

JOURNAL INTERNATIONAL DE TECHNOLOGIE, DE L'INNOVATION,  
DE LA PHYSIQUE, DE L'ENERGIE ET DE L'ENVIRONNEMENT

**Analyse  $\mu$ -structurale du fil électrode en  
soudage MIG-MAG :  
Cas des mélanges Ar-CO<sub>2</sub> et Ar-O<sub>2</sub>**

Q. Castillon, M. Wartel, N. Pellerin, S. Pellerin, F. Faubert,  
J.-P. Planckaert, F. Briand



ISSN : 2428-8500

DOI : 10.18145/jitipee.v5i2.239

## Analyse $\mu$ -structurale du fil électrode en soudage MIG-MAG : Cas des mélanges Ar-CO<sub>2</sub> et Ar-O<sub>2</sub>

Quentin Castillon <sup>(1)</sup>, Maxime Wartel <sup>(1)</sup>, Nadia Pellerin <sup>(2)</sup>, Stéphane Pellerin <sup>(1)</sup>,  
François Faubert <sup>(1)</sup>, Jean-Pierre Planckaert <sup>(3)</sup>, Francis Briand <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> GREMI, Université d'Orléans, CNRS UMP 7344, 18020 Bourges Cedex, France

<sup>(2)</sup> CEMHTI, CNRS Université d'Orléans, UPR 3079, 45071 Orléans Cedex 2, France

<sup>(3)</sup> Laboratoire R&D AIR-LIQUIDE, Jouy en Josas, France

Maxime.wartel@univ-orléans.fr

**Résumé** – L'étude réalisée porte sur l'influence de la nature et de la proportion de gaz actif dans le gaz de protection sur le comportement du soudage MIG-MAG en polarité inverse. Une analyse de la colonne d'arc par spectroscopie optique d'émission et imagerie rapide équipée d'un filtre interférentiel, complétée par une étude physico-chimique de l'extrémité du fil électrode par sonde de Castaing, MEB-EDX et DRX. Cela permet de formuler des hypothèses quant aux mécanismes mis en jeu concernant les phénomènes observés en régime spray sous Ar, Ar-CO<sub>2</sub> et Ar-O<sub>2</sub>.

