

# Une approche de la modélisation thermomécanique du soudage et de la fabrication additive

S. Pascal<sup>1</sup>, P. Verpeaux<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université Paris-Saclay, CEA, Service de Recherche en Matériaux et procédés Avancés, 91191, Gif-sur-Yvette, France, serge.pascal@cea.fr

<sup>2</sup> Université Paris-Saclay, CEA, Service d'Études Mécaniques et Thermiques, 91191, Gif-sur-Yvette, France, pierre.verpeaux@cea.fr

**Résumé** — L'objet de cette communication est de présenter l'approche développée dans Cast3M pour la modélisation thermomécanique du soudage et de la fabrication additive. La modélisation de ces procédés comporte deux spécificités : un apport de chaleur mobile et un apport de matière. La modélisation de l'apport de chaleur fait appel à des sources volumiques définies par des fonctions gaussiennes des coordonnées de l'espace. Nous présenterons deux des modèles introduits dans Cast3M. Le déplacement de la source de chaleur s'appuie sur la définition de sa trajectoire. La modélisation de cette cinématique est indépendante du problème thermomécanique à traiter, ce qui facilite la mise en donnée de ce dernier. L'apport de matière est modélisé en ajoutant des blocs d'éléments finis au cours du calcul. En pratique, cela revient à définir autant de maillages qu'il y a de pas d'apport de matière. A chacun de ces pas, les champs solutions sont transportés sur le nouveau maillage, pour la partie qui est commune au précédent, et initialisés à leurs valeurs par défaut pour la partie ajoutée, en veillant à assurer la conservation de l'énergie. Cette approche a été mise en œuvre dans différents cas d'étude ces dernières années. Les résultats obtenus illustreront ses capacités à modéliser ces deux procédés.

**Mots clés** — apport de matière, apport de chaleur, éléments finis, source de chaleur mobile.

## 1 Introduction

L'objet de cette communication est de présenter l'approche développée dans Cast3M [1] pour la modélisation thermomécanique du soudage et de la fabrication additive. L'emploi de codes de calcul par éléments finis pour modéliser des procédés de soudage et de fabrication additive bénéficie de décennies d'expérience accumulées en calcul de structures, qui ont conduit à disposer de méthodes numériques robustes et éprouvées, de solveurs performants, de nombreuses lois de comportement des matériaux et de données accessibles et validées par l'expérience. Toutefois, la modélisation du soudage et de la fabrication additive présente deux spécificités que l'on ne rencontre habituellement pas en calcul de structures : un apport de chaleur mobile et d'intensité variable dans le temps, et un apport de matière.

## 2 Modélisation de l'apport de chaleur

### 2.1 Modèle de source de chaleur

En soudage, bien que l'apport de chaleur soit généralement assuré par des dispositifs imposant un flux de chaleur sur la surface à souder (arc électrique, laser), celui-ci est généralement modélisé par une source volumique afin de tenir compte des effets hydrodynamiques induits dans le bain de métal en fusion. En soudage à l'arc électrique, le modèle le plus usité est sans doute celui de J. Goldak [2] mais il en existe de nombreux autres [3]. La même approche est généralement adoptée pour la modélisation de la fabrication additive [4], en particulier pour la fabrication additive fil, dérivée des procédés de soudage. Dans Cast3M, cela a conduit à introduire les deux modèles de source de chaleur suivants.

#### 2.1.1 Source gaussienne elliptique

Ce modèle peut être vu comme une version simplifiée du modèle de J. Goldak [2]. Il décrit une distribution gaussienne de source de chaleur centrée en un point  $x_0$  et présentant un axe d'isotropie

transverse défini par un vecteur unitaire  $\underline{n}_s$  (voir Figure 1, illustration de gauche). La source de chaleur est définie par l'équation suivante :

$$s(\underline{x}) = s_0 e^{-2((\tilde{r}/r_g)^2 + (\tilde{z}/z_g)^2)}.$$

Dans cette équation,  $(\tilde{r}, \tilde{z})$  sont les coordonnées des points de l'espace dans le repère cylindrique d'origine  $\underline{x}_s$  et d'axe  $\underline{n}_s$ , et  $r_g$  et  $z_g$ , des paramètres du modèle gouvernant, respectivement, la décroissance radiale et axiale de la distribution. Enfin,  $s_0$  est un paramètre de normalisation tel que :

