Modélisation thermomécanique du soudage : apport de matière et adaptation de maillage

Makhlouf Hamide, Michel Bellet

▶ **To cite this version:**

Makhlouf Hamide, Michel Bellet. Modélisation thermomécanique du soudage : apport de matière et adaptation de maillage. 8e Colloque national en calcul des structures, Association Calcul des structures et Modélisation (CSMA), May 2007, Giens, France. hal-01574270

HAL Id: hal-01574270
https://hal.science/hal-01574270

Submitted on 12 Aug 2017

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.

Public Domain

Modélisation thermomécanique du soudage : apport de matière et adaptation de maillage

M. Hamide[a], **M. Bellet**[a]

[a] *Ecole des Mines de Paris, Centre de Mise en Forme des Matériaux (CEMEF), UMR CNRS 7635, Sophia Antipolis, France, www.cemef.ensmp.fr*

RÉSUMÉ. *Dans ce papier, une stratégie d'adaptation de maillage et une approche de modélisation de l'apport de matière sont présentées. Nous avons développé ici une stratégie de remaillage adaptatif anisotrope basée sur l'estimateur d'erreur d'interpolation. Nous présentons aussi une approche qui permet de modéliser l'apport de métal comme un terme de source dans l'équation de conservation. Les résultats numériques obtenus montrent que l'adaptation de maillage permet à la fois le temps de calcul (à precision identique), et de suivre l'évolution de la surface du cordon au cours de l'apport et du refroidissement.*

ABSTRACT. *In this paper, an adaptive remeshing strategy and a new technique for modelling of addition of filler material are presented. The anisotropic adaptation procedure is controlled by a directional error estimator based on local interpolation error. The material deposit is modelled as a source term in the conservation equation. We show that the use of an anisotropic adaptive finite element method can result in an order of magnitude reduction in computing time. It also allows modelling joint formation.*

MOTS-CLÉS : *Simulation de soudage, éléments finis, transfert de chaleur, transformation de phase, adaptation de maillage, estimation d'erreur*

KEYWORDS: *Welding simulation, finite elements, heat transfer, phase transformation, mesh adaptation, error estimation*

1. Introduction

La qualité de la simulation numérique des problèmes mécaniques dépend fortement de la précision des calculs par la méthode des éléments finis. Ces calculs sont d'autant plus précis que la taille des éléments du maillage est petite. Raffiner uniformément le maillage est loin d'être la solution optimale pour des raisons de coût de calcul : il est préférable de raffiner (resp. déraffiner) les mailles dans les zones à fort (resp. faible). Bien entendu, en soudage, ces considération sont cruciales de par les forts gradients mis en jeu dans des zones qui évoluent au cours de la simulation.

Dans ce travail nous présentons une procédure de remaillage adaptatif basée sur l'estimateur d'erreur d'interpolation ((Fortin, 2000) et (Alauzet *et al.,* 2004)). L'approche est fondée sur la construction d'une carte discrète de métriques anisotropes servant à gouverner l'adaptation de maillage dans le souci d'équirépartir l'erreur d'interpolation. La section 2 situe les différents modèles de métallurgie, thermique et mécanique. La section 3 présente la stratégie d'adaptation de maillage. En complément du maillage adaptatif, nous proposons ici une méthode originale de simulation du dépôt de matière, exposé à la section 4. Dans la section 5, nous présentons quelques résultats dans le cadre de la simulation du soudage MIG/MAG.

2. Modélisation du soudage

Les procédés de soudage conduisent à des modifications de microstructure et à des contraintes et distorsions résiduelles qui jouent un rôle important sur la tenue mécanique des assemblages. Ces contraintes et distorsions proviennent principalement des gradients de température et des éventuelles transformations de phase susceptibles de se produire au cours du procédé. La modélisation de ce type de problème nécessite la résolution simultanée de l'équation de la chaleur avec les équations décrivant la cinétique de chacune des phases (Rappaz *et al.,* 2003)(Hamide *et al.,* 2006a). L'analyse mécanique repose sur la résolution des équations d'équilibre dynamique en presence de liquide et de solide (pour plus de détails voir (Bellet *et al.,* 2005)). Compte tenu des hypothèses introduites, elle est découplée, au niveau de chaque incrément de temps, de l'analyse thermique et métallurgique. Elle est ainsi réalisée dans un second temps et considère comme données d'entrée les distributions de température et de proportion des différentes phases obtenues par la simulation thermométallurgique. On trouvera plus de détails sur le modèle couplé thermique-métallurgie-mécanique dans (Aliaga, 2000)(Hamide *et al.,* 2006a).

