

liquide en suivant leur mouvement à l'aide de traceurs spécifiques. Ensuite, ces résultats seront utilisés pour améliorer le mélange entre deux aciers dissimilaires.

2. Configuration de soudage

Les tests expérimentaux ont été réalisés avec un laser Yb:YAG, d'une puissance de 4 kW et une tache focale de 600 μm . Deux configurations de soudage bord à bord ont été réalisées, une première avec des clinquants de nickel pour valider un premier modèle numérique et une deuxième avec des aciers ayant des teneurs en manganèse différentes pour conclure sur la robustesse du modèle construit lorsque les matériaux à souder sont différents.

Dans un premier temps des clinquants de nickel pur (épaisseur 100 μm) sont insérés entre les tôles d'acier Dual Phase. La Figure 1 présente le schéma de principe de la configuration de soudage ainsi que la position du clinquant de nickel. Différentes positions du faisceau laser ont été testées : position centrée (soudure 1) et décalée de 200 μm (soudure 2).

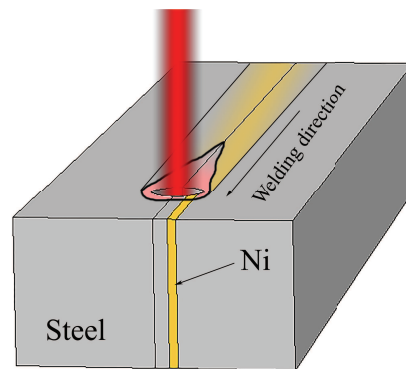


Figure 1 : Configuration de soudage décalée de 200 μm (soudure 2)

Le nickel a été choisi comme traceur chimique afin de révéler le processus de mélange dans la zone fondue à cause de sa similarité avec le fer en termes de masse volumique, conductivité thermique et capacité thermique. Une épaisseur de clinquant de 100 μm est suffisante pour assurer une bonne traçabilité du nickel lors des analyses MEB-EDX. Dans cette étude, l'ajout d'une petite quantité de nickel est supposé insuffisant pour modifier de façon significative les propriétés thermo-physiques locales.

Une seconde expérimentation a été conduite, il s'agit de l'assemblage d'un acier à basse teneur en manganèse (1,4 wt%) avec un acier à haute teneur en manganèse (22 wt%) ; la très haute teneur en manganèse dans un des aciers permet de réaliser des mesures EDX avec une bonne précision.

3. Description du modèle

3.1 Hypothèses simplificatrices

Un certain nombre d'hypothèses ont été choisies permettant de développer le modèle tridimensionnel tout en réduisant le temps de calcul (< 24 heures) :

- un capillaire stationnaire avec la forme d'un cône
- l'apport de chaleur obtenu par une condition aux limites de température de vaporisation uniforme sur les parois du capillaire
- les surfaces supérieure et inférieure supposées planes
- les équations de la thermique et de la mécanique des fluides fortement couplées
- le liquide supposé newtonien et incompressible
- la résolution en mode pseudo-stationnaire des équations avec prise en compte de la vitesse de soudage V_s dans la direction y pour le calcul du champ de vitesse

3.2 Géométrie et maillage

Le capillaire est représenté par une géométrie conique. Le diamètre maximum du cône (surface supérieure) est égal au diamètre de la tâche focale (600 μm) et le diamètre minimum (surface inférieure) est égal à 500 μm . L'épaisseur des tôles est de 1,6 mm. Deux tailles de maillages sont utilisées ; un maillage grossier (Figure 2 - (a)) pour obtenir rapidement une « bonne » condition initiale pour le calcul résolu avec le maillage fin (Figure 2 - (b)). Un volume représentatif est maillé avec des éléments tétraédriques de taille maximale 60 μm dans le cas du calcul résolu finement (Figure 2 - (b)). Le maillage est raffiné autour du capillaire.

