

Développement et étalonnage d'un pyromètre multispectral – Application au soudage MAG

Laurent DEJAEGHERE¹², Thomas PIERRE^{1*}, Mickaël COURTOIS¹, Muriel CARIN¹, Philippe LE MASSON¹

* auteur correspondant : thomas.pierre@univ-ubs.fr

¹ Univ. Bretagne Sud, FRE CNRS 3744, IRDL, F-56100 Lorient, France.

² IRT Jules Verne, Chemin du Chaffault, F-44340 Bouguenais.

Résumé – Dans l'objectif de mesurer des températures à la surface des bains métalliques formés lors du soudage, un dispositif de pyrométrie multispectrale à cinq longueurs d'onde a été développé. Ce pyromètre est dans un premier temps étalonné à l'aide d'un four chauffant par induction des échantillons de nickel puis de fer purs au-delà de leur point de fusion. Le pyromètre est ensuite installé sur un dispositif de soudage MAG et mesure les flux radiatifs au niveau du bain fondu. Ces travaux sont principalement basés sur la validation de l'étalonnage du pyromètre et présentent les premiers essais *in situ* en situation de soudage.

Nomenclature

Lettres latines

a_i	coefficient de polynôme
F_{12}	facteur de forme
h	longueur, m
H	fonction de transfert
J	fonctionnelle
M	émittance, $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$
r	longueur, m
s	surface d'émission, m^2
t	temps, s
T	température, $^{\circ}C$

Lettres grecques

$\delta\lambda$	bande spectrale, nm
-----------------	-----------------------

ε	émissivité
Φ	flux, nW
λ	longueur d'onde, nm
σ_λ	écart-type, nm

Indices et exposants

0	corps noir
exp	expérimental(e)
Fe	fer
i	numéro de chemin optique
liq	liquide
Ni	nickel
sol	solide
th	théorique

1. Introduction

L'amélioration des simulations numériques de soudage passe par la confrontation de ces simulations à des expériences, en particulier à des mesures de température quantitative au niveau du bain fondu, lesquelles sont encore à ce jour peu présentes. Dans cette optique, cette communication présente la mise au point d'un dispositif expérimental de soudage MAG sur des tôles d'acier et équipé d'un pyromètre multispectral. La description technique du pyromètre a déjà été présentée [1-2] (figure 1), mais rappelons néanmoins qu'il est composé de cinq longueurs d'onde (480 nm, 530 nm, 680 nm, 850 nm et 940 nm) et qu'il est capable de mesurer simultanément les cinq flux reçus par les détecteurs à une fréquence de 100 Hz. Dans nos précédentes configurations expérimentales, les expériences ont montré que le premier détecteur du pyromètre (940 nm) délivre un signal exploitable lorsqu'il vise une surface d'environ 800 $^{\circ}C$ et que tous les détecteurs fonctionnent pleinement à partir de 1 600 $^{\circ}C$ et au-delà. La saturation du pyromètre n'a jusqu'à présent jamais été atteinte.

2. Développement théorique

En situation de mesure, l'expression théorique du flux collecté par le détecteur i est de la forme :

$$\Phi_i^{th}(T) = sF_{12} \int_{\bar{\lambda}_i - 3\sigma_{\lambda_i}}^{\bar{\lambda}_i + 3\sigma_{\lambda_i}} \varepsilon(\lambda, T) M^0(\lambda, T) H_i(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

où s est la surface émettrice, $\varepsilon(\lambda, T)$ son émissivité (grandeur inconnue à évaluer), $M^0(\lambda, T)$ l'émittance spectrale définie par la loi de Planck (fonction de la température de surface inconnue), $3\sigma_{\lambda_i}$ la bande spectrale des filtres monochromatiques, F_{12} le facteur de forme entre la surface d'émission et celle du collimateur (2) et $H_i(\lambda)$ la fonction de transfert du chemin optique i du pyromètre (3).

$$F_{12} = \frac{1}{2} \left[X - \sqrt{X^2 - 4 \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2} \right] \quad \text{avec} \quad X = 1 + \frac{1 + R_2^2}{R_1^2} \quad (2)$$

La configuration expérimentale est telle que l'émetteur et le récepteur sont considérés comme deux disques parallèles, respectivement d'indices 1 (surface d'émission) et 2 (surface du collimateur) ; le facteur de forme est donc exprimé par (2) où $R_1 = r_1/h$ et $R_2 = r_2/h$ avec r le rayon de chaque disque et h la distance les séparant [3] (figure 3).