**Mots clés** : soudage MIG-MAG, spectroscopie optique d'émission, analyse plasma, analyse microstructurale, gangue

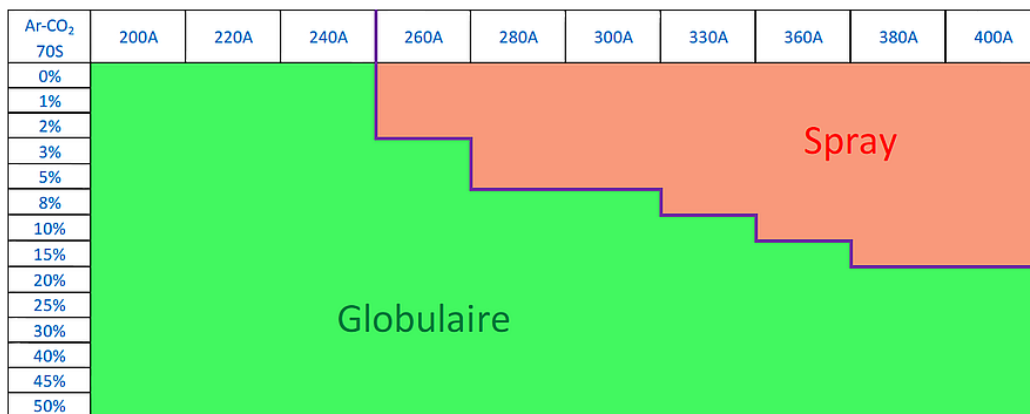
DOI : 10.18145/jitipee.v5i2.239

### Introduction

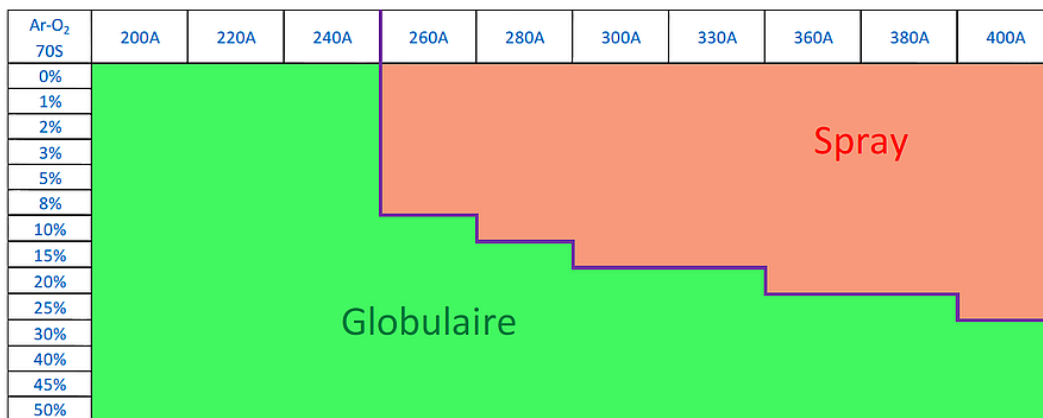
Les techniques de soudage à l'arc selon le procédé MIG-MAG (Metal Inert Gas – Metal Active Gas) font encore l'objet de nombreux questionnements dans leur fonctionnement en raison de la complexité des mécanismes mis en jeu et de la multitude des paramètres impliqués: type de polarité, dimension et composition de l'électrode fusible, distance inter-électrodes, intensité du courant d'arc, composition et débit du gaz de protection.... Parmi ceux-ci, une attention particulière a été portée sur l'influence de l'ajout de gaz actif dans le gaz de protection sur la stabilité du procédé de soudage [1, 2]. Il a été mis en évidence précédemment [3] que la nature et la proportion de gaz actif utilisé dans le gaz de protection modifient de manière notable les limites de la transition entre le régime globulaire et le régime de pulvérisation axiale (spray). Comme le montre la Figure 1, l'utilisation d'oxygène comme gaz actif permet d'allonger la gamme de régime spray, plus généralement recherchée

car présentant un transfert des gouttes de métal plus homogène et générant moins de projections et de fumées [4, 5]. Sur la base de ces résultats, des études complémentaires par spectroscopie optique d'émission et imagerie rapide avec filtre interférentiel ont été réalisées simultanément sur la colonne d'arc pour différentes compositions de gaz de protection. Parallèlement, des études ont été effectuées sur l'influence de la composition du gaz de protection sur les caractéristiques physico-chimiques du fil électrode, et plus particulièrement de la gangue (oxyde de fer) formée à son extrémité. Une analyse de structure alliant mesure par  $\mu$ -sonde de Castaing, analyse DRX et MEB-EDX, a permis de mettre en évidence de fortes disparités de la gangue au niveau de ses caractéristiques microstructurales (épaisseur, porosité,...), de sa composition chimique et de la typologie de l'oxyde de fer formé selon le gaz actif utilisé.

a/ Mélange Ar-CO<sub>2</sub>



b/ Mélange Ar-O<sub>2</sub>



**Figure 1** : Régime de transferts de métal en fonction du taux de gaz actif et du courant d'arc - Conditions expérimentales : polarité inverse ; fil 70S ; argon + x % gaz actif ;  $Q_{gaz} = 20$  l/min

**1. Dispositif expérimental d'analyse**

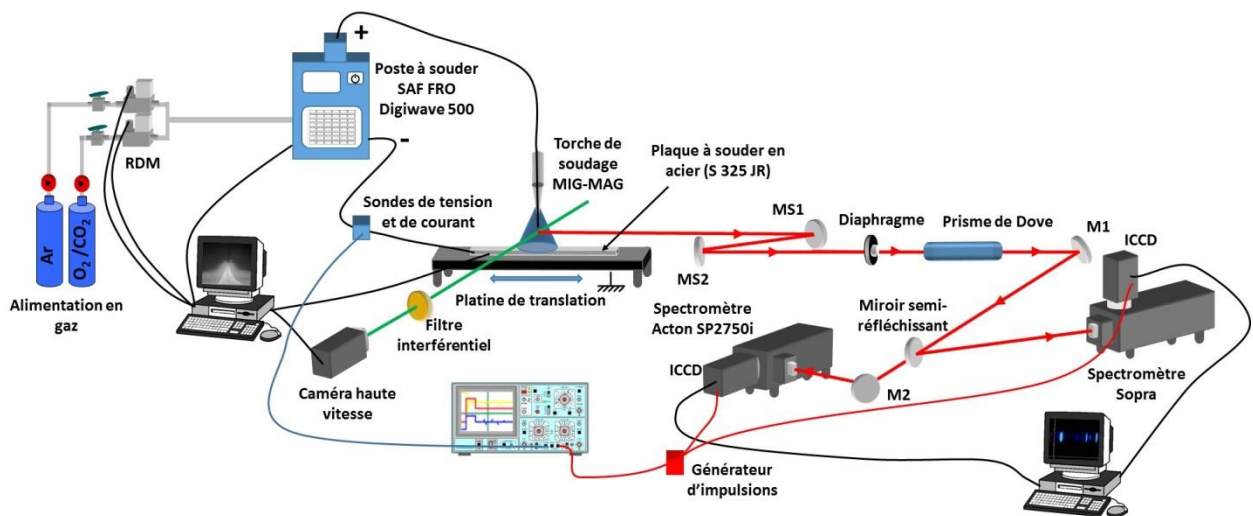
Le dispositif expérimental, présenté sur la Figure 2, est décrit de manière détaillée dans un précédent article [4]. Brièvement, il consiste en la génération d'un arc électrique entre un fil fusible (anode, de type fil-plein de référence 70S – Cf. composition dans Tableau 1) par un poste à souder (SAF-FRO Digiwave 500 – Courant maximal disponible de 400 A) et une pièce de métal (cathode, en acier de type S325JR - Cf .Tableau 1) sous un gaz de protection.