$$\iiint_{\tilde{z} < 0} s(\underline{x}) dV = Q_s,$$

$Q_s$  étant également un paramètre du modèle.  $Q_s$  est la puissance thermique injectée dans le demi-espace situé sous le plan tangent à la surface de soudage, défini par le point  $\underline{x}_s$  et la normale  $\underline{n}_s$ . L'expression de  $s_0$  dépend du mode de calcul. Elle est donnée dans le tableau 1 pour les modes plan, axisymétrique et tridimensionnel.

TABLE 1 – Expressions du paramètre de normalisation  $s_0$  en fonction du mode de calcul.

mode de calcul	2D plan	2D axisymétrique	tridimensionnel
expression de $s_0$	$\frac{4}{\pi} \frac{Q_s}{r_g z_g}$	$\sqrt{\frac{2}{\pi^3}} \frac{Q_s}{z_g (\kappa_1 + \kappa_2 + \kappa_3)}$	$\sqrt{\frac{2^5}{\pi^3}} \frac{Q_s}{r_g^2 z_g}$
avec, pour le mode axisymétrique :			
$\kappa_1 = \frac{r_g^2}{4} e^{-2(r_s/r_g)^2}, \quad \kappa_2 = \sqrt{\frac{\pi}{8}} r_g r_s, \quad \kappa_3 = \sqrt{\frac{\pi}{8}} r_g r_s \operatorname{erf}(\sqrt{2} r_s / r_g),$			
$r_s$ étant la 1 <sup>re</sup> coordonnée du centre de la source dans le mode axisymétrique.			

### 2.1.2 Source gaussienne « élargie »

Ce modèle a pour objet de décrire de façon simplifiée l'apport de chaleur lors d'une opération de soudage « en balayage ». Cette technique consiste à imposer à la torche de soudage un léger mouvement alterné dans la direction perpendiculaire à la trajectoire de soudage et permet de réaliser des cordons d'épaisseur plus large. Elle est également utilisée en fabrication additive.

Afin de ne pas avoir à décrire le mouvement alterné de la source de chaleur le long de la trajectoire, nous avons développé un modèle de source de chaleur similaire au précédent mais dont la fonction de distribution est constante dans la direction de balayage sur une distance égale à la distance balayée. Ce modèle n'est disponible que dans le mode tridimensionnel. Dans ce mode, la distribution de la densité de puissance thermique est définie par l'équation suivante :

$$s(\underline{x}) = \frac{Q_s}{(\sqrt{\pi^3/2^5}) r_g^2 z_g + (\pi/2) r_g z_g l_g} e^{-2((u/r_g)^2 + (\max(0, |v| - l_g)/l_g)^2 + (w/z_g)^2)}.$$

Dans cette équation,  $(u, v, w)$  sont les coordonnées des points de l'espace dans un repère local défini par le point origine  $\underline{x}_s$  et deux vecteurs unitaires orthogonaux entre eux  $\underline{t}_s$  et  $\underline{n}_s$ . Comme dans le modèle précédent, le vecteur  $\underline{n}_s$  est normal au plan tangent à la surface de soudage. Le vecteur  $\underline{t}_s$  définit la direction de balayage. Le produit vectoriel de ces deux vecteurs définit le troisième axe  $\underline{l}_s$  du repère local, tangent à la trajectoire de soudage.  $\underline{x}_s$ ,  $\underline{t}_s$  et  $\underline{n}_s$  sont des paramètres du modèle.

La figure 1 illustre les deux modèles de sources gaussiennes présentés. La trajectoire de soudage est représentée par une ligne rouge. La variation de la distribution de puissance thermique dans le plan

de soudage est illustrée par une déformation de ce plan dans la 3<sup>e</sup> direction de l'espace proportionnelle à la densité de puissance thermique en chaque point. Enfin, la tableau 2.1.2 recense l'ensemble des paramètres des deux modèles.