3. Adaptation de maillage anisotrope

Par hypothèse, la principale erreur de calcul est l'erreur d'interpolation (Fortin, 2000). Pour une discrétisation en Eléments Finis $P1$ Lagrange de la variable u, l'erreur d'interpolation est majorée par le produit la matrice hessienne H_u (dérivées secondes de u) et la longueur des arêtes du maillage (D'Azevedo *et al.,* 1991)(Alauzet *et al.,*

2004). La matrice hessienne peut être décomposée sous la forme : $|H_u| = R|\Lambda|R^T$ avec R est la matrice des vecteurs propres et Λ matrice des valeurs propres.

Soit ϵ le seuil d'erreur maximum autorisé sur chaque élément du maillage. On veut caractériser les éléments du maillage tel que : $ch_k^2\bar{\lambda_k} = \epsilon$. Pour un élément K du maillage, les arêtes de K doivent vérifier l'égalité : $\epsilon = c\left(\vec{e}\cdot\bar{M}\vec{e}\right)$. Ainsi, on définit le tenseur métrique M comme $M = c/\epsilon R|\Lambda|R^T$. Finalement, on construit localement un produit scalaire (donné par la nouvelle métrique), utilisé par le remailleur pour construire un maillage unité sur lequel l'erreur d'interpolation est équi-distribuée sur toutes les arêtes du maillage et majorée par ϵ.

Pour capturer différents phénomènes physiques on est amené à utiliser différentes variables. Dans ce cas, plusieurs métriques sont spécifiées en un même point du maillage, et on obtient la métrique finale en faisant la réduction simultanée des métriques spécifiées. Plus de détails sont donnés dans (Alauzet *et al.,* 2004)(Hamide *et al.,* 2006a).

Pour évaluer la matrice hessienne on utilise une approche basée sur une double projection L_2 locale. Cette procédure n'est rien d'autre que la reconstruction par moyenne pondérée par le volume. Cette approche est en fait équivalente à la méthode où l'on effectue une double projection L_2 (globale) sur l'espace des fonctions éléments finis $P1$ Lagrange avec traitement de la matrice de masse par "mass lumping".

4. Modélisation de l'apport de matière

On distingue deux approches classiques pour traiter ce sujet : l'approche "Quiet element" et l'approche "Inactive element" ou "Element birth"(Lindgren *et al.,* 1999). L'apport de metal est alors modélisé par activation progressive des éléments d'un cordon préablement maillé. Les deux approches supposent la connaissance de la géométrie du cordon avant d'effectuer le calcul et nécessitent une phase de mises en données qui peut s'avérer très pénible, notamment en soudage multipasse. Nous présentons ici une autre approche qui permet de modéliser l'apport de métal de façon plus physique et moins contraignante pour l'utilisateur.

La quantité de métal déposée, suite à la fusion du fil d'apport, forme un cordon régulier (avec un choix de paramètres opératoires adéquats). En négligeant les projections hors du bain liquide et la quantité de métal évaporée dans le plasma d'arc, la quantité de métal apportée peut être facilement évaluée. L'apport peut donc être modélisé par un terme de source dans l'équation de conservation de la masse. Ce terme va être ajouté aux seuls éléments liquides situés dans un cône de proximité de l'electrode, ce qui va faire gonfler ces éléments liquides. Ainsi la contribution d'un élément liquide Ω_e à la formulation faible de l'équation de conservation de la masse s'écrit :

$$\int_{\Omega_e} p^* \left(\nabla \cdot v + \frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dt} - \dot{\overline{\theta}} \right) d\Omega \quad avec \ \dot{\overline{\theta}} = Q / \sum_e V_e$$

$\overline{\dot{\theta}}$ un taux de dilatation moyen sur les différents éléments (s^{-1}) et Q le débit de métal d'apport (m^3/s). La forme du cordon résulte alors du refroidissement de ces éléments en tenant compte du retrait à la solidification et d'une tension de surface appliquée à l'interface éléments liquides/gaz dont la contribution est :

$$\int_{\Gamma} \gamma \kappa n v^* ds$$

avec γ la tension de surface (N/m), κ la courbure moyenne et n la normale unitaire. L'adaptation de maillage permet de suivre l'évolution de la surface libre donc la formation du cordon au cours de l'apport et du refroidissement.