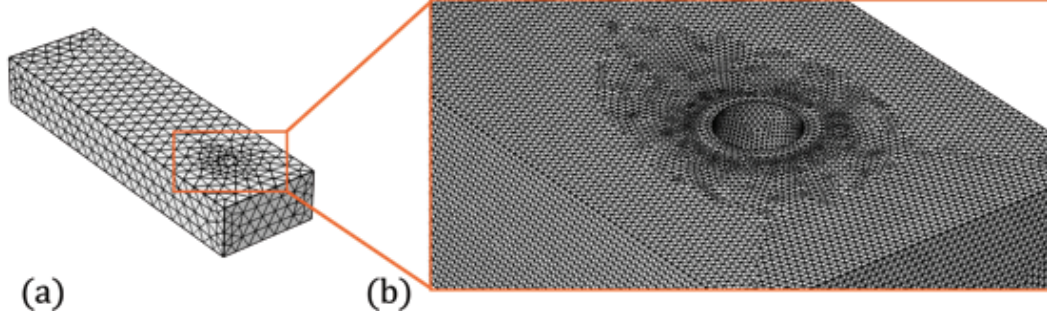


Figure 2 : Maillage grossier (a) et maillage fin (b)

4. Modélisation mathématique

4.1 Transfert thermique

L'équation d'énergie résolue avec le terme de convection fournit le champ de température dans l'ensemble du domaine.

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla(-\lambda \nabla T) = 0 \quad (1)$$

Le changement de phase est pris en compte grâce à une méthode d'enthalpie équivalente

$$C_p(T) = C_p^*(T) + \delta \cdot L_f \quad (2)$$

où la fonction de distribution δ est définie par :

$$\delta = \frac{1}{\Delta T \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{-\frac{T-T_f}{\Delta T}} \quad (3)$$

Les pertes de chaleur par convection et rayonnement sont prises en compte à travers un coefficient d'échange global.

$$\lambda \vec{\nabla} T \cdot \vec{n} = -h_g(T - T_0) \quad (4)$$

4.2 Écoulement dans le bain fondu

Un modèle d'écoulement turbulent (k - ω) a été choisi dans le but de prendre en compte le mélange turbulent causé par les petits vortex se formant à l'arrière du capillaire. Les équations de conservation de la masse, de l'énergie et de moment dans leurs formulations pseudo-stationnaires telles qu'elles sont implémentées dans COMSOL ont été utilisées :

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (5)$$

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot \left[-p\mathbf{I} + (\mu + \mu_T)(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}(\mu + \mu_T)(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I} - \frac{2}{3}\rho k\mathbf{I} \right] - \rho\mathbf{g} + F^M \quad (6)$$

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)k = \nabla \cdot [(\mu + \mu_T\sigma_k^*)\nabla k] + p_k - \beta_0^*\rho\omega k \quad (7)$$

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\omega = \nabla \cdot [(\mu + \mu_T\sigma_\omega)\nabla\omega] + \alpha \frac{\omega}{k} p_k - \rho\beta_0\omega^2 \quad (8)$$

$$\mu_T = \rho \frac{k}{\omega} \quad (9)$$

$$p_k = \mu_T \left[\nabla \mathbf{u} : (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u})^2 \right] - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (10)$$

A cause de la variation de la tension de surface avec la température,

$$\gamma = \gamma_0 + \frac{d\gamma}{dT} \cdot (T - T_{vap}) \quad (11)$$

l'effet Marangoni est pris en compte sur les surfaces supérieure et inférieure :

$$F^M = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (12)$$

Le soudage laser en pénétration totale produit un jet de gaz de haute vélocité. Dans la littérature, une vitesse de la vapeur métallique de gaz, nommée plume de vapeur, supérieure à 100 m/s peut être trouvée [4]. La contrainte résultante de l'interaction entre liquide et gaz ne peut pas être négligée et a été introduite numériquement comme une contribution faible. Ce phénomène est encore mal compris et dans ce modèle la contrainte de cisaillement est une constante choisie par l'utilisateur. En considérant que l'écoulement est laminaire dans la plume de vapeur, l'équation de Darcy-Weisback donne un ordre de grandeur pour la contrainte de cisaillement entre le liquide et le gaz :

$$\tau = \frac{1}{8} f \rho_p V_p^2 \quad (13)$$

où $f = 64/Re$ pour un écoulement laminaire. Pour une vitesse V_p de 100 m.s⁻¹ une contrainte de cisaillement de 50 N.m⁻² est calculée. Cette valeur est actuellement utilisée dans le modèle sans validation expérimentale.

L'interface mobile solide/liquide est modélisée par un changement de viscosité. La viscosité dynamique est fonction de la température : le solide est simulé par un liquide avec une forte viscosité (100 Pa.s).

