



HAL
open science

Numerical model based on SPH method to simulate Friction Stir Welding

Abdelaziz Timesli, Abdelhadi Moufki, Hamid Zahrouni, Bouaaza Braikat,
Hassan Lahmam

► **To cite this version:**

Abdelaziz Timesli, Abdelhadi Moufki, Hamid Zahrouni, Bouaaza Braikat, Hassan Lahmam. Numerical model based on SPH method to simulate Friction Stir Welding. 10e colloque national en calcul des structures, May 2011, Giens, France. pp.Clé USB. hal-00592694

HAL Id: hal-00592694

<https://hal.science/hal-00592694>

Submitted on 3 May 2011

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.

Modélisation du procédé de soudage FSW à l'aide de la méthode SPH

A. Timesli¹, H. Zahrouni¹, A. Moufki¹, V. Favier²,
B. Braikat³, H. Lahmam³

¹ Université Paul Verlaine de Metz, LEM3, UMR CNRS 7239, Ile du Saulcy, 57045 Metz, France, {timesli, zahrouni, moufki}@univ-metz.fr

² Arts et Métiers ParisTech-Paris, CNRS, PIMM, 151 bd de l'Hôpital, 75013 Paris, France, veronique.favier@ensam.eu

³ LCSM, Université Hassan II Mohammedia - Casablanca, Maroc, {b.braikat,lahmam.hassane}@gmail.com

Résumé — Dans le présent travail, un modèle numérique basé sur la méthode sans maillage smoothed particle hydrodynamics (SPH) est développé pour simuler le procédé de soudage par friction et malaxage (FSW). On se limite, dans ce travail, à une étude bidimensionnelle. Ce modèle considère un fluide non newtonien proche de l'outil avec une viscosité dépendante de la température. Une comparaison avec un code industriel CFD est effectuée pour valider notre modèle.

Mots clefs — FSW, Simulation, sans maillage, SPH

1 Introduction

Le soudage par friction et malaxage (FSW) a été inventé par l'Institut de Soudure Britannique TWI depuis les années 1990 pour les alliages d'aluminium [1]. Le principal avantage de cette technique est sa capacité à souder à l'état solide les alliages de métaux qui sont généralement difficiles à souder par des procédés de soudage conventionnels. L'assemblage de deux pièces par FSW consiste en la production de chaleur due principalement à l'épaulement et le malaxage du matériau grâce au pion. L'épaulement et le pion constituent les principaux éléments de l'outil de soudage. La chaleur est générée essentiellement par le frottement entre l'outil et les plaques à souder et par la dissipation plastique [2].

Malgré les nombreuses applications industrielles du procédé FSW, son développement reste largement empirique et basé sur une grande connaissance expérimentale du procédé. Les travaux expérimentaux sont nombreux ; les simulations numériques aussi mais le traitement du malaxage reste une difficulté majeure pour les numériciens.

La modélisation numérique du procédé de soudage par Friction et malaxage FSW (friction stir welding) a été étudiée par plusieurs auteurs considérant l'aspect thermique ou thermomécanique. Différentes formulations ont été proposées dans ces contributions concernant des formulations eulériennes, lagrangiennes ou ALE [3-7]. Le choix d'une formulation spécifique dépend principalement du phénomène étudié. Le malaxage est difficile à réaliser à l'aide de la méthode des éléments finis (en lagrangien) puisque la zone proche de l'outil de soudage est le siège de grandes déformations. Quelques techniques sans maillage ont été proposées dans la littérature pour la simulation du soudage par friction et malaxage [8-9]. Nous proposons dans ce travail d'utiliser la méthode sans maillage smoothed particle hydrodynamics (SPH) [10-13] pour la simulation de ce procédé. Cette technique est basée sur un formalisme lagrangien, elle permet de prendre en compte les grandes déformations ainsi que l'effet de l'histoire du chargement. Ce modèle considère la zone de soudure comme un fluide non newtonien faiblement compressible où la viscosité dépend de la température. On se limite dans cette étude à une modélisation bidimensionnelle mais nous travaillons sur la modélisation tridimensionnelle avec une géométrie complexe de l'outil et une loi de comportement plus réaliste qui prend en compte l'effet de la vitesse de déformation ainsi que de l'écroutissage du matériau.