Le dispositif optique d'analyse est composé de deux parties (cf. Figure 2) : d'une part est installée suivant l'axe de la colonne d'arc une caméra rapide équipée d'un filtre interférentiel pour les mesures des vapeurs métalliques dans le plasma d'arc [5] ; d'autre part, un dispositif de spectroscopie optique d'émission a été mis en place pour l'acquisition simultanée des raies d'émission notamment de Fer I et d'Ar I par le biais de deux spectromètres permettant ainsi de palier d'éventuels problèmes de répétabilité entre deux essais de soudage.

Fil anode Ref. 70S		Acier Réf : S 325 JR	
Éléments	%	Éléments	%
Fe	97,4849	Fe	99,93484
Mn	1,0599	Mn	0,01596
Si	0,6911	Cu	0,01461
C	0,4017	Si	0,00892
Cu	0,1396	C	0,00879
Ni	0,0548	Cr	0,00499
O	0,0485	Ni	0,00482
N	0,0245	S	0,00257
Cr	0,0235	P	0,00214
P	0,0197		
S	0,0190		
Mo	0,0184		

**Tableau 1 :** Principaux constituants des électrodes

Le protocole consiste à suivre l'évolution de l'émission radiative du plasma par une mesure 1D spectrale sur un axe perpendiculaire à l'axe de la décharge, en utilisant un prisme de Dove permettant une rotation de 90° de l'image du plasma. Après inversion d'Abel, il est possible de déterminer les répartitions radiales d'intensité des raies spectrales dans la colonne d'arc (supposée à symétrie cylindrique), et ainsi d'accéder à une mesure de la répartition radiale des densités et températures à une hauteur  $h_{arc}$  donnée entre la pièce à souder et la buse.



**Figure 2 :** Vue schématique du dispositif expérimental

Deux types d'analyse spectrale ont été utilisés : la première reposant sur la méthode de Sola [6] qui consiste en la mesure simultanée, au même point de la colonne d'arc, des élargissements Stark  $\Delta\lambda_S$  de la raie de Fe I à 538,3 nm et de la raie d'Ar I à 696,5 nm. L'évolution connue [7, 8] des valeurs de ces deux élargissements Stark, en fonction de la densité électronique  $N_e$  et de la température électronique  $T_e$  (cf. équation (1)), permet une mesure de ces deux paramètres sans hypothèse sur l'état d'équilibre thermodynamique local (ETL). Il est ainsi possible de déterminer les profils radiaux de densité et de température électroniques :

$$\Delta\lambda_S^{Fe} = 0.2648 \cdot \frac{N_e}{10^{23}} \cdot \left( \frac{T_e}{13000} \right)^{1.6700}$$

$$\Delta\lambda_S^{Ar} = 0.0814 \cdot \frac{N_e}{10^{23}} \cdot \left( \frac{T_e}{13000} \right)^{0.3685}$$
(1)

La deuxième technique repose sur une hypothèse d'ETL : elle consiste en la mesure de l'émissivité  $\varepsilon(T)$  des raies de Fe I et Ar I après calibration des intensités de raies par une lampe à ruban de tungstène. Il est alors possible de relier le rapport d'émissivité de ces deux raies aux rapports de densités de fer  $N_{FeI}(T)$  et d'argon  $N_{ArI}(T)$  moyennant la connaissance des grandeurs spectroscopiques  $g$  (poids statistiques des niveaux mis en jeu),  $A$  (probabilité de transition) et  $U(T)$  (fonction de partition) [9-11]. Ainsi, la proportion  $\mathcal{R}$  en Fe I peut être évaluée selon l'équation (2) :

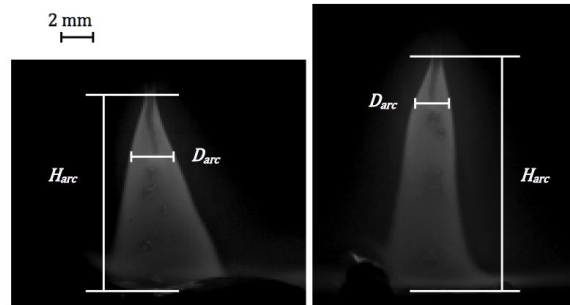
$$\mathcal{R} \equiv \frac{N_{FeI}(T_e)}{N_{ArI}(T_e)} = \frac{\lambda_{FeI}}{\lambda_{ArI}} \cdot \frac{g_{ArI}}{g_{FeI}} \cdot \frac{A_{ArI}}{A_{FeI}} \cdot \frac{U_{FeI}(T_e)}{U_{ArI}(T_e)} \cdot \frac{\varepsilon_{FeI}(T_e)}{\varepsilon_{ArI}(T_e)} \cdot \exp\left(-\frac{E_{ArI} - E_{FeI}}{kT_e}\right)$$
(2)

