

Mesure de température en surface d'un bain de soudage TIG

Alexandre MATHIEU*, Alexandre METAIS, Iryna TOMASHCHUK

Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (UMR 6303), 12 rue de la Fonderie, 71200 Le Creusot

*(auteur correspondant : alexandre.mathieu@u-bourgogne.fr)

Résumé - Cet article présente une méthode de mesure de la température en surface d'un bain de soudage à l'arc TIG. Le rayonnement thermique en provenance du bain est quantifié à une longueur d'onde de 810 nm. Cette longueur d'onde est choisie en raison de la transparence du plasma d'arc électrique dans l'hélium. L'émissivité directionnelle du métal liquide est déterminée à la température de fusion du Fer en utilisant les lois de Fresnel et de Kirchhoff. L'émissivité est évaluée en supposant que le bain est plat et que l'orientation de sa surface, par rapport à la caméra, est constante.

Nomenclature

n	partie réelle de l'indice de réfraction	T	température, K
K	partie imaginaire de l'indice	<i>Symboles grecs</i>	
L	Luminance, $W.sr^{-1}.m^{-2}.nm^{-1}$	ε	émissivité directionnelle
I_0	Niveau de nuance de gris	θ	angle d'émission, <i>radian</i>
		λ	longueur d'onde, <i>nm</i>

1. Introduction

Les méthodes de mesure sans contact permettent d'accéder à l'information de température en surface d'un bain de soudage malgré le rayonnement intense et parasite en provenance du plasma d'arc électrique. L'analyse du rayonnement d'un plasma d'arc électrique présente un spectre discontinu d'émission [1]. Ce spectre d'émission dépend, en particulier, de la composition du gaz dans lequel s'établit le plasma, et de la nature du métal qui s'évapore et qui émet également à des longueurs d'onde spécifiques. Observer un bain de soudage à une longueur d'onde spécifique permet de réduire les interférences liées au rayonnement du plasma [2], [3] et [4]. L'intensité du rayonnement thermique est liée à la température de la surface émettrice, dans une hypothèse de champ lointain. La thermographie est la méthode permettant d'afficher une image en température de la surface d'un objet ou d'une scène. Généralement, l'influence de l'orientation de cette surface vis-à-vis du capteur de la caméra est négligée. Cette hypothèse simplificatrice est réaliste dans le cas des matériaux diélectriques, cette hypothèse est généralement appelé l'hypothèse du corps gris et diffus. Dans le cas d'une surface métallique, cette hypothèse ne peut s'appliquer que dans de rares cas, surface oxydée, observation normale à la surface, ou dans un angle inférieur à 30° par rapport à cette normale. Dans le cas d'un bain de soudage à l'arc, l'observation du bain de soudage ne peut guère se faire à la normale du bain en raison de l'encombrement lié à la torche de soudage, et en raison de la déformation de la surface libre du bain de soudage soumis à l'action du jet de plasma et à la variation de volume lors du changement d'état solide-liquide. Ce changement d'état induit la formation d'un ménisque de liquide métallique et par conséquent, induit une variation de l'angle d'émergence du rayon lumineux en provenance du bain et intercepté par la caméra. L'émissivité d'un objet métallique dépend donc fortement de l'angle d'émission par rapport à la normale à la surface [5] et [6].

Dans ces conditions, la mesure de la température à la surface d'un bain de soudage TIG est un réel challenge et présente un intérêt industriel certain dans le cas de l'amélioration du