A notre connaissance, le seul travail qui propose la simulation du procédé FSW à l'aide de SPH est présenté dans la référence [9] ; dans ce travail, le contact est géré par une force répulsive pour empêcher la pénétration entre les particules de l'outil et celles des plaques à souder. Dans notre modèle, le contact entre l'outil et les plaques à souder est géré par une force due au terme de pression ce qui permet d'éviter les complexités supplémentaires concernant l'estimation de la force de répulsion.

Les résultats du modèle proposé sont comparés avec ceux obtenus en utilisant un code industriel Fluent basé sur une formulation eulérienne de l'écoulement de fluide et une discrétisation par volumes finis du domaine étudié [14].

2 Equations de problème

On se propose dans cette section de présenter les différentes équations nécessaires à la modélisation du soudage par friction et malaxage. Ce procédé s'apparente aux procédés de fabrication par enlèvement de matière de type usinage. En effet, ce procédé utilise l'outil de soudage pour chauffer et malaxer le matériau. La zone proche de l'outil est évidemment le siège de grandes déformations. L'apport de la chaleur est dû à la fois au frottement de l'outil de soudage sur les plaques à souder et à la déformation importante de la matière dans le cordon de soudure. Du point de vu de la modélisation, nous avons un couplage thermo-mécanique comme dans la plupart des procédés de fabrication. Nous utilisons une loi de comportement simplifiée et qui ne dépend que de la température. Une loi plus complexe sera proposée dans des travaux futurs. Dans le présent travail, nous avons choisi de mettre l'accent sur l'implantation de la technique SPH pour la modélisation du malaxage du matériau. Les conditions de contact entre l'outil et la tôle sont considérées de type collant.

Nous présentons maintenant les différentes équations nécessaires à la modélisation du procédé de soudage FSW. Comme tous les procédés de fabrication, ce procédé peut être décrit par les lois de conservations suivantes:

Conservation de masse:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \cdot v \quad (1)$$

Conservation de quantité de mouvement:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{\rho} \nabla \sigma \quad (2)$$

Conservation d'énergie:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + q_v \quad (3)$$

Source de chaleur:

$$q_v = -\beta (\tau : \nabla v) \quad (4)$$

Où v est le vecteur vitesse, ρ désigne la densité du matériau, σ est le tenseur des contraintes, c_p désigne la chaleur spécifique, T est le champ de température, k désigne la conductivité thermique du matériau et β représente la fraction de l'énergie mécanique transformée en chaleur (ici $\beta = 0.9$) [15].

Le tenseur déviatorique τ est lié au tenseur des contraintes σ par la relation suivante:

$$\sigma = -pI + \tau \quad (5)$$

Où p est la pression hydrostatique et I le tenseur identité d'ordre 2. La relation liant le tenseur déviatorique des contraintes au taux de déformation peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\tau = \mu [\nabla v + (\nabla v)^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot v) I] \quad (6)$$

où la viscosité des particules qui diminue avec l'augmentation de la température est considérée dans cette étude sous la forme suivante:

$$\mu = A \left(1 - \left(\frac{T - T_{ref}}{T_{melt} - T_{ref}} \right)^m \right) \quad (7)$$

A et m sont des paramètres du matériau. T_{ref} est la température de référence et T_{melt} est la température de fusion. La pression est obtenue en utilisant l'équation d'état suivante :

$$P = c^2 \rho \quad (8)$$

C étant la vitesse du son.

3 Principe de la méthode SPH

La méthode SPH est basée sur une approximation intégrale [11]:

$$f(r) = \int f(r') W(r - r', h) dr' \quad (9)$$

Où r est le vecteur position d'une particule, h définit la taille du domaine de lissage et W est la fonction noyau. Les formes approximatives de l'intégrale et du gradient de la fonction f par SPH s'écrivent sous la forme suivante:

$$f(r_a) = \sum_{b=1}^{N_p} \frac{m_a}{\rho_b} f_b W(\|r_a - r_b\|, h) \quad (10)$$

$$\nabla f(r_a) = \sum_{b=1}^{N_p} \frac{m_a}{\rho_b} (f_a - f_b) \nabla W(\|r_a - r_b\|, h) \quad (11)$$