5. Modélisation du soudage MIG/MAG

Les paramètres opératoires de soudage sont les suivants : tension 34V ; courant 330A ; vitesse de soudage 0.008m/s ; diamètre de fil d'apport 1.2mm et vitesse de dévidage 0.125m/s. Les paramètres thermophysiques utilisés sont identiques à ceux utilisés dans (Hamide *et al.,* 2006b). La plaque $165 \times 248 \times 20mm^3$ utilisée présente un chanfrein de $1.5mm$ de profondeur.

La figure 1 présente la forme du cordon de soudure prédite par le modèle à différents instants de la simulation. On notera que la forme du cordon prédite par le calcul est qualitativement conforme à la réalité. La figure **??** montre la forme du bain de fusion et la distribution de température. La distribution de la contrainte longitudinale sur la Fig.3(a) est une légère traction longitudinale dans le cordon, une compression maximum à une certaine distance latérale du cordon. L'adaptation de maillage dans le cadre de ce calcul est basée sur trois champs : température, contrainte longitudinale et contrainte transversale. On constate que pour une précision comparable sur la solution, la procédure d'adaptation de maillage (Fig. 4(a)) réduit les temps de calcul par rapport à des maillages de référence fixe par un facteur d'environ trois pour des calculs thermo-mécaniques et un facteur six pour les simulations thermiques.

6. Conclusion

Dans ce travail on a présenté une stratégie adaptative anisotrope basée sur une estimation d'erreur d'interpolation appliquée à la thermo-mécanique du procédé de soudage. La méthode permet une adaptation basée sur plusieurs champs solution de nature différente. Les résultats numériques confirment la validité et l'efficacité de cette approche, en termes de précision de la solution et de réduction de la complexité (gain de temps de calcul). D'autre part, la modélisation de l'apport de métal dans l'équation de conservation permet de simuler la formation d'un cordon de soudure de manière beaucoup plus simple qu'avec les procédures usuelles en vigueur dans les bureaux d'études.

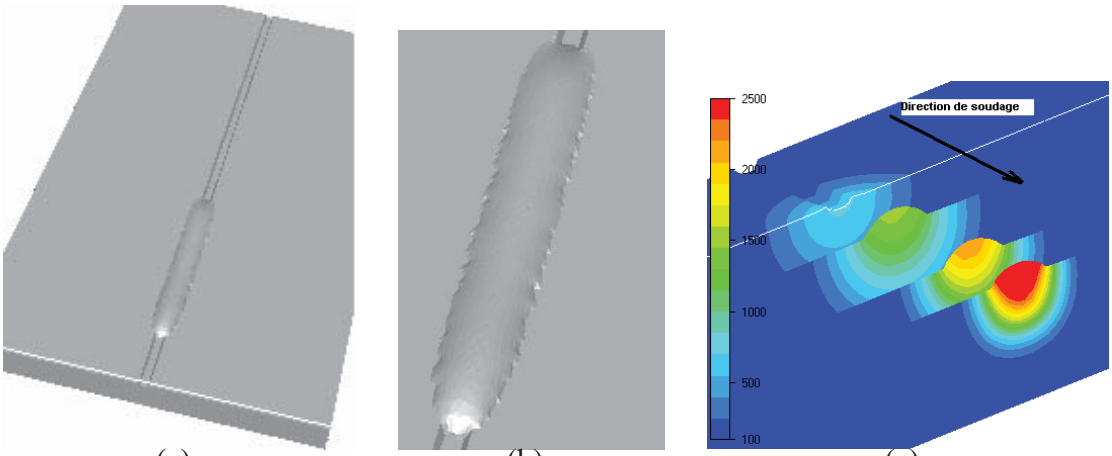

Figure 1. *Formation du cordon de soudure : a) $t = 10s$ b) Zoom sur le cordon $t = 10s$ et c) Champ de température [°C] dans plusieurs sections transversales à la direction de soudage*