contrôle « online » des opérations de soudage TIG. Les méthodes de mesure sans contact sont préférées aux autres méthodes car, premièrement, ne modifient pas le mesurande contrairement aux méthodes avec contact. Secondement, ces méthodes présentent un intérêt dans le cas de mesure dans des environnements difficiles qui mêlent haute température, métal en fusion, projection et petite échelle de temps des phénomènes. De nombreuses tentatives de mesures de la température superficielle d'un bain de soudage existent dans la littérature. La plupart des travaux mentionnés concernent des études en thermographie IR pour le contrôle de la vitesse de refroidissement à proximité du bain de soudage [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13] et [14]. La détection d'impuretés surnageant à la surface du bain de soudage [15], ou le contrôle des dimensions du bain de soudage [16], [17] et [18]. Quelques travaux concernent une mesure absolue de la température à la surface du bain de soudage, en raison de la difficulté de réaliser une mesure juste. Parmi ces travaux, les auteurs de [4] utilisent la thermographie IR et suppose une dépendance directe entre la valeur de la nuance de gris du pixel de l'image et la température. Les auteurs de [19], [20], [21], [22] et [23] utilisent la pyrométrie bi-chromatique, et suppose donc une émissivité indépendante de la longueur d'onde, d'ailleurs fréquemment, les 2 domaines de longueurs d'onde dans lequel le signal thermique est intégré, sont très proches l'une de l'autre. D'autres approches [24] et [25] nécessitent l'utilisation conjointe de la spectroscopie d'émission optique pour déterminer une relation entre l'émissivité et la température, qui sera introduite, a posteriori, pour le calcul de la température. Parmi tous ces travaux, ceux de Kraus et al. [26] sont les seuls à proposer une méthode de mesure qui prennent en compte la directionnalité de l'émission thermique en provenance du bain de soudage. Dans [27], Kraus et al. prennent en compte la topographie de la surface d'un bain de soudage en plus de l'orientation de la surface de la pièce visée. Néanmoins, la méthode proposée par Kraus est difficile à réaliser, donc exclue, a priori, une utilisation en contrôle « online », et de plus, Kraus réalise des mesures de température uniquement à l'extinction de l'arc électrique.

Dans la première partie de cet article, la méthode de détermination de l'émissivité directionnelle est expliquée. Il s'agit d'une méthode proche de celle que nous avons utilisée et présentée dans un précédent article [28]. La différence principale repose sur la connaissance supposée de la valeur de la partie réelle de l'indice complexe de réfraction, la partie imaginaire étant calculée à partir des relations de Fresnel. Les relations entre l'émissivité et l'indice complexe pour une surface métallique sont rappelées, ainsi que la relation de Planck utilisées pour la conversion Luminance->Température. Dans la seconde partie de l'article, le dispositif expérimental est décrit ainsi que la méthode de calibration de la caméra thermique. Dans la partie suivante, les mesures réalisées sont analysées.

2. Estimation de l'émissivité de la surface métallique liquide

Dans ces travaux, la détermination de la température de la surface d'un liquide métallique est réalisée à partir de l'intégration du rayonnement proche-IR recueilli en provenance d'un bain de soudage composé principalement de Fer Liquide. A partir de l'expression de l'émissivité directionnelle en fonction de l'indice de réfraction complexe, l'indice complexe de réfraction est estimé à partir de la détermination de l'émissivité directionnelle de la surface d'une cible métallique liquide. Cette estimation de l'émissivité repose sur 3 postulats de départ qui seront discutés dans la conclusion de cet article :

- Le bord du bain, côté liquide, est à la température de fusion du Fer,
- L'intensité du rayonnement du bain peut être reliée à l'intensité du rayonnement d'un corps noir, à la même température, par la loi de Planck
- L'émissivité du métal liquide est indépendant de la température pour le domaine de température concernée, i.e. 1538°C -> 2860°C

Dans le cas de surface métallique, l'émissivité directionnelle peut être reliée par les relations suivantes à l'indice complexe de réfraction et à l'angle d'émission :

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{\perp} + \varepsilon_{//}}{2} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_{//} = \frac{4n \times \cos(\theta)}{(n^2 + K^2) \times \cos^2(\theta) + 2n \times \cos(\theta) + 1} \\ \varepsilon_{\perp} = \frac{4n \times \cos(\theta)}{\cos^2(\theta) + 2n \times \cos(\theta) + (n^2 + K^2)} \end{cases} \quad (2)$$