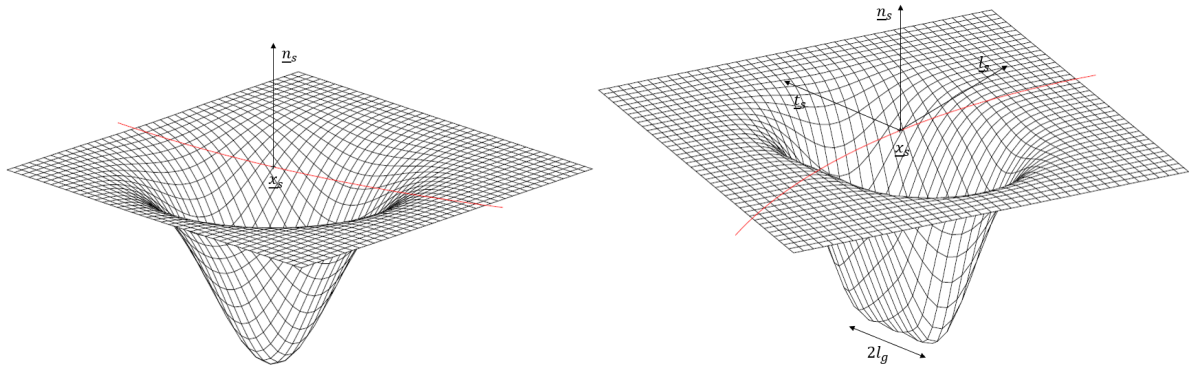


FIGURE 1 – Illustration de la distribution de puissance thermique associée aux modèles de source thermique disponibles dans Cast3M : à gauche, source gaussienne elliptique et, à droite, source gaussienne élargie.

TABLE 2 – Paramètres associés aux modèles de source thermique gaussienne elliptique et élargie.

source gaussienne elliptique et élargie					spécifique source gaussienne élargie	
$x_s$	$n_s$	$r_g$	$z_g$	$Q_s$	$l_s$	$l_g$

## 2.2 Evolution spatiotemporelle de la source

La modélisation du déplacement de la source de chaleur ne semble pas avoir fait l'objet de travaux académiques particuliers et repose, souvent, sur des fonctionnalités propres au logiciel utilisé, lorsqu'il ne s'agit pas de programmer soi-même l'évolution spatiotemporelle de la source dans un programme externe. Dans ce cas, la modélisation est souvent limitée à des trajectoires relativement simples.

Dans Cast3M, nous avons fait le choix de modéliser le déplacement de la source de chaleur en définissant sa trajectoire, représentée par le maillage d'une ligne orientée  $L_s$ . La donnée de l'évolution temporelle du déplacement de la source le long de cette ligne  $X_s(t)$  permet alors de la positionner à tout instant. Pour cela, on construit le champ aux nœuds  $X_{L_s}$  des abscisses curvilignes de la trajectoire en parcourant la ligne depuis son origine et en sommant en chaque nœud la longueur des segments parcourus. À un instant  $t_0$ , la position sur la trajectoire est déterminée en recherchant le segment dont les valeurs dans  $X_{L_s}$  encadrent  $X_s(t_0)$ , puis en interpolant linéairement cette valeur le long du segment.

En complément, la donnée de l'évolution temporelle de la puissance thermique de la source de chaleur  $Q_s(t)$  complète sa modélisation en représentant les démarrages et arrêts successifs du dispositif d'apport de chaleur pour simuler, par exemple, les temps de refroidissement interpasses en soudage ou fabrication additive fil. Cette modélisation de l'apport de chaleur est indépendante de la discrétisation temporelle utilisée pour la résolution du problème thermique. La définition de la cinématique de la source de chaleur ( $L_s$  et  $X_s(t)$ ), ainsi que la variation de son intensité au cours du temps ( $Q_s(t)$ ), est facilitée par l'utilisation de la procédure SOUDAGE de Cast3M [1].