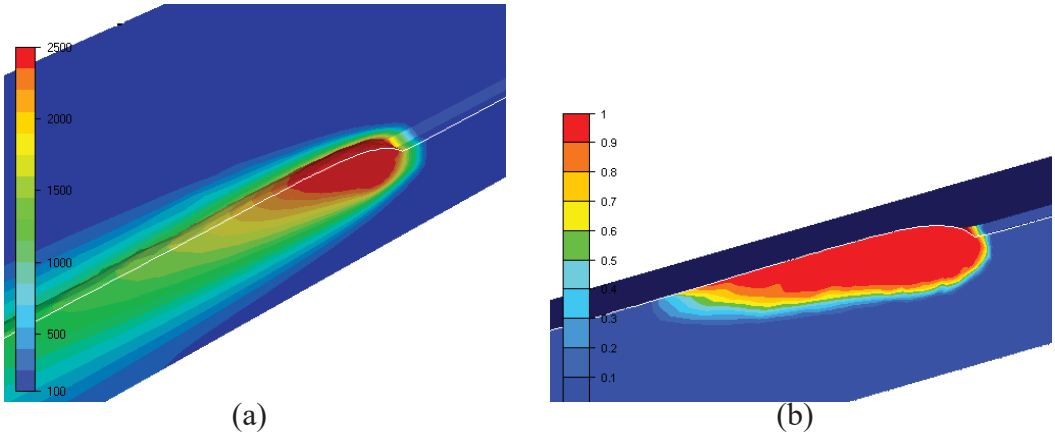

Figure 2. *a) Distribution de température, b) Fraction liquide*

7. Bibliographie

Alauzet F., Frey P., George P., « Anisotropic mesh adaptation for rayleigh-taylor instabilities », *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS)*, 2004.

Aliaga C., Simulation numérique par éléments finis en 3D du comportement thermomécanique au cours du traitement thermique d'acier : application à la trempe de pièces forgées ou coulées, Thèse de doctorat, Ecole des mines de Paris, (France), 2000.

Bellet M., Jaouen O., Poitrault I., « An ALE-FEM approch to the thermomechanics of solidification processes with application to the prediction of pipe shrinkage », *Int. J. Num. Meth. Heat Fluid Flow*, vol. 15, n° 2, p. 120-142, 2005.

D'Azevedo E., Simpson B., « On optimal triangular meshes for minimizing the gradient error », *Numerische Mathematik*, vol. 4, n° 59, p. 321-348, 1991.

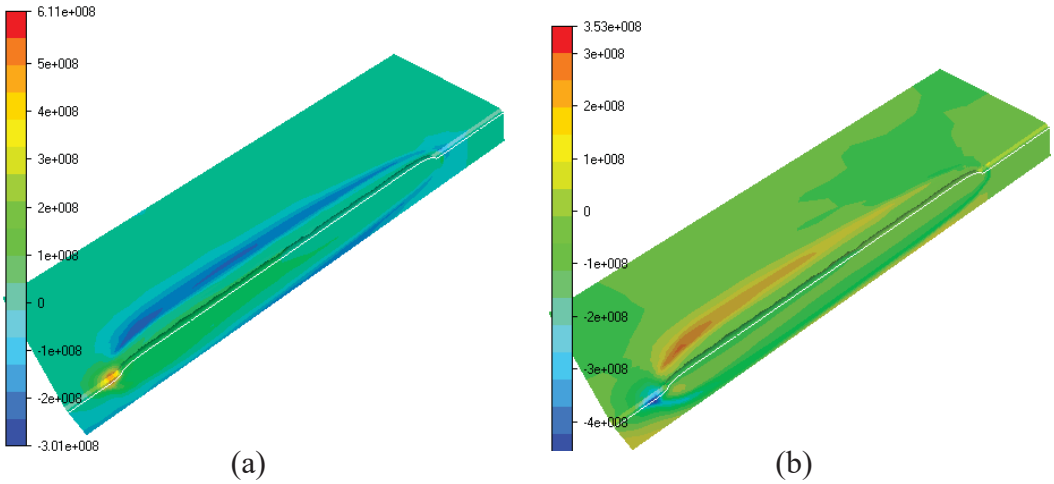

Figure 3. *a) Contraintes longitudinales [Pa], b) Contraintes transversales [Pa]*