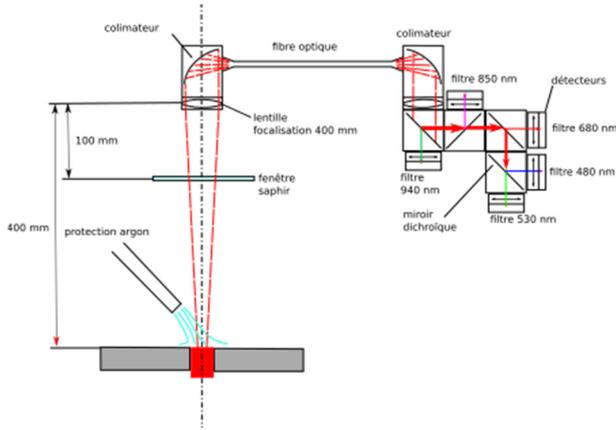


Figure 1 : pyromètre multispectral.

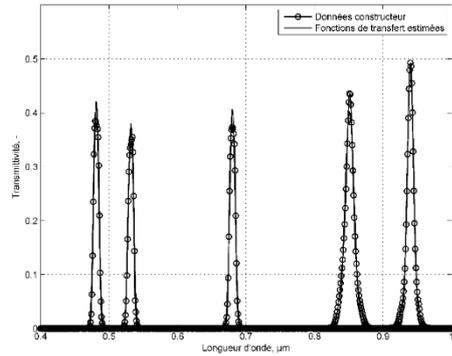


Figure 2 : fonctions de transfert de chaque chemin optique : données « constructeur » (o) et estimées (-).

La fonction spectrale de transfert $H_i(\lambda)$ est assimilée à une loi normale (3) où H_{M_i} est l'amplitude maximale, $\bar{\lambda}_i$ la longueur d'onde centrale et σ_{λ_i} l'écart-type.

$$H_i(\lambda) = H_{M_i} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\lambda - \bar{\lambda}_i}{\sigma_{\lambda_i}} \right)^2} \quad (3)$$

Le paramètre H_{M_i} ne peut pas être réduit au simple produit des transmittivités et réflectivités des éléments optiques fournis par le constructeur, elle prend également en compte d'autres facteurs, spectralement indépendants, qui réduisent le signal arrivant au détecteur. Elle est estimée par étalonnage (voir §3). Néanmoins les deux autres paramètres de l'équation (3), $\bar{\lambda}_i$ et σ_{λ_i} , sont supposés être uniquement fonctions de propriétés de filtres monochromatiques et ont été estimés par moindres-carrés à partir des données « constructeur ». Les résultats de ces estimations sont présentés sur la figure 2 et dans le tableau 1.

chemin optique	1	2	3	4	5
$\bar{\lambda}_i$ (nm)	481,35	531,87	680,22	851,39	940,00
σ_{λ_i} (nm)	3,55	3,85	4,09	6,41	4,92

Tableau 1 : estimation par moindres-carrés de la longueur d'onde centrale et de l'écart-type pour les cinq chemins optiques.

Finalement, l'estimation de paramètres (T, ε) s'effectue par minimisation de la somme des écarts quadratiques entre les flux théoriques Φ_i^{th} (1) et expérimentaux Φ_i^{exp} :

$$J = \sum_{i=1}^5 |\Phi_i^{th}(T, \varepsilon) - \Phi_i^{exp}|^2 \rightarrow 0 \quad (4)$$

La partie suivante présente l'étalonnage du pyromètre. Il a été réalisé à l'aide d'un dispositif expérimental permettant de réaliser la fusion de deux corps purs : le nickel et le fer, dont les températures de changement de phase et les émissivités sont *a priori* connues.