Où ε_{\perp} et $\varepsilon_{//}$ sont les émissivités des émissions thermiques dont la direction de polarisation est, respectivement, perpendiculaire et parallèle au plan d'incidence. n et K sont les valeurs, respectivement, de la partie réelle et de la partie complexe de l'indice de réfraction. θ est l'angle d'émergence du rayon lumineux, relativement à la normale à la surface visée. Pour une émissivité donnée, la température est calculée à partir de la loi de Planck par la relation suivante :

$$T[K] = \frac{h \times c}{\lambda \times k_B \times \ln\left(1 + 2 \frac{\varepsilon \times h \times c^2}{\lambda^5 \times L}\right)} \quad (3)$$

Où h est la constante de Planck, k_B est la constante de Boltzmann et c la célérité de la lumière. L'indice complexe de réfraction, supposé constant depuis la température de fusion jusqu'à la température d'ébullition du Fer, est déterminé à partir de la résolution de l'équation (1) en prenant $\varepsilon = 0,075$, valeur obtenue à partir du calcul du rapport entre la luminance mesurée à la longueur d'onde de 810 nm et celle d'un corps noir rayonnant à la même température. La méconnaissance de la valeur de la partie réelle de l'indice de réfraction pour le Fer liquide nous fait choisir la valeur $n = 3,01$, donnée par [29] pour une surface de Fer solide. La valeur de la partie complexe de l'indice est ainsi évaluée à $K = 12,86$, valeur assez éloignée de la valeur mesurée pour une surface solide, *i.e.* $K = 3,68$ toujours d'après [29].

3. Partie expérimentale

Une caméra rapide Phantom V9.1 de chez Vision Research, est équipée d'un objectif macrophotographique Nikon de 200 mm de longueur focale, ainsi que d'un filtre interférentiel centré à 810 nm avec $\Delta\lambda = 10$ nm. Le bain de soudage TIG est observé avec un angle de 55° par rapport à la verticale, Figure 1. Le bain de soudage est généré grâce à un arc TIG, en polarité directe, avec une valeur de courant de 100 A. La distance entre la pointe de l'électrode et la surface de la cible métallique est de 4 mm, pour une tension résultante comprise entre 10 et 14 V. Un débit d'Hélium de 10 L/min est réglé sur un débit-litre Argon. La cible est constituée d'un acier bas carbone (%C < 0.22%, % Mn > 1.2%) de type A60. La tôle d'acier de 10 mm d'épaisseur est nettoyée au moyen d'un papier de polissage P400.



Figure 1 : Photographie du dispositif expérimental : à gauche, la caméra Phantom équipée de l'objectif de 200 mm de focale, à droite, la torche TIG.

La calibration du système en luminance est réalisée au moyen d'un four à corps noir en céramique LaCrO_3 , de 473 K jusqu'à 1673 K, de marque Pyrox PY15. Le diamètre de l'entrée du corps noir est de 15 mm. En considérant une émissivité de 1, la luminance du corps noir est estimée à partir de la loi de Planck. A partir d'une régression polynomiale de degré 2 effectuée sur le nuage de point expérimental, la relation suivante a été obtenue :

$$L = 0,0021 \times I_0^2 + 0,0606 \times I_0 + 0,5456 \quad (4)$$

Le coefficient de régression, *i.e.* R^2 , obtenu est de 0,9996. La valeur I_0 est obtenue en effectuant la moyenne de la valeur de la nuance de gris sur une région de taille 600 par 800 pixels. L'écart-type relatif sur les valeurs de nuance de gris dans cette région est au maximum de 2 %, voir Figure 2.

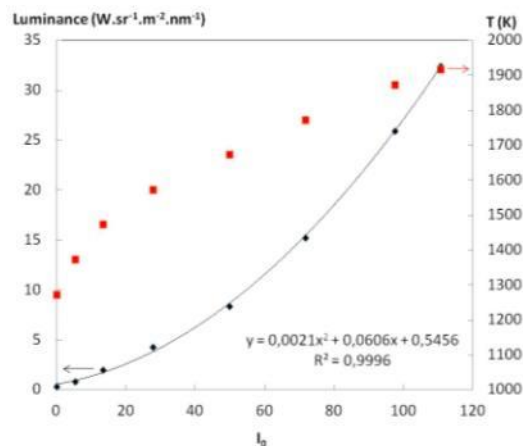


Figure 2 : Calibration en température et en luminance du corps noir, courbe de régression polynomiale de degré 2 (NB : la courbe en bleu avec le marqueur losange se rapporte à l'axe de gauche, la courbe en rouge-marqueur carré se rapporte à l'axe de droite).