4.3 Transport des éléments d'alliages

La loi de Fick a été utilisée pour étudier le transport de matière dans le bain liquide,

$$\nabla \cdot (-D_i \nabla c_i + \mathbf{u} c_i) = 0 \quad (14)$$

où D_i est le coefficient de diffusion de l'élément i défini comme :

$$D_i(T) = D_{thermique}(T) + D_{turbulent}(T) = \frac{k_B T}{6\pi r_i \mu} + \frac{\sqrt{2}}{2} \nu_T \quad (15)$$

L'équation de transport de matière n'étant que faiblement couplée avec les équations de la thermique et de la mécanique des fluides, les propriétés thermo-physiques des matériaux sont supposées indépendantes de la concentration en élément d'addition.

5. Résultats

Les résultats numériques montrent que le transport diffusif peut être négligé dans cette étude à cause des hautes vitesses de refroidissement. Un écart relatif inférieur à 1 % est obtenu entre deux calculs résolus avec des coefficients de diffusion thermique différents : 10⁻⁸ m².s⁻¹ et 10⁻²⁰ m².s⁻¹. C'est un résultat essentiel car le terme de convection dans la loi de Fick est prépondérant devant celui de diffusion. Le terme de convection est directement proportionnel au champ de vitesse. L'écoulement dans la zone fondue doit alors être résolu avec un haut degré de précision pour obtenir des résultats de bonne qualité pour la résolution de l'équation de transport. La difficulté est de valider la partie « écoulement » du modèle numérique sans l'aide d'observations expérimentales directes de cet écoulement. Quelques auteurs ont utilisé une source à rayons X pour suivre le déplacement de particules de carbure de tungstène et de platine

dans le bain liquide [3] [2]. Dans [3] les particules ne sont observées qu'en surface. Dans [2], à l'aide d'une camera CCD, les particules traceurs se déplaçant dans un plan ont été observées.

Notre approche, comme celle de Dörfler [5], est d'ajouter un clinquant de métal qui peut être utilisé comme traceur chimique. Le nickel est un traceur chimique ayant une parfaite solubilité dans l'acier. Il fournit une idée globale des phénomènes de convection dans le bain liquide et permet une optimisation du modèle d'écoulement par ingénierie inverse. A partir de l'analyse de la composition chimique post-mortem en Ni, plusieurs hypothèses sur les mécanismes de mélange peuvent être émises.

Dans le but de comparer les résultats expérimentaux et numériques, les cartographies chimiques sont présentées sur le format d'une grille 35x64 px (Figure 3).

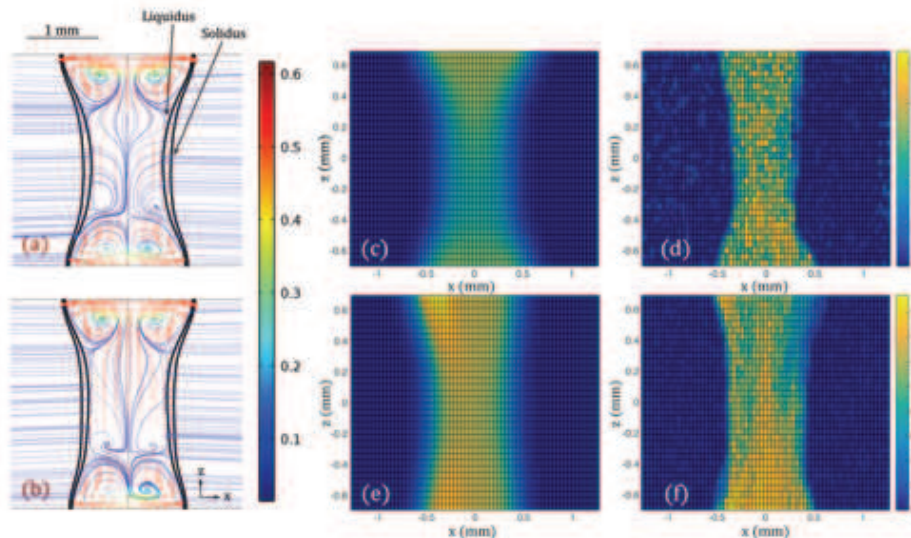


Figure 3 : Lignes de courant pour la soudure 1 (a) et 2 (b) dans une coupe transversale ayant une zone fondue maximale. L'échelle de couleur informe sur la norme de la vitesse ($m.s^{-1}$), en rouge les flèches représentant le champ de vitesse et en noir le solidus et le liquidus. Fraction massique en nickel (wt%) dans une coupe transversale : numérique (c) et expérimentale (d) pour la soudure 1(a) ; numérique (e) et expérimentale (f) pour la soudure 2(b)