3. Étalonnage du pyromètre

3.1. Principe de l'expérience

L'objectif est d'étalonner le pyromètre sans instrumentation en thermocouple grâce à un échantillon de métal porté à très hautes températures par chauffage inductif. L'étalonnage se fait grâce à l'observation des plateaux de fusion et de solidification du nickel et du fer.

Comme le présente la figure 3, les échantillons sont placés dans un creuset en nitrure de bore et le pyromètre à l'aplomb supérieur de ce dernier dans la même configuration qu'avec le dispositif de soudage (voir § 4). Une lame séparatrice divise le flux radiatif : la part transmise est captée par le pyromètre et celle réfléchiée par une caméra vidéo. L'ajout de la caméra vidéo est nécessaire car elle permet de confronter les phénomènes physiques vus avec l'analyse des résultats en termes de flux. Enfin, de l'argon est soufflé sur l'échantillon pour limiter les phénomènes d'oxydation.

Pour le calcul de F_{12} et de s dans les équations (1) et (2), les paramètres, $r_1 = (2,6 \pm 0,1)$ mm, $r_2 = (11 \pm 0,1)$ mm et $h = (400 \pm 1)$ mm, sont mesurés. Ainsi, il est possible de définir la surface d'émission, $s = (21,3 \pm 1,6)$ mm² et $F_{12} = 7,6 \cdot 10^{-4} \pm 0,6 \cdot 10^{-4}$.

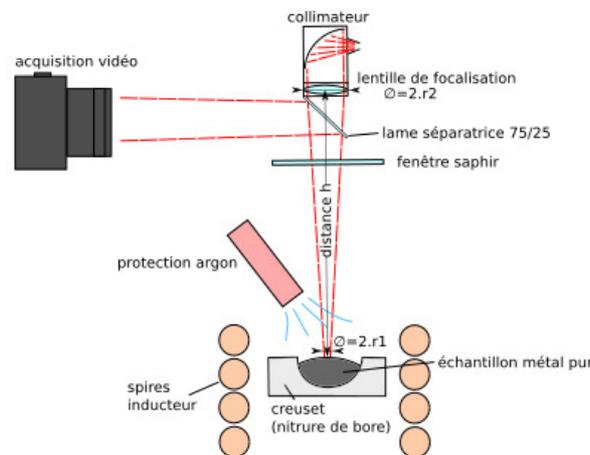


Figure 3 : dispositif expérimental pour l'étalonnage du pyromètre.

À ce stade, les inconnues des équations (1) et (4) sont la température, l'émissivité et les paramètres H_{M_i} . Le choix de travailler sur des températures de changement de phase (liquide-solide) permet d'une part de fixer la température et d'autre part de définir l'émissivité. En effet,

théoriquement, le nickel et le fer purs ont respectivement une température de fusion de 1 455 °C (1 728 K) et 1 537 °C (1 810 K) [4]. De plus, la littérature donne pour le nickel et le fer des valeurs d'émissivités normales spectrales autour du point de fusion [5]. Ainsi, deux polynômes (5-6) d'ordre 2 ont été ajustés pour les émissivités du nickel et du fer. Les coefficients de ces polynômes sont indiqués dans le tableau 2 :

$$\varepsilon_{Ni}^{sol}(\lambda) = \sum_{i=0}^2 a_i \lambda^i \quad \text{et} \quad \varepsilon_{Ni}^{liq} = \varepsilon_{Ni}^{sol} + 0,03 \quad (5)$$

$$\varepsilon_{Fe}^{sol}(\lambda) = \sum_{i=0}^2 a_i \lambda^i \quad \text{et} \quad \varepsilon_{Fe}^{liq} = \varepsilon_{Fe}^{sol} + 0,027 \quad (6)$$

Ayant défini les choix expérimentaux et donc fixé la température et l'émissivité, il reste, à travers les expériences, à estimer les paramètres H_{M_i} .

	a_0	a_1	a_2
équation (5) nickel	0,607 3	-0,385 1	0,094 1
équation (6) fer	0,558 4	-0,296 9	0,080 7

Tableau 2 : coefficients des polynômes des émissivités du nickel et du fer purs en phase liquide autour du point de fusion.