## 2. Résultats et discussion

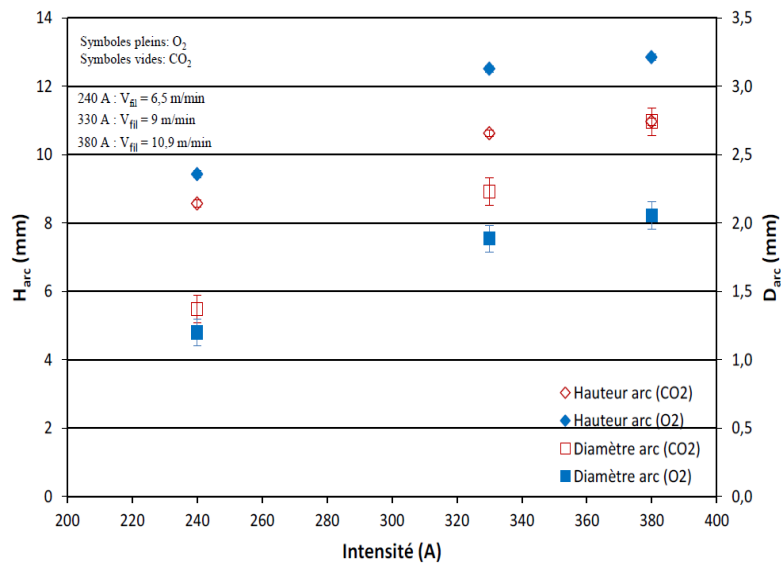
### 2.1 Mesure des caractéristiques géométriques de l'arc

Afin de mieux comprendre les effets des paramètres tels que le courant d'arc et la composition du gaz de protection sur la géométrie de la colonne, des mesures par cinématographie interférentielle ont été effectuées pour les deux gaz de protection (Ar-CO<sub>2</sub> et Ar-O<sub>2</sub>) pour des taux de gaz actifs variant de 0% à 15%, au-delà duquel il est difficile d'obtenir le régime spray (Cf. Figure 1). Cette méthode repose sur l'utilisation d'un filtre interférentiel, placé devant la matrice de la caméra rapide et centré à 469,2 nm (Largeur totale à mi-hauteur  $FWHM = 3$  nm) sur des raies d'émission de Fe I et dans une zone spectrale où le continuum de l'argon ne dépend quasiment que de la densité électronique. Il est ainsi possible d'évaluer la forme de la colonne d'arc tout en atténuant fortement la luminosité du plasma. Deux paramètres sont présentés ici : la hauteur d'arc  $H_{arc}$  et le diamètre de l'arc  $D_{arc}$  mesuré juste sous le fil-électrode, comme définis sur la Figure 3 sur laquelle la colonne d'arc présente la forme « conique » caractéristique du régime spray, conformément aux résultats de la Figure 1 pour  $I_{arc} = 380$  A. La Figure 4 présente l'évolution de ces deux paramètres en fonction de l'intensité pour les deux mélanges à 5% de gaz actif. D'autres données, intégrant des évaluations des dimensions de la zone fondue à l'extrémité du fil-électrode, ont été mesurées par Q.Castillon [12], mais sortent du cadre de l'étude proposée ici.

Globalement, on observe une augmentation simultanée de la hauteur et du diamètre de l'arc avec l'intensité indépendamment du type de gaz actif utilisé dans le gaz de protection. Cependant, la hauteur d'arc est sensiblement plus importante sous Ar-O<sub>2</sub> alors que la colonne est plus large pour des mélanges Ar-CO<sub>2</sub>. L'utilisation d'oxygène provoque donc un étirement de l'arc, l'augmentation de sa hauteur pouvant être attribuée à un échauffement de celui-ci. La constriction du diamètre de l'arc peut s'expliquer par une modification de sa conductivité électrique. En effet, des calculs fournis par A.B.Murphy [12] sur les propriétés thermodynamiques d'un plasma Ar-O<sub>2</sub>-1%Fe ou Ar-CO<sub>2</sub>-1%Fe, montrent que la conductivité thermique à 7500 K du plasma est plus élevée sous mélange O<sub>2</sub> que CO<sub>2</sub>.