### 3 Modélisation de l'apport de matière

Une survol de la littérature permet de distinguer principalement deux méthodes pour modéliser l'apport de matière dans les calculs par éléments finis [5] :

- La méthode « des éléments discrets » (« quiet element »), qui consiste à utiliser le maillage final de la pièce soudée ou fabriquée mais en attribuant des propriétés « faibles » aux éléments de la partie du maillage qui n'a pas encore été déposée. Ces éléments sont activés au fur et à mesure du calcul en leur attribuant leurs propriétés réelles.
- La méthode « des éléments inactifs » (« inactive element » ou « element birth and death »), qui consiste à modifier le maillage en lui ajoutant des éléments au cours du calcul. C'est la méthode aujourd'hui privilégiée dans Cast3M.

#### 3.1 Évolution de la géométrie

L'idée est de donc simuler l'apport de matière en ajoutant des blocs d'éléments finis au cours du calcul. Dans le cas du dépôt d'un cordon par soudage arc-fil ou par lasage d'un lit de poudre, chaque bloc d'éléments finis est formé d'un tronçon du maillage du cordon et l'ajout d'un bloc représente un « pas d'apport de matière ».

En pratique, on n'ajoute pas d'élément à un maillage existant mais on définit autant de maillages qu'il y a de pas d'apport de matière au cours du calcul (en plus du maillage initial). On associe à chaque maillage l'instant où celui-ci « apparaît » et ce maillage est utilisé jusqu'à atteindre l'instant du pas d'apport de matière suivant.

On construit ainsi deux listes : une liste de maillages LGEO1, constituée du maillage initial {GEO0} et des maillages représentant les pas d'apport de matière successifs {GEO1, ..., GEO<sub>n</sub>}, et une liste de réels LTPS1, constituée de l'instant initial du calcul  $\{t_0\}$  et des instants associés à chaque pas d'apport de matière  $\{t_1, \dots, t_n\}$ . À un instant  $t$  du calcul, on utilise le maillage GEO<sub>i</sub> tel que :  $t_i \leq t < t_{i+1}$ . Si des instants de calcul sont définis en dehors de l'intervalle  $[t_0; t_n]$  de définition des maillages, on extrapole cette règle d'interpolation des maillages dans le temps en prenant ses valeurs aux bornes.

#### 3.2 Évolution de la modélisation

Dans Cast3M, la modélisation d'un problème physique s'appuie sur la définition d'un ou plusieurs « modèles ». Un modèle définit un phénomène physique à considérer sur un maillage donné. Sur un même maillage, on définit autant de modèles qu'il y a de phénomènes physiques à représenter : par exemple, un modèle de « conduction thermique » et un modèle de « source de chaleur ». Deux modèles peuvent aussi porter sur des maillages différents, massif pour la conduction thermique et surfacique pour la convection ou le rayonnement. Enfin, l'ensemble des modèles ainsi définis peut être regroupé en un seul modèle global.

On associe à chaque modèle un champ de « caractéristiques ». Pour un modèle de conduction thermique, ce sont les propriétés matérielles du milieu considéré : conductivité thermique, etc. Pour un modèle de source de chaleur, ce sont les valeurs des paramètres du modèle : par exemple,  $Q_s$  ou  $r_g$  pour les modèles de source présentés ci-dessus. Comme pour les modèles, l'ensemble des champs de caractéristiques peut être regroupé en un seul champ global. L'ensemble des modèles et champs de caractéristiques définit une modélisation.

Afin de faire évoluer une modélisation avec la géométrie, on définit ses modèles et caractéristiques pour chaque élément de la liste de maillages LGEO1. Ceux-ci sont rangés dans des listes de modèles et de champs qui, associées à la liste des instants LTPS1, permet de les instancier à n'importe quel moment du calcul en suivant la règle d'interpolation dans le temps définie pour les maillages. Afin de faciliter la manipulation des données, ces listes de modèles et de champs sont appareillées avec la liste des instants dans des objets « chargement », utilisés ensuite en entrée du solveur non linéaire PASAPAS.

### 3.3 Transport des solutions

#### 3.3.1 Analyse thermique

On se place à un instant  $t_1$  correspondant à la fin d'un pas de calcul de thermique, pour lequel on a un champ de température solution  $T^d(t_1)$  définie sur le maillage  $\Omega^d$ . On veut résoudre le pas de calcul suivant pour déterminer la solution en température à un instant  $t_2$ . Entre les instants  $t_1$  et  $t_2$ , on fait un pas d'apport de matière, passant du maillage  $\Omega^d$  au maillage  $\Omega^{d+1}$ . Pour déterminer cette solution, il faut définir sur le maillage  $\Omega^{d+1}$  un champ de température en début de pas  $T^{d+1}(t_1)$ , ce qui revient en quelque sorte à « transporter » la solution  $T^d(t_1)$  sur le maillage  $\Omega^{d+1}$ . Pour cela, on s'appuie sur le principe de conservation de l'énergie.

