  $y > 30$ mm de la figure 9. Lors de la réalisation du 2<sup>ème</sup> dépôt, ce pic de température augmente jusqu'à une valeur moyenne de 1170K. Il augmente encore lors du 3<sup>ème</sup> dépôt pour atteindre une valeur moyenne de 1310K dans la zone quasi-stationnaire. Entre le 3<sup>ème</sup> dépôt et le 6<sup>ème</sup>, ce pic de température augmente encore de 150K pour atteindre une valeur moyenne de 1460K. Enfin, cette augmentation n'est plus que de 50 à 70K entre la 6<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> couche. Il n'y a presque plus d'augmentation du pic de température entre la 9<sup>ème</sup> et 12<sup>ème</sup> couche. Cette stabilisation du maximum de température le long du dépôt au-delà de la 9<sup>ème</sup> couche signifie que les dépôts réalisés par la suite auront les mêmes caractéristiques géométriques (hauteur et largeur) que le dépôt n°9. Expérimentalement, on a observé la stabilisation de la largeur et de la hauteur entre le 6<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> dépôt comme présenté dans la figure 5.

## 5 Conclusion

Un procédé de fabrication additive arc et fil a été développé pour la réalisation de dépôts d'aluminium. Les premiers essais ont consisté à déterminer des plages de fonctionnement (tension, intensité, vitesse de déplacement ...) qui permettent d'obtenir des dépôts réguliers. Par la suite, des empilements de dépôts ont été réalisés. On a remarqué un pompage thermique important de la plaque support lors des 6 premiers dépôts. Cela se traduit expérimentalement par une augmentation de la largeur du dépôt lorsqu'on les empile jusqu'au 6<sup>ième</sup> – 7<sup>ième</sup> dépôt. Au delà, la largeur et la hauteur du dépôt se stabilisent. Ce comportement est important car il doit être pris en compte dans le processus de fabrication additive. Une modélisation thermique du procédé a été entreprise dans le but de simuler cette opération de déposition et de mieux comprendre les phénomènes thermiques survenant lors de l'opération de déposition. On a remarqué que le champ de température atteignait une zone quasi-stationnaire après 30mm de longueur de dépôt. De même, lors de l'empilement des dépôts, l'effet de pompage thermique de la plaque support est supprimé après 9 dépôts.

Cette simulation thermique doit être validée après confrontation avec des mesures de températures réalisées avec des thermocouples de type K. Une fois validée, on pourra calculer le champ de température d'un « mur » (plusieurs dépôts successifs) afin de prédire le champ de contraintes résiduelles final (via le code de calcul ASTER qui nécessite le champ de température dépôt après dépôt comme donnée d'entrée).

### Références

1. S.W. Williams, F. Martina, A.C. Addison, J. Ding, G. Pardal, P. Colegrove. Wire + Arc Additive Manufacturing, *Materials Science and Technology*, vol. 32, pp. 641-647 (2016).
2. F. Martina. Investigation of methods to manipulate geometry, microstructure and mechanical properties in titanium large scale Wire + Arc Additive Manufacturing, *PhD thesis*, Cranfield University (2014).
3. J. Goldak, A. Chakraverti, M. Bibby. A new finite element model for welding heat sources, *Metallurgical Transactions B*, vol. 15B, pp299-305 (1984).
4. [J. Ding, P. Colegrove, J. Mehnen, S. Ganguly, P.M. Sequeira Almeida, F. Wangb, S. Williams, Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts, *Computational Materials Science*, Vol. 50, pp. 3315–3322 (2011).
5. F. Montavecchia, G. Venturini, A. Scippa, G. Campatelli, Finite element modelling of Wire-Arc-Additive-Manufacturing process, *Procedia CIRP* 55, pp.109 – 114 ( 2016 ).
6. N. T. Nguyen, A. Ohta K. Matsuoka, N. Suzuki, Y. Maeda. Analytical Solutions for Transient Temperature of Semi-Infinite Body Subjected to 3-D Moving Heat Sources, *Welding Research Supplement* (1999).
7. C. Geuzaine and J.-F. Remacle. Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 79, pp. 1309-1331 (2009).
8. Juan J. Valencia, Peter N. Quested. Thermophysical Properties, *ASM Handbook*, Vol. 15, pp. 468-481 (2008).