**Figure 3** : Observation par imagerie rapide de la colonne d'arc pour 5% de gaz actif et  $I_{arc} = 380$  A ( $Q_{gaz} = 20$  l/min). A gauche : mélange Ar-CO<sub>2</sub> ; à droite : mélange Ar-O<sub>2</sub>



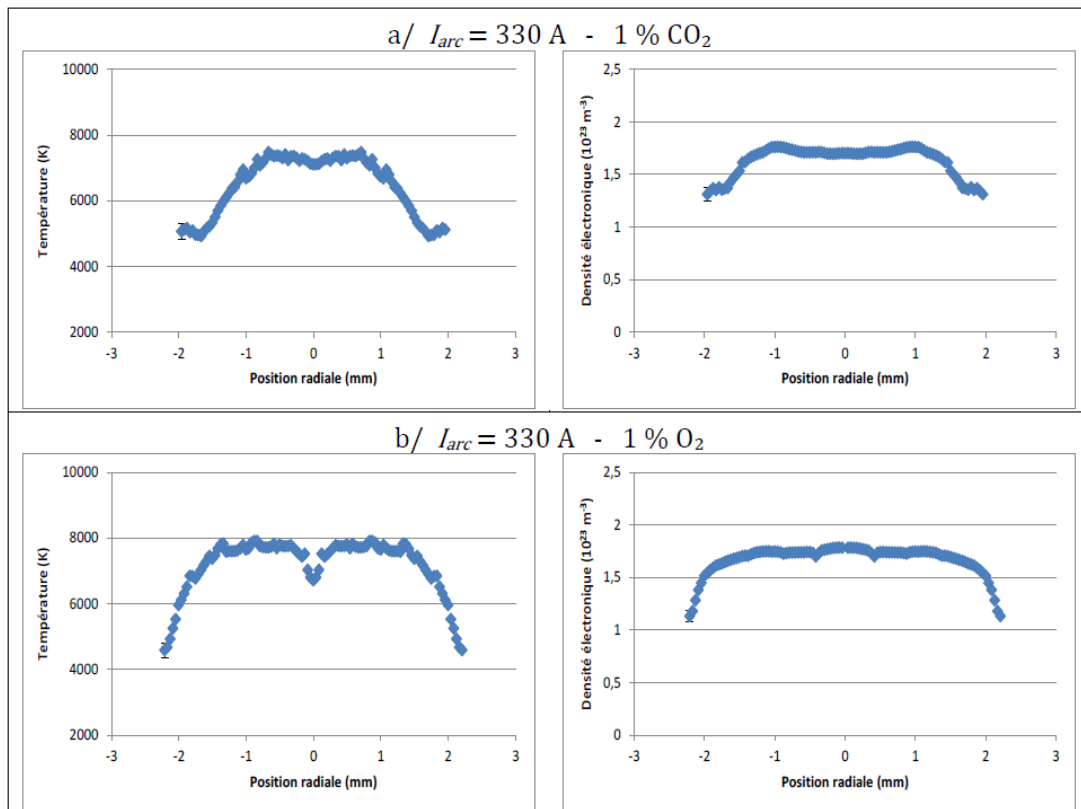
**Figure 4** : Evolution de la hauteur  $H_{arc}$  ( $\diamond, \blacklozenge$ ) et du diamètre  $D_{arc}$  ( $\circ, \bullet$ ) de l'arc en fonction de l'intensité pour 5% de gaz actif ( $Q_{gaz} = 20$  l/min). Ar-CO<sub>2</sub> symbole vides ; Ar-O<sub>2</sub> : symboles pleins

## 2.2 Analyse spectroscopique de la colonne d'arc

Les spectres d'émission du plasma suivant l'axe de la colonne d'arc font apparaître la prédominance des raies de Fe I caractéristiques d'un plasma présentant des vapeurs métalliques en proportions relativement importantes. Très peu de raies de Fe II sont visibles

dans le spectre : elles sont inexploitable compte tenu de leur faible rapport signal/bruit. Sauf quelques exceptions, les raies d'argon ou celles des autres composants du fil-électrode, sont masquées par le spectre très intense du fer. Enfin, aucune des raies potentiellement émises par les constituants du gaz actif sont décelables.