Où m_b , ρ_b et N_p représentent respectivement la masse, la densité volumique de la particule b et le nombre des particules voisins. Plusieurs choix pour la fonction noyau sont possibles, en voici un exemple de fonction de type cubique spline [12]:

$$W(\|r_a - r_b\|, h) = \alpha_d \times \begin{cases} 1 - \frac{3}{2} q^2 + \frac{3}{4} q^3 & \text{si } q \leq 1 \\ \frac{1}{4} (2 - q)^3 & \text{si } 1 \leq q \leq 2 \\ 0 & \text{si } q \geq 2 \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{avec } q = \frac{\|r_a - r_b\|}{h} \quad \text{et} \quad \alpha_d = \begin{cases} 10/(7\pi h^2) & \text{en } 2D \\ 1/(\pi h^3) & \text{en } 3D \end{cases}$$

4 Formulation du problème et le schéma de temps utilisé

L'utilisation des approximations SPH des fonctions et des dérivées spatiales permet d'écrire les équations du problème sous la forme suivante:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_{b=1}^{N_p} m_b v_{ab} \nabla_a W_{ab} \quad (13)$$

$$\frac{dv_a}{dt} = - \sum_{b=1}^{N_p} m_b \left(\frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{P_a}{\rho_a^2} + \Pi_{ab} \right) \nabla_a W_{ab} + \sum_b \frac{4m_b \mu_a \mu_b}{\rho_a \rho_b (\mu_a + \mu_b)} \frac{(v_a - v_b) \cdot (r_a - r_b)}{(r_a - r_b)^2} \nabla_a W_{ab} \quad (14)$$

$$C_{p,a} \left(\frac{dT}{dt} \right)_a = \sum_b \frac{m_b}{\rho_a \rho_b (k_a + k_b)} (T_a - T_b) \frac{\nabla W(r_a - r_b, h)}{r_a - r_b} + q_v - h(T_a - T_{ref}) \quad (15)$$

$$q_v = \beta \sum_b \frac{2m_b \mu_a \mu_b}{\rho_a \rho_b (\mu_a + \mu_b)} \frac{[(v_a - v_b) \cdot (r_a - r_b)]^2 (r_a - r_b)}{(r_a - r_b)^2} \nabla_a W_{ab} \quad (16)$$

$$\mu_a = A \left(1 - \left(\frac{T_a - T_{ref}}{T_{melt} - T_{ref}} \right)^m \right) \quad (17)$$

$$p_a = c^2 \rho_a \quad (18)$$

Mouvement des particules

Les particules se déplacent en utilisant la variante XSPH (Monaghan, 1989) [13]:

$$\frac{dr_a}{dt} = v_a + \varepsilon \sum_b \frac{m_b}{\bar{\rho}_{ab}} (v_a - v_b) W_{ab} \quad (19)$$

Où $\bar{\rho}_{ab} = (\rho_a + \rho_b)/2$ et ε est un paramètre donné dépendant du problème à résoudre. Cette méthode permet le déplacement de la particule 'a' avec une vitesse moyenne par rapport aux particules voisines.

Conditions aux limites

Pour éviter la pénétration des particules représentant le matériau de la plaque à souder à travers l'outil de soudage, les particules de l'outil sont forcées de satisfaire les mêmes équations que les particules du matériau. Cependant, elles ne se déplacent pas en fonction de la variante XSPH, leurs vitesses sont imposées de la manière suivante:

$$v_i = r_{i,c} \omega + v_i, \quad r_{i,c} = (x_i - x_c, z_i - z_c, 0) \quad (20)$$

Où ω est la vitesse de rotation et v_i est la vitesse de translation de l'outil. x_c et z_c sont les coordonnées de l'axe de rotation de l'outil. Quand une particule du matériau s'approche de l'outil, la densité des particules de l'outil augmente selon l'équation de continuité (Eq. 13); ce qui entraîne l'augmentation de pression suivant l'équation d'état (Eq. 18). Par conséquent, la force appliquée sur la particule du matériau augmente à cause du terme (P/ρ^2) dans l'équation de quantité de mouvement (Eq. 14). Finalement, si la distance entre une particule de l'outil et une particule de la plaque à souder devient inférieure à $2h$, la densité, la pression et la force appliquée sur la particule augmentent et génèrent un mécanisme répulsif.