3.2 Exploitation des expériences

Les premiers essais ont été effectués avec un échantillon de nickel. La figure 4 présente un exemple d'évolution des cinq flux radiatifs au cours du temps lors d'une montée en température au-delà du point de fusion (étude du chauffage et du refroidissement du nickel). Initialement à l'état solide, les flux relevés augmentent de façon ininterrompue jusqu'à $t = 15$ s puis un plateau est observé. En parallèle, l'observation des films montre bien que l'échantillon commence à fondre vers 15 s, en commençant par la base inférieure. Tant que les deux phases solide et liquide coexistent, les signaux restent stables, preuve de la présence du plateau de fusion (l'échantillon est supposé thermiquement mince avec une température homogène dans son volume).

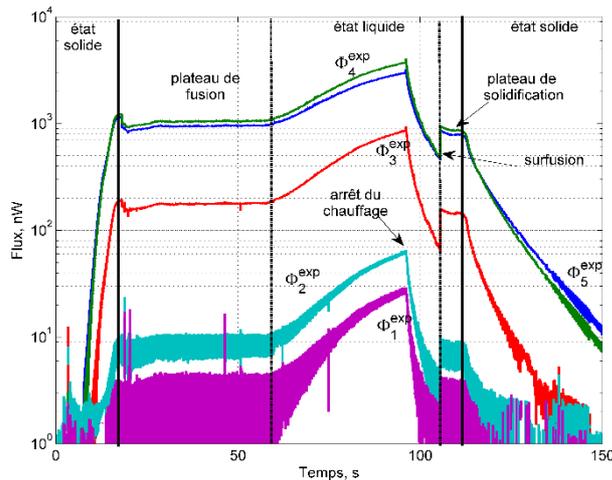


Figure 4 : flux radiatifs reçus par le pyromètre lors du chauffage inductif de nickel pur.

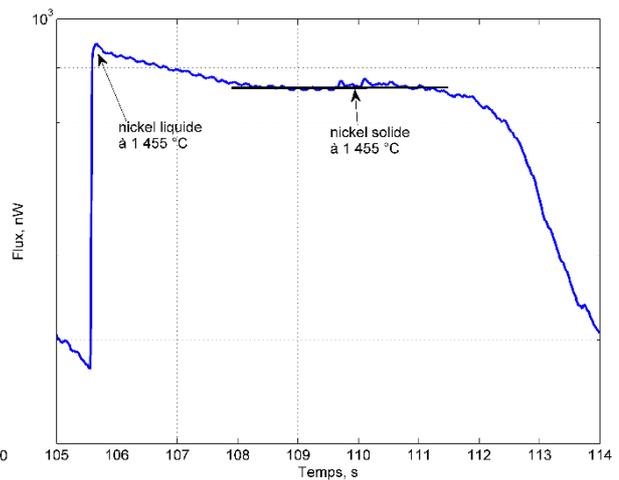


Figure 5 : agrandissement du palier de solidification pour le flux Φ_5^{exp} .

Une fois complètement fondu ($t = 57$ s), le nickel se décolle des parois et prend une forme ovoïdale (phénomène lié aux forces électromagnétiques principalement); les flux augmentent à

nouveau jusqu'à l'arrêt brusque du chauffage ($t = 93$ s). Lorsque l'induction est arrêtée, le métal reprend une forme plane en surface. Entre $t = 105$ s et $t = 106$ s, nous notons une surfusion avant d'atteindre le plateau de solidification. Le flux Φ_5^{exp} a quasiment doublé de valeur (de 455 nW à 830 nW) comme le montre la figure 5. C'est sur ce plateau que l'étalonnage est réalisé à l'aide de la relation (4) : dans cette expression, la température T est celle de fusion du nickel et l'émissivité ε est l'émissivité à l'état liquide (5). L'estimation des coefficients H_{M_i} est réalisée par moindres-carrés et les résultats sont regroupés dans le tableau 3.