Les paramètres de la caméra pour la calibration sont les mêmes que ceux utilisés lors des mesures sur le bain de soudage, *i.e.* une ouverture numérique $f/22$, un temps d'exposition de 250 μs pour une cadence d'acquisition de 1000 images/s à une résolution de 1284 par 856 pixels. La distance capteur-scène de soudage est d'environ 50 cm pour un rapport de reproduction voisin de 1 : 1. Le capteur de la caméra présente une taille de 18,76 mm par 13,8 mm, pour une taille du pixel de 11,5 μm .

4. Résultats et discussion

Le rayonnement provenant de l'environnement et se réfléchissant à la surface du bain peut être négligé, à l'exception du rayonnement émis par l'électrode en tungstène. Le reflet de la

pointe de l'électrode, chauffée à plus de 3000 K d'après la littérature, est visible à la surface du bain lorsque l'orientation de la surface libre du bain permet d'en renvoyer une image vers la caméra, voir Figure 3.

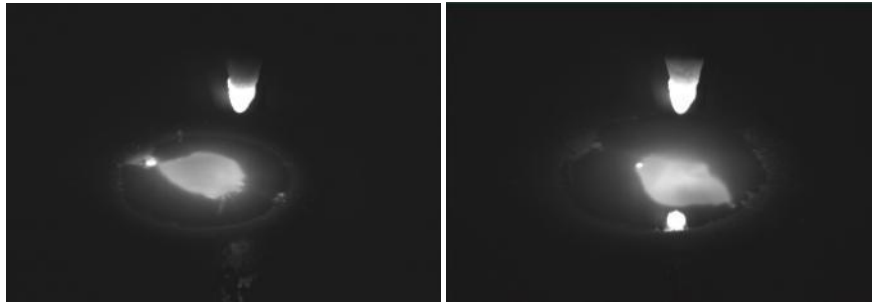


Figure 3 : Le reflet de la pointe de l'électrode en tungstène est visible sur la photo de droite mais pas sur la photo de gauche.

Le disque blanc brillant, à gauche du bain sur les photos de la Figure 3, est mobile. Il s'agit d'une impureté, probablement un agrégat d'oxyde, dont l'émissivité est supérieure à celle du liquide métallique environnant. Plusieurs petits points blancs sont également visibles sur le pourtour de la tâche centrale et plus étendue, moins brillante. Cette dernière représente la partie de la surface du bain qui est en interaction directe avec le plasma de soudage. La forme de cette tâche étendue évolue au cours du temps au gré de la déformation de la surface libre du bain soumis à l'action du jet de plasma. En raison de la présence du filtre centrée à 810 nm et du gaz plasmagène utilisé, *i.e.* l'hélium, le plasma d'arc n'apparaît pas à l'image. On suppose négligeable son effet sur la transmission du rayonnement thermique en provenance de la surface du bain, voir [30]. La surface du bain est stable et ne présente pas de déformation importante comme c'est le cas pour des phénomènes thermocapillaires intenses, *e.g.* en soudage Laser.