Schéma de temps utilisé

Le schéma de temps utilisé pour traiter les dérivées temporelles est un schéma explicite basé sur l'algorithme "velocity Verlet" [16] comme suite:

$$\begin{aligned} v_a^{n+1} &= v_a^n + 0.5\Delta t(F_a^n + F_a^{n+1}) ; \rho_a^{n+1} = \rho_a^n + 0.5\Delta t(D_a^n + D_a^{n+1}) \\ r_a^{n+1} &= r_a^n + \Delta t V_a^n + 0.5\Delta t^2 F_a^n ; T_a^{n+1} = T_a^{n-1} + 0.5\Delta t(E_a^n + E_a^{n+1}) \end{aligned} \quad (21)$$

avec $\frac{dv_a}{dt} = F_a$, $\frac{d\rho_a}{dt} = D_a$, $\frac{dr_a}{dt} = V_a$, $\frac{dT_a}{dt} = E_a$

5 Résultats numériques

On considère une plaque formée d'un alliage d'aluminium de longueur $L=50$ mm et de largeur $l=20$ mm. Les paramètres de la loi (eq. 17) sont définis comme suit : $A = 200$ Mpa.s⁻¹, $m=1$, $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$, $T_{melt} = 502^\circ\text{C}$.

L'outil est considéré rigide et fait en un acier avec une géométrie cylindrique ($r_p=2.5$ mm rayon). Les propriétés physiques (conductivité matérielle k , chaleur spécifique C_p , et densité volumique ρ) utilisées pour la plaque d'aluminium sont les suivantes:

| ρ (kg/m ³) | C_p (J/K.kg) | k (W/m.K) |
|-----------------------------|----------------|-------------|
| 2780 | 875 | 140 |

Tableau 1: propriétés physiques de la plaque à souder

Dans le travail proposé, on a utilisé un coefficient de transfert thermique $h_{lat}=30$ W/m².K, une température ambiante $T_0=25^\circ\text{C}$, une vitesse de soudage de 2 mm/s et une vitesse de rotation de 20 rad/s.

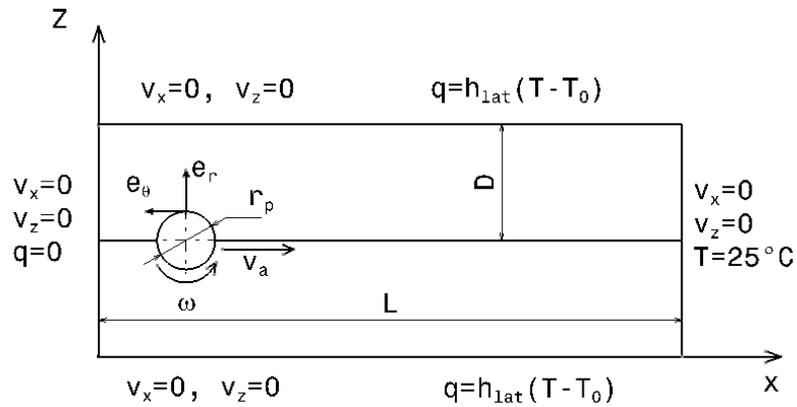


Figure 1: géométrie et conditions aux limites de la configuration FSW traitée par SPH