La première observation est que l'incertitude sur l'estimation de l'amplitude H_{M_i} est faible pour les chemins optiques 3, 4 et 5, et que celle des chemins optiques 1 et 2 est plus importante en raison du bruit de mesure (ratio signal/bruit). À partir des amplitudes estimées pour les chemins optiques 3, 4 et 5, les tracés de la température au cours du temps (figure 6) montrent trois courbes confondues du début à la fin de l'expérience, ce qui laisse penser que l'étalonnage du pyromètre est très satisfaisant pour ces trois chemins optiques. Le calcul de la température permet d'estimer un saut de température d'environ 100 °C lors de la surfusion, cette valeur est cohérente car inférieure à la celle maximale théorique de 490 °C pour le nickel pur [6].

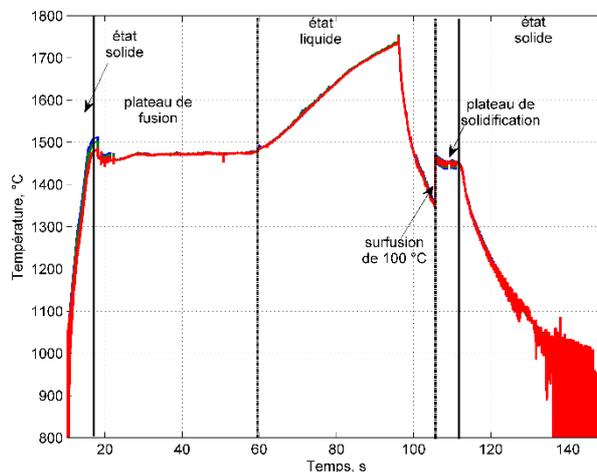


Figure 6 : températures au cours du temps calculées à partir des amplitudes estimées pour les trois chemins optiques 3, 4 et 5.

Les températures concernant les deux autres chemins optiques n'ont pas été tracées, car excessivement bruitées. Visiblement l'utilisation du nickel ne permet pas d'étalonner complètement le pyromètre ; le fer, qui a une température de fusion plus élevée, permet de pallier à ce problème.

La figure 7 présente un exemple de flux radiatifs mesurés lors du chauffage inductif d'un échantillon de fer. Le palier de fusion est atteint à $t = 14$ s et s'achève à $t = 24$ s. Visiblement, sous forme liquide, le fer émet moins. La vidéo montre de l'oxydation en surface, ce n'est donc pas un corps pur et l'expression de l'émissivité (6) n'est plus valable ; c'est celle de l'oxyde de fer qui est privilégiée à présent. Par contre, sous forme liquide, la couche d'oxyde disparaît de la zone de focalisation et c'est bien du fer pur qui est visé cette fois-ci. À l'arrêt du chauffage, c'est le palier de solidification (entre $t = 47$ s et $t = 51$ s), l'oxyde revient instantanément à la surface et provoque une hausse des flux enregistrés.

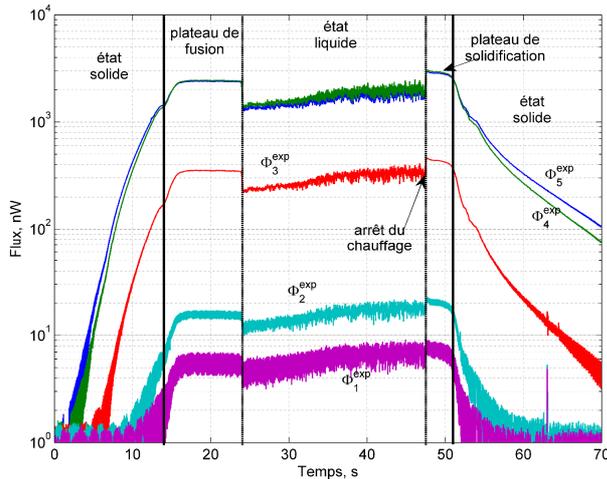


Figure 7 : flux radiatifs mesurés en fonction du temps pour un échantillon de fer.