On note  $\Omega^{add}$  le bloc d'éléments finis ajouté entre les maillages  $\Omega^d$  et  $\Omega^{d+1}$ . La matière est déposée à la température  $T^{add}$ . La quantité de chaleur aux nœuds d'un maillage est égale au produit de la matrice de capacité thermique avec le champ de température. On veut que la somme des quantités de chaleur aux nœuds des maillages  $\Omega^d$  et  $\Omega^{add}$  soit égale à la quantité de chaleur aux nœuds du maillage  $\Omega^{d+1}$ , ce qui s'écrit :

$$C^{d+1}.T^{d+1}(t_1) = C^d.T^d(t_1) + C^{add}.T^{add},$$

avec  $C^i$  la matrice de capacité thermique relative au maillage  $\Omega^i$ .

Or la matrice de capacité thermique du maillage  $\Omega^{d+1}$  s'obtient par assemblage des matrices de capacité thermique des maillage  $\Omega^d$  et  $\Omega^{add}$  :

$$C^{d+1} = C^d + C^{add}.$$

Le champ de température  $T^{d+1}(t_1)$  est ainsi solution du système linéaire suivant :

$$(C^d + C^{add}).T^{d+1}(t_1) = C^d.T^d(t_1) + C^{add}.T^{add}.$$

On peut utiliser les matrices de capacité thermique « lumpées », ce qui n'affecte pas le bilan global en énergie et présente l'avantage de ne modifier les champs de température  $T^d$  et  $T^{add}$  qu'aux nœuds de l'interface  $\Omega^d \cap \Omega^{add}$ . C'est la méthode actuellement utilisée dans Cast3M.

#### 3.3.2 Analyse mécanique

Comme précédemment, on se place à un instant  $t_1$  correspondant à la fin d'un pas de calcul de quasi-statique, pour lequel on dispose de champs de déplacement et de contrainte solutions  $\underline{U}^d(t_1)$  et  $\underline{\sigma}^d(t_1)$  définis sur le maillage  $\Omega^d$ . On veut résoudre le pas de calcul suivant pour déterminer la solution mécanique à un instant  $t_2$ , le maillage évoluant sur ce pas de  $\Omega^d$  à  $\Omega^{d+1}$ . Pour déterminer l'équilibre mécanique sur ce pas, il faut transporter les champs de déplacement et de contrainte  $\underline{U}^d(t_1)$  et  $\underline{\sigma}^d(t_1)$  sur le maillage  $\Omega^{d+1}$ .

On fait l'hypothèse que le volume de matière déposé à un état de contrainte nul initialement, soit  $\underline{\sigma}^{add}(t_1) = 0$ . Cela revient à faire l'hypothèse que ce volume de matière n'apporte pas d'énergie mécanique au système, ni qu'il ne perturbe l'équilibre statique établi sur le maillage  $\Omega^d$ .

Sur le maillage  $\Omega^{d+1}$ , le champ de déplacement est initialisé à sa valeur dans  $\Omega^d$  pour les nœuds communs aux deux maillages et à la valeur nulle pour les nœuds restants :

$$\underline{U}_{|\Omega^d}^{d+1}(t_1) = \underline{U}^d(t_1), \quad \underline{U}_{|\Omega^{add} \setminus \Omega^d}^{d+1}(t_1) = \underline{0}.$$

Le fait d'imposer un déplacement aux nœuds de  $\Omega^{add}$  situés à l'interface avec  $\Omega^d$  induit une déformation  $\underline{\epsilon}^{add}(t_1)$  non nulle dans volume de matière déposé :

$$\underline{\epsilon}^{add}(t_1) = \underline{\nabla}^s \otimes \underline{U}_{|\Omega^{add}}^{d+1}(t_1),$$

où  $\underline{\nabla}^s \otimes$  est l'opérateur « gradient symétrisé ». De même, le champ de température  $T^{d+1}(t_1)$  déterminé précédemment induit une déformation thermique non homogène  $\epsilon^{th,add}(t_1)$  dans  $\Omega^{add}$  :

$$\epsilon^{th,add}(t_1) = \alpha \left( T_{|\Omega^{add}}^{d+1}(t_1) - T_{ref}^{add} \right),$$

où  $T_{ref}^{add}$  est la température de référence dans  $\Omega^{add}$ .