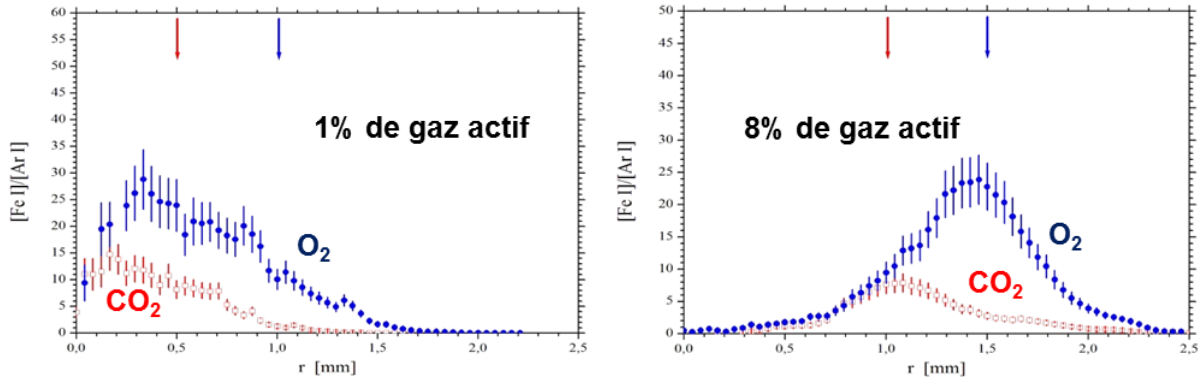
Les profils radiaux de température et de densité électronique obtenus à partir de la méthode de Sola décrite précédemment pour deux mélanges (Ar-CO<sub>2</sub> et Ar-O<sub>2</sub>) à 1% de gaz actif sont présentés sur la Figure 5. Globalement, la température électronique maximale obtenue pour ces deux mélanges est relativement similaire, 7500 K pour le mélange Ar-CO<sub>2</sub> et 7800 K pour Ar-O<sub>2</sub>. Il en est de même pour ce qui concerne les densités électroniques, qui sont, pour les deux mélanges, voisines de  $1,75 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ . Cependant, on observe des différences notables au niveau des profils radiaux avec une chute de température sur l'axe plus marqué pour les mélanges Ar-O<sub>2</sub> pouvant s'expliquer par un taux de vapeurs métalliques plus important et un refroidissement local du plasma lié au fort rayonnement de ces vapeurs métalliques. Pour valider cette hypothèse, une évaluation de la proportion en Fe I dans la phase plasma a été réalisée à partir de la mesure du rapport d'émissivité des raies Fe I / Ar I.



**Figure 5 :** Profil radiaux de température et densité électronique dans la colonne d'arc à une hauteur  $h_{arc} = 9 \text{ mm}$  de la cathode à  $I_{arc} = 330 \text{ A}$  et 1% de gaz actif.  $V_{fil} = 9 \text{ m/min}$ ,  $Q_{gaz} = 20 \text{ l/min}$ .

Des exemples de mesure pour les mélanges avec 1% et 8% de gaz actif sont représentés sur la Figure 6 : les rapports plus élevés obtenus dans le mélange Ar-O<sub>2</sub> sont le signe d'un enrichissement plus important en Fe I de la colonne d'arc sous oxygène à des proportions semblables pour les deux teneurs en gaz actif étudiées. On remarque aussi que l'enrichissement en vapeurs métalliques n'est pas maximal sur l'axe et que le maximum hors

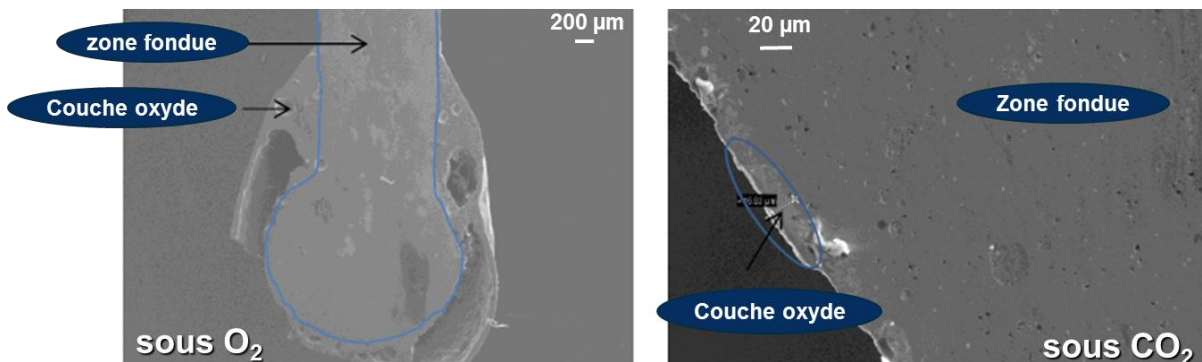
axe observé semble s'écartier avec l'augmentation du taux de gaz actif. Ceci s'explique par la dynamique du procédé avec le passage des gouttes au centre de la colonne d'arc.



**Figure 6 :** Estimation des proportions de Fe I dans l'arc à une hauteur  $h_{arc} = 9$  mm de la cathode à  $I_{arc} = 330$  A pour 1% (à gauche) et 8% (à droite) de gaz actif.

### 2.3 Analyse micro-structurale du fil électrode et de la goutte

Il avait été montré précédemment [3] que la répartition du régime globulaire et du régime spray en fonction du taux de gaz actif utilisé et du courant d'arc, était globalement similaire pour les deux gaz actifs, et caractérisée par un régime spray pour les hautes intensités et/ou des pourcentages de gaz actif faibles, et un régime globulaire pour des faibles courants d'arc et/ou de forts taux de gaz actif. Le gaz actif joue un rôle prépondérant dans la formation d'une gangue autour de la goutte de métal liquide à l'extrémité du fil-anode, son épaisseur augmentant avec le taux de gas actif. Des analyses complémentaires par MEB-EDX, dont un exemple d'image est présenté sur la Figure 7, mettent en évidence un fort enrichissement en oxygène de la gangue conduisant à la formation d'oxyde de fer. Cependant, la gangue est beaucoup plus volumineuse dans les mélanges Ar-O<sub>2</sub>, mais présente une structure plus poreuse et est d'aspect plus fragile. L'oxygène semble donc être l'élément majeur responsable de la formation de la gangue autour de la goutte provoquant le passage en régime globulaire, le régime spray ne pouvant être atteint qu'après destruction de cette couche d'oxyde de fer.