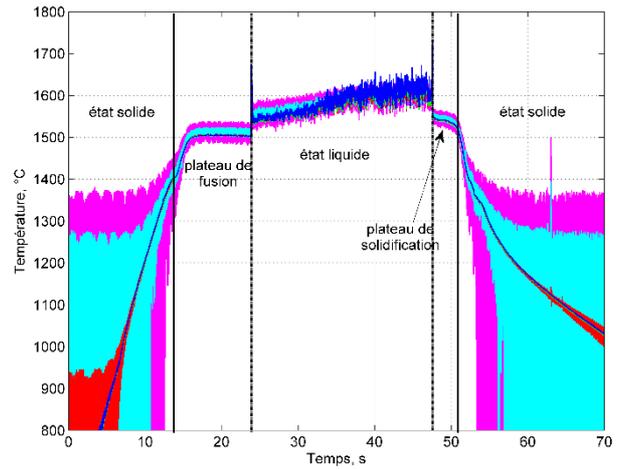


Figure 8 : températures calculées pour tous les chemins optiques à partir des amplitudes estimées.

chemin optique	nickel liquide	fer liquide	moyenne
1	0,230	0,245	0,238 ± 0,007
2	0,217	0,206	0,212 ± 0,006
3	0,636	0,569	0,603 ± 0,004
4	0,669	0,653	0,661 ± 0,008
5	0,589	0,599	0,594 ± 0,005

Tableau 3 : amplitudes H_{M_i} estimées pour les étalonnages à partir du nickel et du fer.

La fonction de transfert ayant été estimée de façon satisfaisante avec le nickel pour les chemins optiques 3, 4 et 5, ces valeurs ont été utilisées pour estimer l'émissivité du fer oxydé à l'aide des paliers de changement de phase : une valeur identique de 0,7 est obtenue, du même ordre de grandeur que celles de la littérature [7]. Cette valeur a été retenue et les amplitudes H_{M_i} ont été estimées à moins de 6 % par rapport aux essais précédents ; les résultats sont regroupés dans le tableau 3. Notons que certaines valeurs de H_{M_i} semblent supérieures à celles dites constructeur, comme cela peut s'observer sur la figure 2. Cette observation souligne l'importance de l'étalonnage ainsi que la nécessité de maîtriser chaque élément du dispositif expérimental : en effet, il a été observé que la totalité du flux radiatif pour chaque chemin optique n'était pas intercepté par les détecteurs.

Finalement, les températures ont été calculées pour l'ensemble des chemins optiques au cours du temps (figure 8) en considérant les variations d'émissivité avec et sans oxydation. Pour les chemins 3, 4 et 5, la température est estimée à moins de 1 % quand le fer est solide. Quand le fer est liquide, les températures sont bruitées pour les cinq chemins optiques, mais ce bruit n'excède pas 5 %. Cependant, il apparaît clairement que la température de fusion du fer n'est encore pas assez élevée pour H_{M_1} et H_{M_2} . L'étalonnage devra donc être complété. L'utilisation d'un matériau avec une température de changement de phase solide-liquide à plus haute température est envisagée (chrome, 1 907 °C ; titane, 1 668 °C).

Partiellement étalonné mais avec une confiance satisfaisante (mais qui reste à estimer précisément), le pyromètre est utilisé pour effectuer des mesures radiatives *in situ* du bain fondu lors d'une opération de soudage MAG.

4. Mesures sur dispositif de soudage MAG

4.1. Présentation du dispositif et de l'expérience

Le soudage MAG est un des procédés les plus couramment utilisés dans l'industrie. L'apport de matière est réalisé par l'électrode, celle-ci est constituée d'un fil métallique fusible dévidé de façon continue et automatique au cours du soudage, dont la nature du matériau correspond généralement au métal à souder. La protection gazeuse du bain de fusion est active et d'appellation Metal Active Gas (MAG).