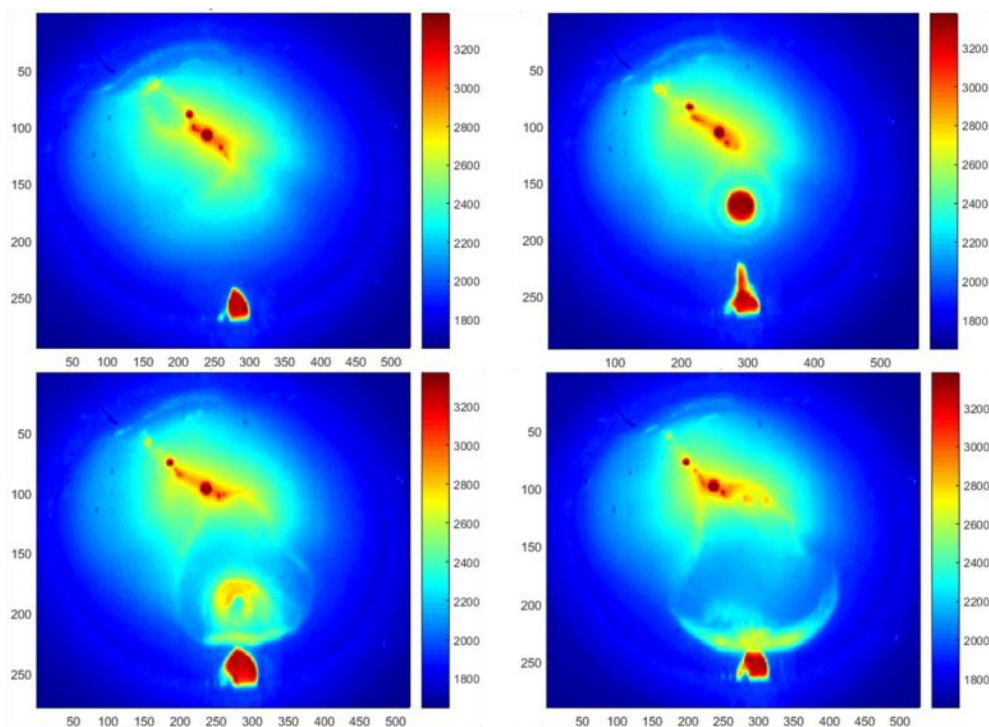


Figure 4 : Cartographie en Température à la surface du bain, chaque image est prise à 2 ms d'intervalle. Le reflet de la pointe de tungstène est toujours visible en périphérie du bain (en bas sur l'image).

Figure 4, cette séquence d'image montre une bulle de gaz ou une impureté qui émerge soudainement du bain et explose créant une dépression à la surface du bain. Le changement d'orientation de la surface libre du bain est visible à la 4^{ème} image, car le reflet de la pointe de l'électrode de tungstène n'est plus visible. Des impuretés sont projetées à la périphérie du bain de soudage.

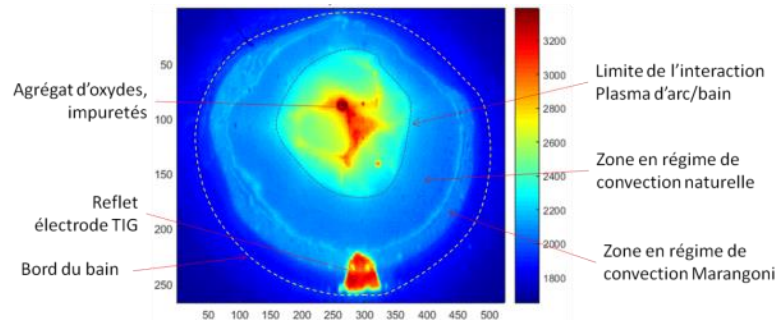


Figure 5 : Cartographie en température à la surface du bain, 15 ms après la dernière image de la séquence présentée en Figure 4.

Figure 5, suite à la séquence visualisée à la Figure 4, différentes zones sont observées. La zone centrale, qui se situe dans une fourchette de température comprise entre 2400 et 2800 K, est directement soumise à l'interaction avec le plasma d'arc électrique. Les températures très élevées observées sont dues à la présence d'agrégats d'oxyde ou d'impuretés qui surnagent. Ces structures semblent résulter de l'agrégation de particules plus petites qui surnagent à proximité. Elles sont soumises directement à l'action du plasma d'arc électrique, la présence de flux convectifs, type Marangoni, de la périphérie vers le centre du bain ne peut expliquer la raison pour laquelle ces agrégats restent localisés à cet endroit. La zone intermédiaire semble relativement stable en température, *i.e.* de 2100 K à 2400 K. Figure 6, un profil de température montre cette stabilisation :