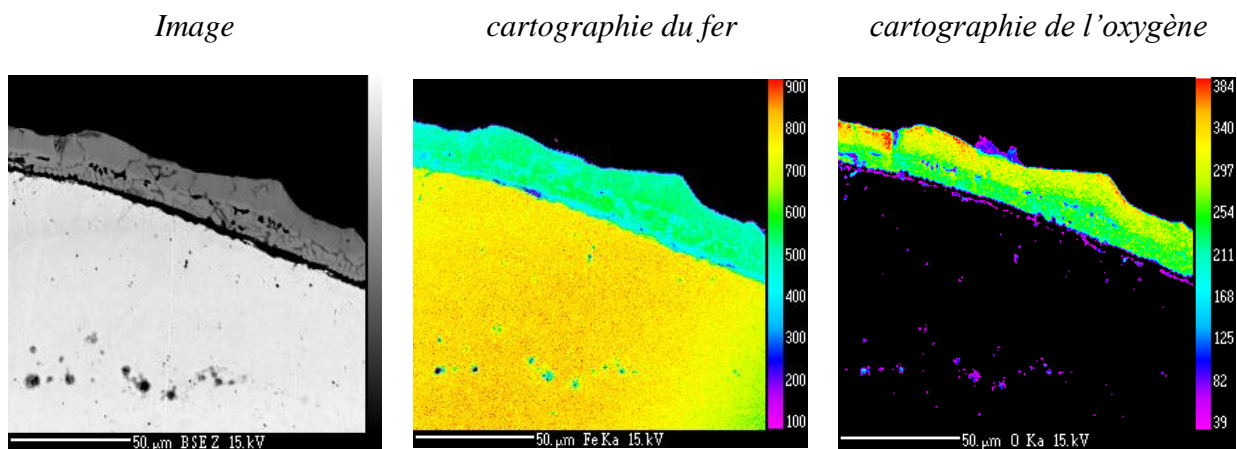


**Figure 7 :** Clichés MEB pour Comparaison de l'épaisseur de la gangue sous Ar-O<sub>2</sub> et Ar-CO<sub>2</sub> à 50% de gaz actif.  $I_{arc} = 280$  A ;  $V_{fil} = 7.4$  m/min ;  $Q_{gaz} = 20$  l/min.

Afin de comprendre pourquoi le régime spray est plus facile à atteindre sous oxygène malgré une gangue plus épaisse, des analyses complémentaires par sonde de Castaing ont été réalisées sur différents échantillons en régime globulaire afin de mettre en évidence une



possible différence de composition de la gangue selon le gaz actif utilisé. Des exemples de cartographies obtenues par sonde de Castaing sont présentés sur la Figure 8. Les résultats obtenus confirment tout d'abord le fort enrichissement en oxygène de la gangue quel que soit le gaz actif utilisé. Au niveau de la composition chimique de l'extrémité du fil fusible, l'élément carbone est pratiquement absent du fil fondu et de la gangue, même sous mélange Ar-CO<sub>2</sub>, mettant en évidence l'absence d'inclusions de carbone. Les éléments secondaires tels que Si, Mn ou Cu restent très minoritaires à l'extrémité du fil, bien que la proportion de Fe chute drastiquement dans la gangue (de l'ordre de 30% en unité de masse). Néanmoins, les mesures ne révèlent pas de modification de concentrations de ces éléments en fonction de l'intensité du courant d'arc et du taux de gaz actif dans le gaz de protection. La gangue est donc majoritairement formée d'oxyde de fer. Les analyses DRX et par  $\mu$ -sonde de Castaing ont permis d'en déduire la typologie de l'oxyde de fer formé. Deux oxydes de fer ont pu être clairement identifiés : la magnétique et l'hématite, de rapports O/Fe respectifs de 1,33 et 1,50.



**Figure 8** : Cartographie des éléments à la microsonde de Castaing sous mélange Ar-CO<sub>2</sub>.  
 $I_{arc} = 240$  A ; Ar + 30% CO<sub>2</sub> ;  $Q_{gaz} = 20$  l/min (Résultats en ppm).