Le dispositif de soudage a été élaboré sur les bases d'une installation de découpage de pièces. En dehors des précautions liées à la sécurité, la procédure de soudage est automatisée avec la possibilité de modifier la vitesse de déplacement du couple torche/pyromètre. La torche et le pyromètre sont fixés sur le même support mais la torche est à 60° d'inclinaison pour ne pas perturber la visée pyrométrique. Les deux principaux paramètres de réglage pour le bon fonctionnement du soudage sont la vitesse du fil d'apport et celle de déplacement, il y a un compromis à déterminer pour que la torche ne perce pas la tôle testée. Suite à un plan d'expérience (non-présenté ici), la vitesse de la torche a été réglée à $6 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ et la vitesse du fil à $13 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Le gaz de protection est constitué d'un mélange de 82 % d'argon et 18 % de CO_2 . Le cordon de soudure est réalisé sur une pièce massive en acier S235.

4.2. Mesures et analyses

L'exemple présenté est la mesure effectuée avec la torche mobile, la tôle et le pyromètre fixes (figure 9). À environ $t = 2 \text{ s}$, les cinq flux radiatifs augmentent significativement à l'allumage de la torche MAG. Cependant, les voies 3, 4 et 5 présentent un palier pendant 1 s, alors que les signaux des voies 1 et 2 augmentent régulièrement. À $t = 5,5 \text{ s}$, la torche passe sous le pyromètre : les signaux sont maximaux et fortement influencés par le rayonnement de la torche. Entre $t = 7 \text{ s}$ et $t = 8,5 \text{ s}$, les voies 3, 4 et 5 montrent à nouveau un palier, alors que les signaux des voies 1 et 2 chutent régulièrement sans marquer de palier. Comme lors de la phase ascendante, l'absence de visualisation du palier peut être due à la réflexion par la tôle du rayonnement émis par la torche, et dont les plus courtes longueurs d'onde du pyromètre y sont spécifiquement sensibles, recouvrant l'émission propre de la tôle lors de la solidification.

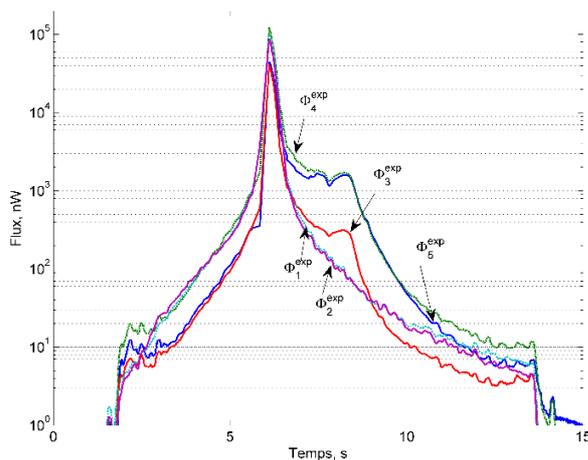


Figure 9 : flux radiatifs expérimentaux.

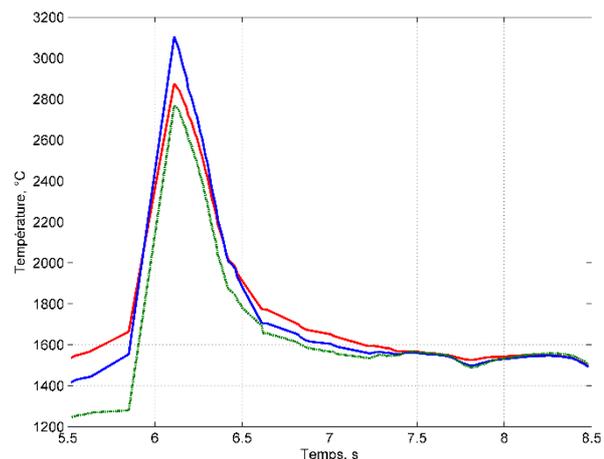


Figure 10 : températures calculées pour les chemins optiques 3, 4 et 5.