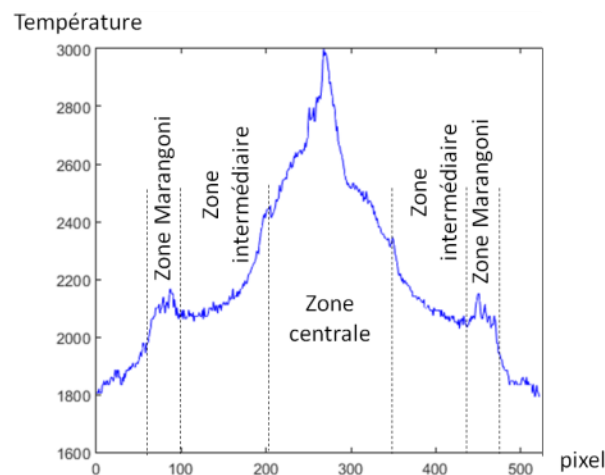


Figure 6 : Profil de température tracée à $y = 140$ à partir de l'image montrée à la Figure 5

Au-delà de la zone intermédiaire que nous interprétons comme une zone où se produit un phénomène de convection naturelle par égard au gradient thermique observé. Nous identifions une zone où semble se produire des phénomènes convectifs exclusivement à la surface du bain. Cette zone est le siège de variation de température particulière. Nous associons les phénomènes observés à des flux convectifs de type Marangoni car cela ne peut être associé qu'à un

phénomène convectif en surface. Il se peut également que ce soit des ondulations de la surface libre du bain de soudage de type *ripples*.

5. Conclusion

A partir de l'observation de la surface d'un bain de soudage TIG stationnaire, différentes zones associées à différents phénomènes convectifs semblent exister. Il ne peut être établi une prépondérance d'un effet convectif particulier par rapport à un autre. Les résultats montrent que la température d'ébullition n'est pas atteinte malgré la présence d'un plasma très chaud à proximité, i.e. $T > 3000$ K aux électrodes selon la littérature [31]. Ces mesures sont confirmées par les travaux antérieurs de Kraus et al, [26] et [27].

Les mesures réalisées permettent de mettre en évidence les phénomènes de convection naturelle, et Marangoni en surface d'un bain de soudage TIG. A ces 2 phénomènes, il est judicieux de rajouter, également, l'influence des forces de Lorentz sur le flux de liquide, i.e. force d'origine électromagnétique induite par le passage du courant. Le siège des effets liés aux flux issus des forces de Lorentz semble se localiser dans la partie centrale du bain de soudage, à l'endroit où le plasma d'arc électrique est en interaction avec la surface du bain. La mise en évidence de ces phénomènes est de première importance dans l'optique de la validation de la simulation numérique du soudage. De même, la prise en compte de modèle de source de chaleur plus réaliste qu'actuellement, nécessite la réalisation d'une instrumentation plus fine que l'utilisation de thermocouples implantés dans la matière. Dans le cas des travaux présentés ici, le bain métallique fondu est statique afin de faciliter la mise en œuvre de la visualisation thermographique et permettre une analyse plus aisée des phénomènes multiples et couplées se produisant. Néanmoins, ces travaux restent une première étape, essentielle, pour l'obtention d'une cartographie thermique juste en surface libre d'un bain de soudage. Les valeurs d'émissivités utilisées reposent sur la prise en compte d'hypothèses simplificatrices:

- Le bord du bain, côté liquide, est à la température de fusion du Fer, cependant, en raison des phénomènes de surfusion, une variation de plusieurs degrés est possible. Dans ces travaux, le bain est statique, il n'y a pas de front de fusion qui avance dans la matière, le phénomène de surfusion est donc limité.
- La mesure des propriétés optiques des métaux à l'état liquide est très peu répandue, nous utilisons celle contenue dans [29]. Nous ne pouvons en conclure que sur la nécessité de disposer de mesures d'émissivité à 810 nm sur des métaux à l'état fondu.
- L'intensité du rayonnement du bain peut être reliée à l'intensité du rayonnement d'un corps noir, à la même température, par la loi de Planck. L'hypothèse que la surface métallique liquide ait un comportement, du point de vue du rayonnement, similaire à celui d'un corps diffusant est nécessaire pour permettre le calcul de température. L'observation du bain permet de confirmer la nature diffuse du rayonnement recueilli et semble donc confirmer cette hypothèse.
- L'émissivité du métal liquide est indépendante de la température pour le domaine de température concernée, i.e. $1538^{\circ}\text{C} \rightarrow 2860^{\circ}\text{C}$. D'autres auteurs confirment cette indépendance, [24] et [25].

Sur un plan technologique, l'extension de la méthode à d'autres types de procédé, matériaux métalliques nécessitent de résoudre la question clé de la fenêtre d'observation spectrale permettant d'avoir un plasma transparent ainsi qu'une émission thermique en provenance du bain suffisante pour être décelée par le capteur. Ces travaux et leur interprétation confirment la nécessité de prendre en compte la topographie du bain pour l'analyse des résultats obtenus.