Les simulations numériques montrent que quatre vortex se forment à proximité des surfaces supérieure et inférieure à cause de l'effet Marangoni (Figure 3 - a et b). On peut remarquer que la vitesse dans le bain fondu est plus importante dans ces vortex. Cela est d'autant plus important à proximité de la surface du bain. L'effet Marangoni accélère le fluide à des vitesses supérieures à $0,5 m.s^{-1}$ (i.e. 5 fois la vitesse de soudage). A cause d'un coefficient négatif, le liquide va du centre du cordon vers les limites du cordon.

Comme observé sur la Figure 4, les résultats expérimentaux présentent une importante fluctuation alors que les résultats numériques sont lissés. En effet, le maillage défini sur le modèle COMSOL est trop grand pour modéliser correctement les phénomènes locaux de mélange de la matière et de ségrégation lors du refroidissement. De plus, numériquement la transition des propriétés thermo-physiques entre la phase solide et la phase liquide s'effectue sur un intervalle de température ΔT supérieur à l'intervalle solidus/liquidus de l'acier pour faciliter la convergence des calculs. Cependant, cela a pour conséquence de dégrader les résultats numériques à proximité de l'interface solide/liquide.

Afin de mesurer la teneur en éléments d'addition dans le cordon de soudure présentant une forme de sablier, trois lignes caractéristiques ont été choisies (Figure 4) : en surface supérieure et inférieure, où le cordon de soudure est le plus large, et dans le milieu du cordon de soudure, où l'interaction du liquide avec le milieu extérieur est plus faible. Sur chaque ligne de mesure, les teneurs en nickel sont données en fonction de la position x définie par rapport au plan de joint initial. Deux conclusions peuvent être données à partir de l'observation de la distribution

du nickel dans le cordon de soudure. Premièrement, les résultats numériques apparaissent lissés par rapport aux résultats expérimentaux et montrent une diffusion importante dans la zone affectée thermiquement obtenue numériquement. Deuxièmement, la matière se déplace de part et d'autre du plan de joint initial. Numériquement, seule une diffusivité turbulente, calculée par le modèle de turbulence, donne ce résultat. En effet, le calcul des variables de turbulence k et ω donne accès au calcul d'autres paramètres de turbulence. Par exemple, le coefficient de diffusion (équation 15) dans la loi de Fick a été calculé à partir de la viscosité cinématique turbulente :