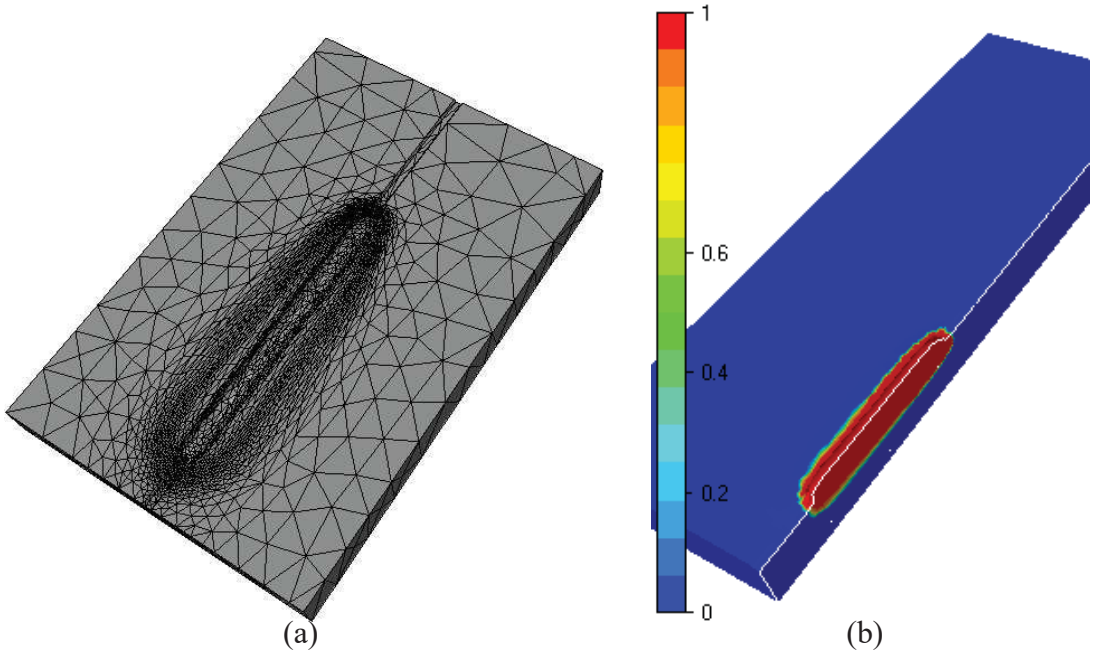

Figure 4. *a) Maillage adapté par estimation d'erreur ($\epsilon = 0.5\%$) sur T et σ_{xx} et σ_{zz}, b) Proportion d'austénite à $t = 8.5s$*

Fortin M., « Estimation d'erreur a posteriori et adaptation de maillages », *Revue européenne des éléments finis*, vol. 9, n° 4, p. 467-486, 2000.

Hamide M., Massoni E., Bellet M., « Adaptive mesh technique for thermal-metallurgical numerical simulation of arc welding processes », *submitted to Int. J. Num. Meth. Engng.*, 2006a.

Hamide M., Massoni E., Bellet M., « Modélisation et simulation numérique du soudage par fusion avec remaillage adaptatif anisotrope », *Matériaux 2006. Dijon*, 2006b.

Lindgren L. E., H. Runnemalm M. N., « Simulation of multipass welding of a thick plate », *Int. J. Num. Methods Eng.*, vol. 44, n° 9, p. 1301-1316, 1999.

Rappaz M., Bellet M., Deville M., *Numerical Modeling in Materials Science and Engineering*, springer-verlag edn, Springer Series in Computational Mathematics, 2003.