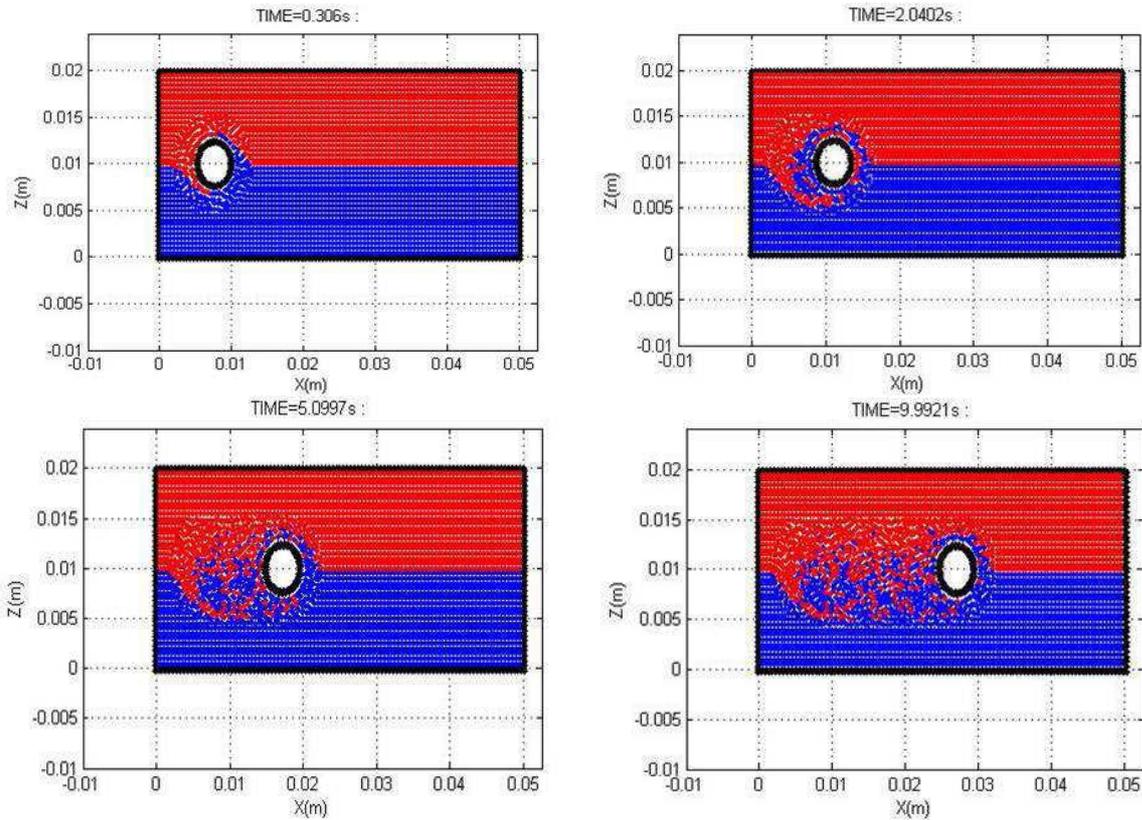
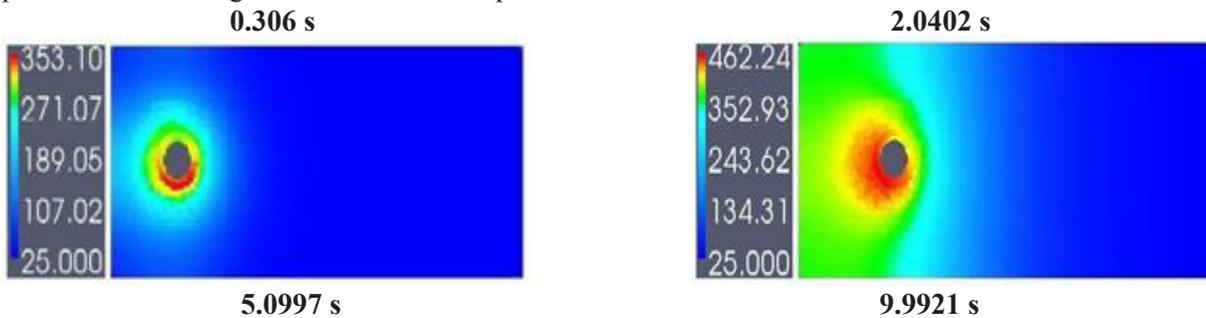


Figure 2: Malaxage des particules autour de l'outil de soudage

La figure 2 présente différentes configurations de malaxage du matériau pour différents temps de calcul; ces figures représentent les positions des particules du matériau au cours du malaxage. Ces résultats montrent l'intérêt de la méthode SPH pour simuler les procédés impliquant de grandes déformations comme dans le cas du procédé FSW. La distribution du champ de température est présentée dans la figure 3 à différents temps de calcul.