$$v_T = \frac{k}{\omega} \quad (16)$$

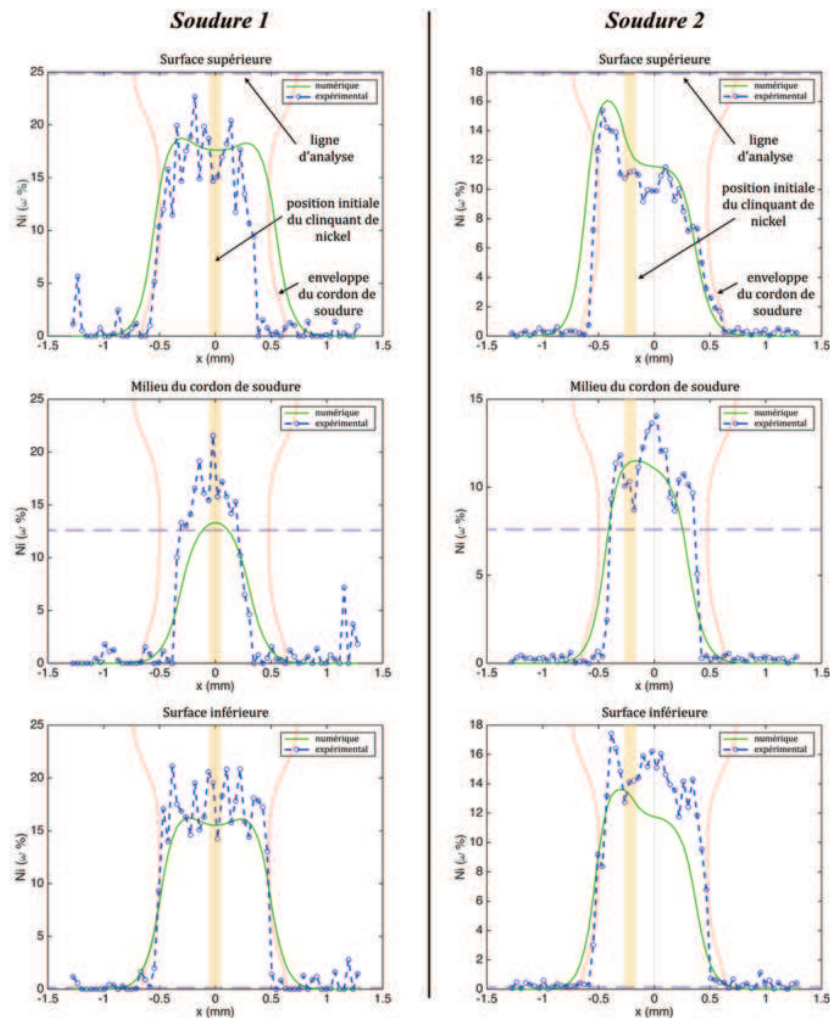


Figure 4 : Fraction massique en nickel le long de l'axe x sur trois lignes caractéristiques pour la soudure 1 (colonne de gauche) et la soudure 2 (colonne de droite). En jaune la position initiale du clinquant de nickel, en rouge la forme du cordon de soudure et en pointillé la localisation de la ligne de mesure de la fraction massique en nickel. Le faisceau laser est centré sur la position $x=0$.

Des zones caractéristiques ont été définies sur la coupe transversale des soudures afin de comparer les compositions chimiques de ces zones d'un cordon de soudure à l'autre (Figure 5). Les mêmes observations sont faites sur chaque cordon de soudure : la concentration en nickel obtenue numériquement surestime la réalité expérimentale à proximité de la surface supérieure du cordon de soudure et, au contraire, les résultats numériques sont inférieurs à ceux obtenus expérimentalement dans le reste du cordon de soudure (Tableau 1).

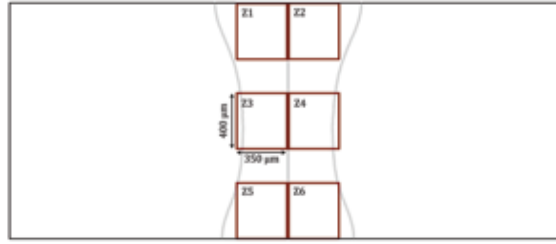


Figure 5 : Zones caractéristiques pour la mesure de la fraction massique en élément d'alliage

		Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Soudure 1	Exp (wt%)	16.3	13.8	14.3	11.2	16.6	15.4
	Calc (wt%)	15.3	15.7	10.1	11.0	12.1	12.6
	ϵ (%)	6.1	-13.8	29.4	1.8	27.1	18.2
Soudure 2	Exp (wt%)	11.0	9.3	11.3	10.4	13.6	13.1
	Calc (wt%)	12.7	10.0	11.1	9.0	12.1	9.9
	ϵ (%)	-15.5	-7.5	1.8	13.5	11.0	24.4

Tableau 1 : Fraction massique en nickel dans les zones caractéristiques du cordon de soudure

6. Robustesse du modèle

La configuration de soudage avec clinquant de nickel a été développée dans le but de construire un modèle multiphysique permettant de prédire la cartographie chimique d'un cordon de soudure formé entre aciers dissimilaires. Les assemblages dissimilaires étudiés par ArcelorMittal sont généralement caractérisés par une hétérogénéité de la chimie des aciers, et plus particulièrement de la teneur en manganèse des aciers assemblés. Il est donc intéressant d'étudier comment se comporte le modèle développé dans le cadre d'une configuration de soudage industrielle. On étudie alors le transport du manganèse dans le cordon de soudure formé entre des aciers très différents (à 1,4 wt% en manganèse et à 22 wt%).