Ces déformations, inhomogènes, induisent un état de contrainte non nul dans  $\Omega^{add}$  par la loi de l'élasticité linéaire. Afin de satisfaire l'hypothèse d'un état de contrainte nul au sein de ce volume, on impose la déformation libre  $\epsilon^L$  suivante :

$$\epsilon^L = \epsilon^{th,add}(t_1) - \epsilon^{add}(t_1).$$

Dans ce cas, on vérifie bien que :

$$\sigma^{add}(t_1) = \mathbf{L}^e \left( \epsilon^{add}(t_1) - \epsilon^{th,add}(t_1) - \epsilon^L \right) = \mathbf{0},$$

où  $\mathbf{L}^e$  est le tenseur de Hooke de la matière déposé.

La déformation libre  $\epsilon^L$  est appliquée dans  $\Omega^{add}$  pour le pas de calcul allant de  $t_1$  à  $t_2$ , ainsi que pour tous les pas suivants. A chaque pas d'apport de matière, une déformation libre est ainsi appliquée à chaque bloc d'éléments finis ajouté. Ceci est indispensable pour garantir la relation de comportement.

Si cette méthode permet de garantir la relation de comportement, elle introduit une erreur dans le volume de matière déposé, puisqu'il n'y a aucune raison que la déformation libre imposée  $\epsilon^L$  soit isochore. Une alternative serait de corriger l'état de contrainte résiduel introduit dans  $\Omega^{add}$  en calculant un champ de déplacement satisfaisant les déplacements à l'interface avec le maillage  $\Omega^d$  et en imposant en outre une condition d'incompressibilité aux bords du maillage  $\Omega^{add}$ . Si cette alternative paraît plus rigoureuse, on sait d'expérience qu'elle peut poser des problèmes de convergence, la condition d'incompressibilité étant généralement difficile à satisfaire. Elle mériterait toutefois d'être étudiée.

## 4 Mise en œuvre et validation

Cette approche a été mise en œuvre dans le cadre de différents travaux menés au Laboratoire des Technologies d'Assemblage (LTA) du CEA ces dernières années [6, 7, 8, 9, 10]. Bien que les modélisations thermiques aient toutes nécessité un recalage à quelques mesures de température, la comparaison des résultats obtenus par le calcul à l'ensemble des mesures de température réalisées en cours de fabrication et de distorsion des pièces après fabrication s'est avérée à chaque fois satisfaisante.

Un exemple de comparaison calcul-expérience est fourni à la figure 2. Il est issu des travaux de thèse de D. Artières [9]. Cette figure présente la comparaison de mesures de profilométrie laser d'une pièce fabriquée en WAAM (mur monocordon fixé à son support) aux résultats de la simulation du procédé, après refroidissement et débridage. On constate sur cette figure un très bon accord calcul-expérience. En plus de ces résultats de thèse, nous illustrerons la mise en œuvre de cette approche par des résultats d'études ayant déjà fait l'objet de présentations au CSMA, ainsi que par d'autres, plus récents, sur lesquels on a moins communiqué.