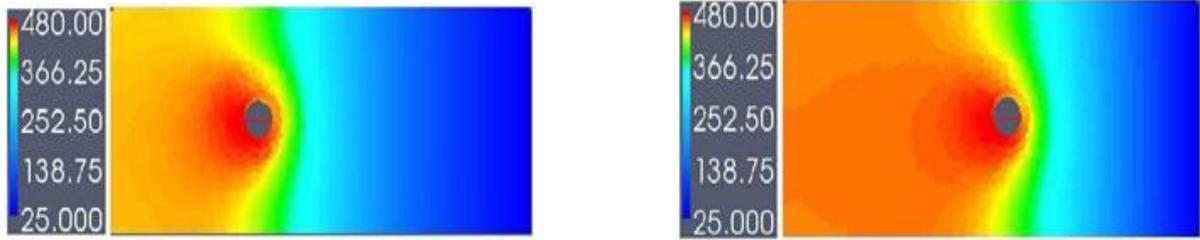


Figure 3: Distribution de température correspondant aux configurations de malaxage de la figure 2

Les résultats de notre approche sont comparés avec ceux obtenus en utilisant le logiciel Fluent. Ce code est basé sur une formulation eulérienne et une discrétisation par volumes finies. Pour valider les résultats de notre algorithme, nous choisissons deux configurations équivalentes entre les deux formulations Lagrangienne (SPH) et eulérienne (Fluent) (figures 1 et 4). Le calcul SPH est effectué jusqu'à ce que l'outil atteigne le centre de la plaque. Ce calcul demande un temps $t=t_c = 9s$. Dans la formulation eulérienne, un calcul instationnaire est effectué pour un temps $t=t_c$. Les deux simulations utilisent la même loi de comportement (Eq. 17). Les figures 7 et 8 présentent une comparaison, entre SPH et Fluent, de l'évolution de température le long de la coupe longitudinale et transversale (voir figure 6). On peut observer qu'une erreur relative de moins de 5% est obtenue ; ce résultat montre la validité de l'algorithme proposé.

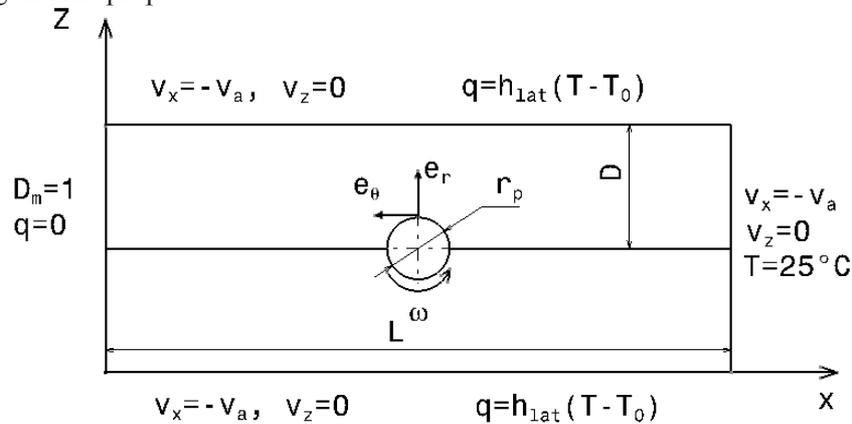


Figure 4: géométrie et conditions aux limites de la configuration FSW traitée par Fluent