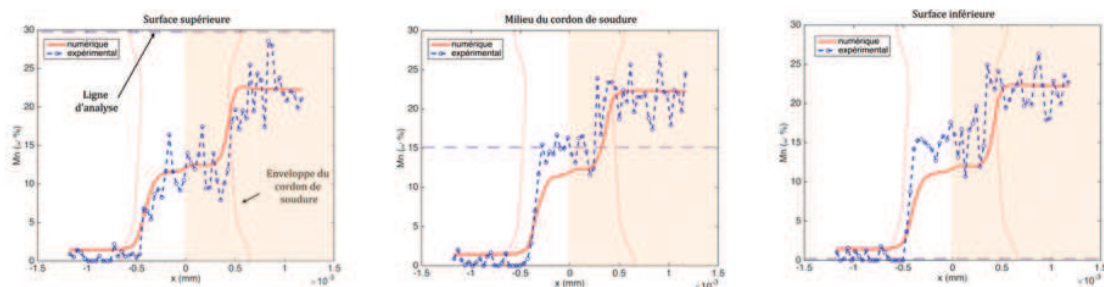


Figure 6 : Fraction massique en manganèse sur trois lignes caractéristiques du cordon de soudure observé sur une coupe transversale

Les résultats numériques comme les résultats expérimentaux montrent que le cordon de soudure a une composition relativement homogène en manganèse (Figure 6). Le modèle numérique est capable d'estimer l'intensité du mélange convectif automatiquement lorsque les matériaux à souder sont changés. Les résultats numériques présentent une tendance similaire aux résultats avec un clinquant de nickel, la fraction massique en manganèse à proximité de la surface supérieure est surestimée alors que près de la surface inférieure elle est sous-estimée. Ceci démontre une bonne robustesse du modèle numérique vis-à-vis du nombre important d'assemblages hétérogènes pouvant être réalisés. Le modèle numérique développé peut donc

être utilisé pour des configurations de soudage industrielles afin d'estimer la composition chimique globale du cordon de soudure formé entre matériaux dissimilaires.

7. Conclusion

Un modèle tridimensionnel du soudage laser en mode keyhole modélisant l'écoulement et le transport de matière est réalisé. La géométrie du cordon de soudure calculée est trouvée en bon accord avec celle obtenue expérimentalement. L'effet Marangoni est introduit dans les équations de la mécanique des fluides sur les surfaces supérieure et inférieure pour retrouver la bonne géométrie du cordon de soudure. Le transport de matière dans le bain liquide est très dépendant du champ de vitesse. La modélisation d'un écoulement turbulent permet le calcul de la diffusivité turbulente qui prend en compte le mélange par les petits tourbillons non modélisés ici. L'introduction d'une diffusivité turbulente est le seul moyen trouvé pour obtenir des résultats numériques en bon accord avec les résultats expérimentaux. Ce modèle est utilisé pour l'étude du transport d'éléments d'addition à l'acier dans le cordon de soudure entre deux aciers différents soudés par laser. Les résultats préliminaires sont prometteurs, le modèle présente un très bon comportement vis-à-vis des différentes configurations expérimentales (matériaux, vitesse de soudage, position du faisceau par rapport au plan de joint, etc).

8. Bibliographie

- [1] N. Chakraborty et S. Chakraborty, «Modelling of turbulent molten pool convection in laser welding of a copper–nickel dissimilar couple», *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 50, pp. 1805 - 1822, 2007.
- [2] M. Boley, F. Abt, R. Weber et T. Graf, «X-Ray and Optical Videography for 3D Measurement of Capillary and Melt Pool Geometry in Laser Welding», *Physics Procedia*, vol. 41, pp. 488 - 495, 2013.
- [3] C. Zhao, C. Kwakernaak, Y. Pan, I. Richardson, Z. Saldi, S. Kenjeres et C. Kleijn, «The effect of oxygen on transitional Marangoni flow in laser spot welding», *Acta Materialia*, vol. 58, pp. 6345 - 6357, 2010.
- [4] E. Amara et A. Bendid, «Modelling of vapour flow in deep penetration laser welding», *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 35, pp. 272-280, 2002.
- [5] S. M. Dörfler, «Advanced modeling of friction stir welding - improved material model for aluminium alloys and modelling of different materials with different properties by using the level set method», *Proceedings of the COMSOL Conference*, Hannover, (2008).