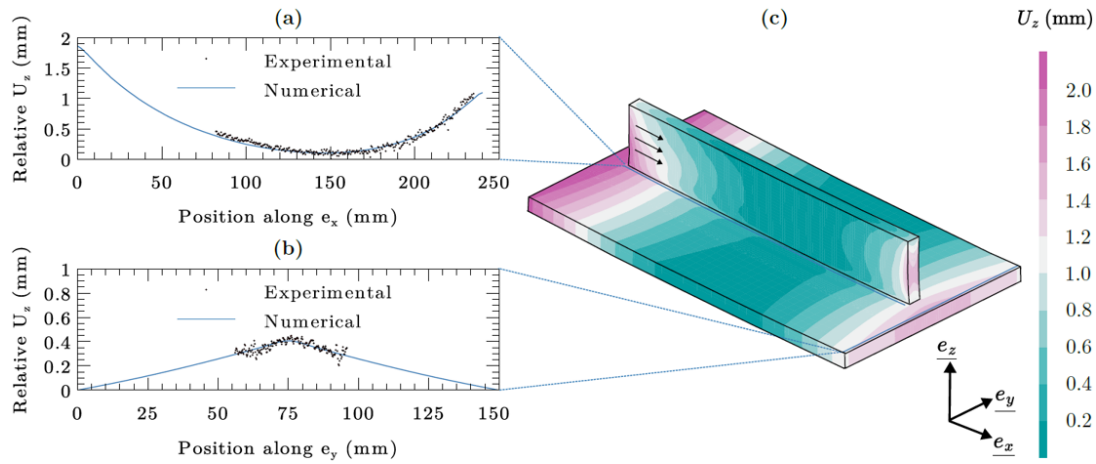


FIGURE 2 – Comparaison calcul-expérience des déplacements selon  $e_z$  dans le cas de la fabrication d'un mur en WAAM après refroidissement et débridage. (a) Comparaison suivant une arête située au pied du mur orientée dans la direction  $e_x$ . (b) Comparaison suivant l'arête supérieure du bord extérieur droit orientée dans la direction  $e_y$ . (c) Isovaleurs du champ de déplacement dans la direction  $e_z$ .

## 5 Références bibliographiques

### Références

- [1] CEA, SEMT. Cast3M : <https://www-cast3m.cea.fr>
- [2] J. Goldak, A. Chakravarti, M. Bibby. *A new finite element model for welding heat sources*, Metallurgical Transactions B, vol. 15, 299–305, 1984.
- [3] E.J.G. Nascimento, E. dos Santos Magalhães, L.E. dos Santos Paes. *A literature review in heat source thermal modeling applied to welding and similar processes*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 126, n° 7, 2917–2957, 2023.
- [4] R.F.V. Sampaio, J.P.M. Pragana, I.M.F. Bragança, C.M.A. Silva, C.V. Nielsen, P.A.F. Martins. *Modelling of wire-arc additive manufacturing – A review*, Advances in Industrial and Manufacturing Engineering, vol. 6, 100-121, 2023.
- [5] L.E. Lindgren, H. Runnemalm, M.O. Näsström. *Simulation of multipass welding of a thick plate*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 44, n° 9, 1301–1316, 1999.
- [6] S. Pascal, S. Gounand. *Modélisation thermomécanique d'un cas d'étude de fabrication additive arc-fil*, 15<sup>ème</sup> Colloque National en Calcul des Structures (CSMA 2022), Université Polytechnique Hauts-de-France [UPHF], mai 2022, Hyères, France.
- [7] D. Artieres, D. Goncalves, S. Pascal, S. Depinoy, V.A. Esin. *Microstructure-properties relationship in AISI 316L stainless steel produced by Wire Additive Manufacturing (WAM) : experimental study and simulation*, AMETIS International Summer School, Université Polytechnique Hauts-de-France [UPHF], juin 2022, Taglio, France.
- [8] S. Pascal, M. Garnier, M. Garric, J. Le Mercier. *Modélisation thermomécanique de la fabrication additive arc-fil d'un tube droit avec Cast3M*, 16<sup>ème</sup> Colloque National en Calcul des Structures (CSMA 2024), CNRS, CSMA, ENS Paris-Saclay, CentraleSupélec, mai 2024, Hyères, France.
- [9] D. Artieres. *Microstructure et propriétés de l'acier 316L élaboré par fabrication additive par dépôt de fil (WAAM & WLAM) : caractérisation expérimentale et modélisation*, thèse de doctorat, Université Paris sciences et lettres, 2025.
- [10] S. Pascal, R. Boullon, T. Couvant, D. Gonçaves. *Effect of the welding path on the residual stress state in multi-pass welding*, 28<sup>th</sup> International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 28), août 2025, Toronto, Canada.