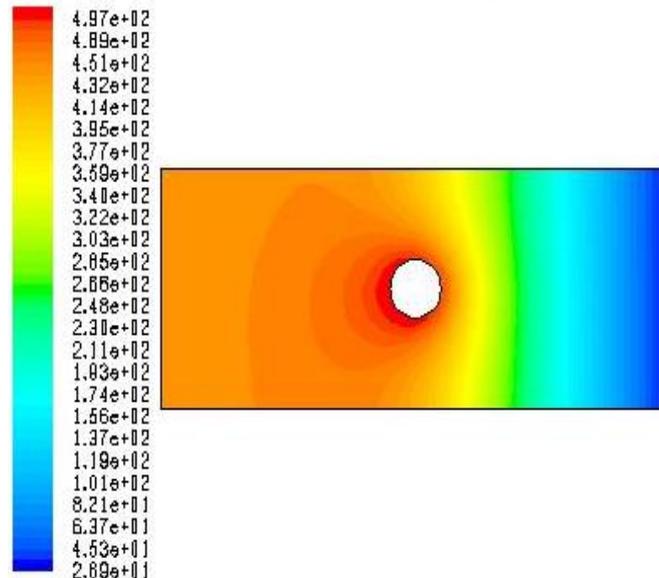


Figure 5: Distribution de température obtenue par Fluent

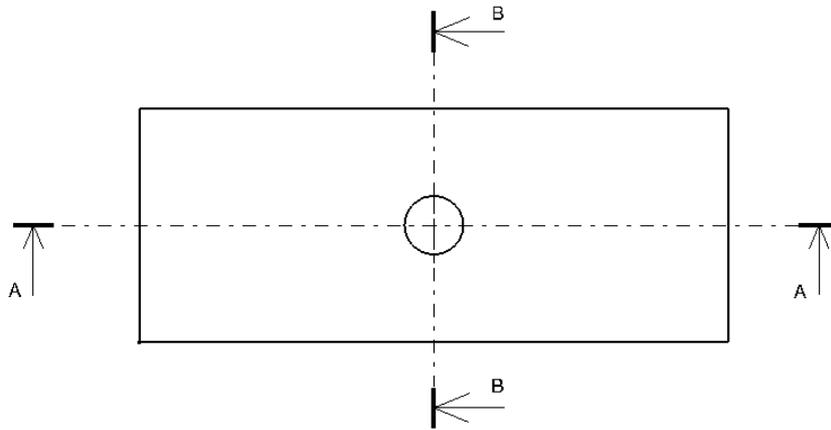


Figure 6: Coupe longitudinale (A-A) et coupe transversale (B-B)

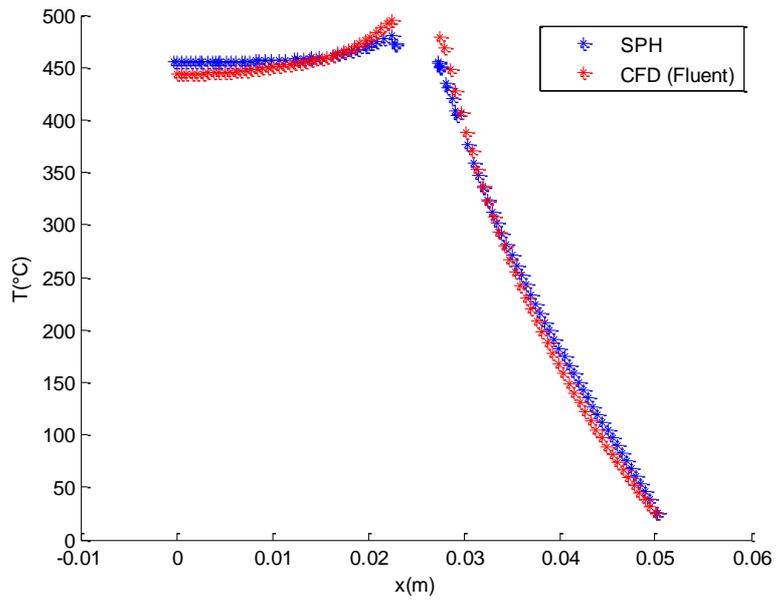


Figure 7: Evolution de température le long de la coupe (A-A)

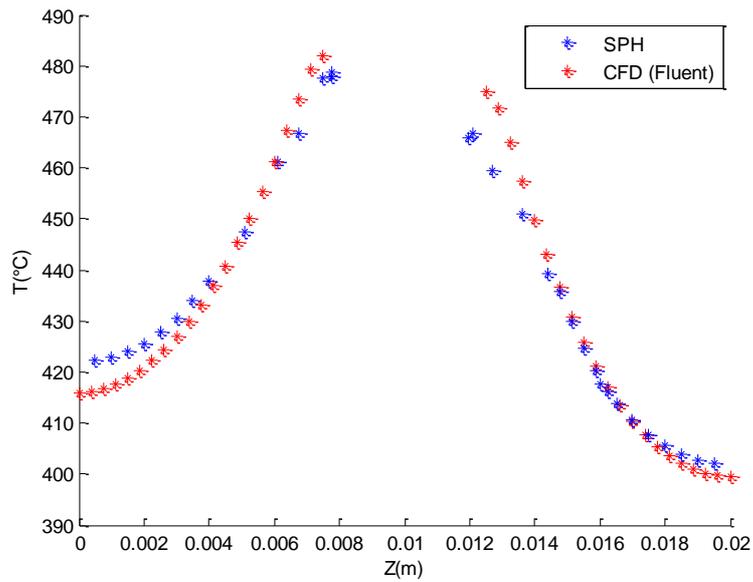


Figure 8: Evolution de température le long de la coupe (B-B)

6 Conclusion

Dans ce travail, nous avons proposé un premier modèle basé sur la méthode SPH pour simuler le procédé de soudage FSW. L'avantage principal de cette technique concerne le malaxage du matériau autour de l'outil qui est difficilement réalisable avec d'autres méthodes numériques comme la méthode des éléments finis.