Références

- [1] M. Weglowski, «Investigation on the arc light spectrum in GTA welding,» *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 20, n° 11-2, pp. 519-522, January-February 2007.
- [2] B. Abdullah, «Monitoring of welding using Laser diodes,» chez *Semiconductor Laser diode technology and applications*, S. P. Dnyaneshwar, Éd., InTech, 2012, pp. 241-262.
- [3] R.-S. Huang, L.-M. Liu and S. G., "Infrared temperature measurement and interference analysis of magnesium alloys in hybrid laser-TIG welding process," *Materials Science and Engineering A*, no. 447, pp. 239-243, 25 Février 2007.
- [4] G. Zhang, C. S. Wu et Z. Liu, «Experimental observation of both keyhole and its surrounding thermal field in plasma arc welding,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, pp. 439-448, mars 2014.
- [5] D. Miyazaki, M. Saito, Y. Sato et K. Ikeuchi, «Determining surface orientations of transparent objects based on polarization degrees in visible and infrared wavelength,» *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 19, n° 14, pp. 687-694, 2002.
- [6] G. Bimonte, L. Cappellin, G. Carugno, G. Ruoso et D. Saadeh, «Polarized thermal emission by thin metal wires,» *New Journal of Physics*, vol. 11, p. 033014, March 2009.
- [7] W. Lukens, R. Morris et E. Dunn, «IR temperature sensing of cooling rates for arc welding control,» DTNSRDC/SME-80/70, Bethesda, Maryland 20084, 1981.
- [8] J.-L. Doong, C.-S. Wu et J.-R. Hwang, «INFRARED TEMPERATURE SENSING OF LASER WELDING,» *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, pp. 607-616, 1991.
- [9] P. Moreira, O. Frazao, S. Tavares, M. de Figueiredo, M. T. Restivo et J. L. Santos, «Temperature field acquisition during gas metal arc welding using thermocouples, thermography and fibre Bragg grating sensors,» *Measurement Science & Technology*, pp. 877-883, 2007.
- [10] G. Liang et S. Yuan, «Study on the temperature measurement of AZ31B magnesium alloy in gas tungsten arc welding,» *Material Letters*, pp. 2282-2284, 2008.
- [11] L. Liu, M. Chi, R. Huang, G. Song, Zhou et Yang, «Infrared measurement and simulation of magnesium alloy welding temperature field,» *Science in China Ser. E Engineering and Materials Science*, pp. 706-715, 2005.
- [12] J. Boillot, P. Cielo, G. Begin, C. Michel, M. Lessard, P. Fafard et D. Villemure, «Adaptive Welding by Fiber Optic Thermographic Sensing: An Analysis of Thermal and Instrumental Considerations,» *Welding Journal ; Research Supplement*, pp. 209s-218s, juillet 1985.
- [13] S. Mattei, D. Grevey, A. Mathieu et L. Kirchner, «Using infrared thermography in order to compare laser and hybrid (laser+MIG) welding processes,» *Optics & Laser Technology*, pp. 665-670, Septembre 2009.
- [14] A. Mathieu, S. Mattei, A. Deschamps, B. Martin et D. Grevey, «Temperature control in laser brazing of a steel/aluminium assembly using thermographic measurements,» *NDT & E International*, pp. 272-276, juin 2006.
- [15] B. Chin, N. Madsen et J. Goodling, «Infrared Thermography for Sensing the Arc Welding Process,» *Welding Journal; Research Supplement*, pp. 227-s to 234-s, Septembre 1983.
- [16] S. Nagajaran, W. Chen et B. Chin, «Infrared Sensing for Adaptive Arc Welding,» *Welding Journal :Research Supplement*, pp. 462s-466s, Novembre 1989.
- [17] W. Chen et B. Chin, «Monitoring Joint Penetration Using Infrared Sensing Techniques,» *Welding Journal: Research Supplement*, pp. 181s-185s, avril 1990.
- [18] A. Bicknell, J. Smith et J. Lucas, «Infrared sensor for top face monitoring of weld pools,» *Measurement Science & Technology*, pp. 371-378, 1994.
- [19] P. Bertrand, I. Smurov et D. Grevey, «Application of near infrared pyrometry for continuous Nd:YAG laser welding of stainless steel,» *Applied Surface Science*, pp. 182-185, 2000.
- [20] M. Doubenskaia, P. Bertrand et I. Smurov, «Pyrometry in laser surface treatment,» *Surface & Coatings Technology*, pp. 1955-1961, 2006.
- [21] P. Bertrand, M. Ignatiev, G. Flamant et I. Smurov, «Pyrometry applications in thermal plasma processing,» *Vacuum*, pp. 71-76, 2000.
- [22] M. Tanaka, K. Waki, S. Tashiro, K. Nakata, E. Yamamoto, K. Yamazai et K. Suzuki, «Visualizations of 2D temperature distribution of molten metal in arc welding process,» *Transactions of JWRI*, vol. 38, n° 12, 2009.
- [23] E. Siewert, J. Schein et G. Forster, «Determination of enthalpy, temperature, surface tension and geometry of the material transfer in PGMAW for the system argon-iron,» *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 46, p. 224008, 2013.
- [24] H. Shöpp, A. Sperl, R. Kozakov, G. Gött, Uhrlandt, D. et G. Wilhelm, «Temperature and emissivity determination of liquid steel S235,» *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 45, p. 235203, 2012.
- [25] R. Kozakov, H. Schöpp, G. Gött, A. Sperl, G. Wilhelm et D. Uhrlandt, «Weld pool temperatures of steel S235 while applying a controlled short-circuit gas metal arc welding process and various shielding gases,» *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 46, p. 475501, 2013.
- [26] H. Kraus, «Optical spectral radiometric method for measurement of weld pool surface temperatures,» *Optics Letters*, pp. 773-775, décembre 1986.
- [27] H. Kraus, «Experimental Measurement of Stationary SS 304, SS 316L and 8630 GTA Weld Pool Surface Temperatures,» *Welding Journal: Research supplement*, pp. 269-s to 279-s, juillet 1989.
- [28] N. Coniglio, A. Mathieu, O. Aubreton et C. Stolz, «Characterizing weld pool surfaces from polarization state of thermal emission,» *Optics Letters*, vol. 38, pp. 2086-2088, juin 2013.
- [29] M. Ordal et al., «Optical properties of Al, Fe, Ti, Ta, W, and Mo at submillimeter wavelengths,» *Appl. Opt.* (27), pp. 1203-1209, 1988.
- [30] N. Coniglio, A. Mathieu, O. Aubreton et C. Stolz, «Plasma effect on weld pool surface reconstruction by shape-from-polarization analysis,» *Applied Physics Letters*, vol. 104, p. 131603, 2014.
- [31] R. R. X. L. D. Farson, «Infrared Measurement of Base Metal Temperature in GTAW,» *American welding Society*, November 2002: 2., vol. 2, November 2002.