Une première estimation de la température *in situ* a été effectuée pour les trois voies 3, 4 et 5 lors du palier de refroidissement et légèrement extrapolée là où l'acier est à l'état liquide. En première approximation, l'émissivité a été choisie comme étant celle de l'équation (6) [5] ; valeurs cohérentes avec celles de la littérature [8]. La figure 10 trace, pour les voies 3, 4 et 5

qui ne sont pas perturbées par la torche, l'estimation des températures pendant tout le temps durant lequel l'acier est liquide. Les trois estimations présentent une dispersion de la température estimée d'environ 13 % quand la torche est au niveau du pyromètre et inférieure à 3 % sur toute la durée du palier observée à l'arrière du bain. Les niveaux de températures estimées à la surface du bain fondu sont cohérents avec les mesures effectuées par [8]. À noter, cependant, que le pic de température lié à la présence de l'arc est à analyser avec précaution du fait des interférences avec celui-ci. Des mesures en mode court-circuit peuvent être envisagées pour limiter ces interférences.

5. Conclusions

Cette communication a présenté l'étalonnage d'un pyromètre à cinq couleurs dédié à la mesure de la température et de l'émissivité, ainsi qu'une application lors d'un soudage MAG avec une mesure radiative *in situ* au-dessus du bain de fusion d'un acier. Cet étalonnage a été réalisé à partir de mesures de flux lors de la solidification de métaux purs (nickel et fer) afin de ne pas fausser la mesure par de l'instrumentation intrusive. Si l'étalonnage s'est avéré satisfaisant dans l'ensemble, il sera néanmoins nécessaire de le confirmer (avec son incertitude de mesure) à l'aide d'autres corps purs présentant une température de changement de phase plus élevée, afin de diminuer fortement le rapport signal sur bruit. L'application était basée sur une mesure de flux radiatifs pendant une opération de soudage MAG sur un échantillon d'acier. Ces premiers essais *in situ* ont permis d'estimer des températures à la surface du bain liquide cohérentes avec les données de la littérature.

Pour l'étalonnage du pyromètre, les estimations de température ont pour le moment été monospectrales en s'aidant d'hypothèses fortes sur l'émissivité, la littérature en référant d'importantes variations possibles [7]. Pour pallier à ce problème, l'objectif par la suite est de réaliser l'estimation simultanée de la température et de l'émissivité par des techniques d'estimation de paramètre de type gradient conjugué.

Remerciements

Les auteurs remercient le FEDER, l'IRT Jules Verne (projet MAPEPAS) ainsi que la région Bretagne pour le financement de ces travaux.

Références

- [1] L. Dejaeghere, T. Pierre, M. Carin, P. Le Masson, *Influence de l'atmosphère environnante pour des mesures de hautes températures par voie radiative*, Actes du congrès de thermique SFT, La Rochelle, 26 – 29 mai 2015.
- [2] L. Dejaeghere, T. Pierre, M. Carin, P. Le Masson, *Développement d'un banc expérimental dédié à la caractérisation de propriétés thermophysiques de métaux à hautes températures – Validation de la mesure de température par méthode multispectrale*, Actes du congrès de thermique SFT, Lyon, 3 – 6 juin 2014.
- [3] R. Siegel, J. R. Howell, *Thermal radiation heat transfer*. Taylor & Francis, 2002.
- [4] F. P. Incropera, *Introduction to Heat Transfer*. John Wiley & Sons, 2011.
- [5] H. Watanabe, M. Susa, H. Fukuyama, K. Nagata, *Phase (Liquid/Solid) Dependence of the Normal Spectral Emissivity for Iron, Cobalt, and Nickel at Melting Points*, International Journal of Thermophysics, Vol. 24, No. 2, March 2003.
- [6] A. I. Belyaev, *Surface phenomena in metallurgical processes*, Consultants bureau, New-York, 1965, p. 48.
- [7] Y.S. Touloukian, *Thermal radiative properties*, Plenum, New York, 1970.
- [8] R. Kozakov, H. Schöpp, G. Gött, A. Sperl, G. Wilhelm, D. Uhrlandt, *Weld pool temperatures of steel S235 while applying a controlled short-circuit gas metal arc welding process and various shielding gases*, J. Phys. D: Appl. Phys. 46, 2013, 475501.