Nous travaillons actuellement sur l'extension du modèle proposé à trois dimensions. Une loi de comportement plus réaliste dépendante à la fois de la température, de la vitesse de déformation et de l'écroutissage du matériau sera proposée. Par ailleurs, nous travaillons sur le couplage de modèles qui permettra la simulation du soudage pour des plaques de grandes dimensions. Un modèle local qui simulera le malaxage au voisinage de l'outil sera couplé à un modèle thermique qui prendra en compte l'ensemble de la structure et son environnement. Dans ce cadre, des géométries complexes de l'outil proches des géométries réelles des outils de soudage seront étudiées.

Références

- [1] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Church, P. Templesmith and C. Dawes, Intl. Patent Application no. PCT/GB92/02203 and GB Patent Application no. 9125978.9, 1991.
- [2] K. Colligan, "Material Flow Behavior during Friction Stir Welding of Aluminium", *Welding Journal*, volume 78 (71), 229-237, 1999.
- [3] S. Guerdoux, L. Fourment, "A 3D numerical simulation of different phases of friction stir welding", *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, volume 17 (7), 2009
- [4] H. Schmidt, J. Hattel. "Thermal modelling of friction stir welding". *Scripta Materialia*, volume 58, pages 332-337, 2008.
- [5] O. Lorrain, J. Serri, V. Favier, H. Zahrouni, M. El Hadrouz, "A contribution to a critical review of FSW numerical simulation", *Journal of mechanics of materials and structures*, Volume 4 (2), pages 351-369, 2009.
- [6] A. Bastier, M.H. Maitournam, F. Roger, K. Dang Van, "Modelling of the residual state of friction stir welded plates", *Journal of Materials Processing Technology*, volume 200, issues 1-3, pages 25-37, 8 May 2008.
- [7] E. Feulvarch, Y. Gooroochur, F. Boitout, J.M. Bergheau, "3D Modelling of Thermofluid Flow in Friction Stir Welding", *TRENDS IN WELDING RESEARCH, PROCEEDINGS*, Pages 261-266, 2006.
- [8] I. Alfaro, G. Racineux, A. Poitou, E. Cueto, F. Chinesta, "Numerical Simulation of Friction Stir Welding by Natural Element Methods", à paraître dans *International Journal of Material Forming*.
- [9] A. M Tartakovsky, G. Grant, X. Sun and M. Khaleel, *Modeling of Friction Stir Welding (FSW) Process with Smooth Particle Hydrodynamics (SPH)*, SAE 2006 World Congress, Detroit, USA, 2006.
- [10] J.J. Monaghan, "An introduction to SPH", *Computer Physics Communications*, volume 48 (1), pages 89-96, 1988.
- [11] J.J. Monaghan, "Smoothed Particle Hydrodynamics", *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, volume 30, pages 543-574, 1992.
- [12] G. R. Liu, M. B. Liu, "Smoothed Particle Hydrodynamics - A Meshfree Particle Method", World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 5 Toh Tuck Link, Singapore 596224, 2003
- [13] J.J. Monaghan, "On the problem of penetration in particle methods", *Journal of Computational Physics*, Volume 82, Issue 1, Pages 1-15, 1989.
- [14] FLUENT 6.1 User's Guide. 2003.
- [15] J. Zhou, L. Li, and J. Duszczek. 3D FEM simulation of the whole cycle of aluminium extrusion throughout the transient state and the steady state using the updated Lagrangian approach. *Journal of Materials Processing Technology*, 134:383-397, 2003.
- [16] M.P. Allen and D.J. Tildesley, *Computer simulation of liquids* (Oxford University Press, Oxford,) p.81, 2001.