Ainsi, l'ensemble des échantillons obtenus en régime globulaire sous mélange Ar-O<sub>2</sub> sont caractérisés par de la magnétite comme phase majoritaire, alors que les essais sous Ar-CO<sub>2</sub> montrent plutôt une majorité d'hématite. La magnétite étant meilleur conducteur électrique et thermique que l'hématite, celle-ci semble donc être un oxyde plus favorable au passage du courant électrique. Ceci pourrait ainsi expliquer la plus grande facilité à atteindre le régime spray dans les mélanges Ar-O<sub>2</sub>. L'ajout d'oxygène dans le gaz de protection semble donc être un bon moyen de privilégier un fonctionnement en mode spray.

## Conclusion

L'influence du type et de la proportion de gaz actif a été clairement identifiée tant du point de vue de l'analyse du plasma d'arc que sur les propriétés du fil électrode. Ainsi, l'utilisation d'oxygène dans le gaz actif favorise l'obtention du régime de pulvérisation axiale (spray). Ceci est corrélé à des modifications sur le plasma d'arc caractérisées par une constriction de la colonne de plasma et un allongement de sa hauteur, liées à une augmentation de la température. Il a également été montré que le plasma fonctionnant sous oxygène présente un taux de vapeur métallique plus élevé favorisant un refroidissement au centre de l'arc.

L'analyse de l'extrémité du fil électrode montre clairement des changements structurels et de composition de la gangue selon le gaz actif utilisé : une gangue plus fine constituée principalement d'hématite, de nature plus isolante, est observée pour les mélanges Ar-CO<sub>2</sub> ; alors que dans le cas des mélanges Ar-O<sub>2</sub>, une gangue plus épaisse, plus poreuse et constituée majoritairement de magnétite présentant une conductivité thermique et électrique plus élevées, est identifiée. Ces propriétés physiques de la magnétite permettraient un meilleur passage du courant électrique et donc favoriseraient l'obtention du régime de pulvérisation axiale (spray). L'utilisation d'oxygène dans le gaz de protection semble ainsi privilégier un fonctionnement stable du procédé MIG-MAG en allongeant la plage de fonctionnement du régime spray.

### Remerciements

Ces travaux ont été financés dans le cadre d'une bourse CIFRE avec le CTAS-Air Liquide Welding. Les auteurs tiennent également à remercier Dr A.B. Murphy du laboratoire CSIRO Materials Science and Engineering pour son aide dans le calcul des propriétés thermodynamiques de plasmas Ar/CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>/Fe.

### Références

- [1] A.T.Zimmer et al., (2001) *The influence of operating parameters on number-weighted aerosol size distribution generated from a gas metal arc welding process*, Aerosol Sc., 33, 519-531.  
DOI: 10.1016/S0021-8502(01)00189-6
- [2] D.Iordachescu et al., (2004) *Influence of shielding gases and process parameters on metal transfer and bead shape in MIG brazed joints of the thin zinc coated steel plates*, Mat. and Design, 27, 381-390.  
DOI 10.1016/j.matdes.2004.11.010
- [3] Q.Castillon et al., (2015) *Etude du changement de régimes en soudage MIG-MAG : cas des mélanges Ar-CO<sub>2</sub> et Ar-O<sub>2</sub>*. 12ème édition du Colloque sur les Arcs Eclectiques (CAE XII).
- [4] F.Valensi et al., (2010) *Plasma diagnostics in gas metal arc welding by optical emission spectroscopy*, J. Phys. D: Applied Physics, 43, 434002.  
DOI:10.1088/0022-3727/43/43/434002
- [5] F.Valensi et al., (2013) *Study of the spray to globular transition in gas metal arc welding: a spectroscopic investigation*, J. Phys. D: Applied Physics, 46, 224005.  
DOI:10.1088/0022-3727/46/22/224005
- [6] A.Sola et al., (1991) *Simultaneous determination of the electron density and temperature using Balmer lines Stark broadening in argon microwave-induced-plasmas (MIP) at atmospheric pressure*, 20th International Conference on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG XX), Book of Contributed Papers, 1147
- [7] S.Pellerin et al., (1996) *Stark width of the 696.5 nm argon I line*, J. Phys. B:At. Mol. and Opt. Phys., 29,3911-3924.  
DOI: 10.1088/0953-4075/29/17/014
- [8] S.Zielinska, K.Musioł, K.Dzierzega, S.Pellerin, F.Valensi, Ch.de Izarra and F.Briand (2007) *Investigations of GMAW plasma by optical emission spectroscopy*, Plasma Sources Sci.Technol., 16, 832-838.  
DOI: 10.1088/0963-0252/16/4/019

- [9] Base de données du NIST [https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines\\_form.html](https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html)
- [10] H.R.Griem, (1964) *Plasma Spectroscopy*, McGraw-Hill Book Compagny.
- [11] J.Halenka and J.Madej (2002) *Tables of the partition function for iron, Fe I – Fe X*, Acta Astromica, 52, 195-202.
- [12] Q.Castillon (2016) *Contribution à l'étude du soudage MIG-MAG sous mélanges Ar-CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> : Diagnostics physiques et physico-chimiques du milieu*, Thèse de doctorat, Université d'Orléans.