

Mesure de Champs de Températures dans des Flammes par Imagerie-Spectroscopique InfraRouge

Temperature Field Measurements in Flames based on Infrared Spectroscopic Imaging

Abderezak AOUALI¹, Stephane CHEVALIER², Alain SOMMIER¹, Jean-Christophe BATSALE², Christophe PRADERE¹

¹I2M TREFLE, UMR 5295 CNRS-UB-ENSAM, Esplanade des Arts et Metiers, 33405 Talence Cedex, France

²Arts et Métiers Sciences et Technologies, Université de Bordeaux, CNRS, INRA, INP, I2M, HESAM Université, F-33400 Talence, France

Résumé - La torche à plasma est un type de source qui génère de très hautes températures et flux, qui nécessite d'être caractérisée en vue de leur optimisation énergétique. La mesure de ces hautes températures implique l'utilisation de méthodes non intrusives. Une méthode basée sur la spectroscopie IR permettant la mesure simultanée de l'émissivité et de la température est présentée dans ce travail. Elle est en premier lieu validée à l'échelle du laboratoire sur des flammes générées par des brûleurs et sera par la suite transposée sur les torches à plasma à l'échelle industrielle.

Mots-clés : Spectroscopie infrarouge ; Haute température ; Mesure d'émissivité ; Mesure de température de flamme ;

Abstract - Plasma torches are a type of sources that generate very high temperatures and flux. The knowledge of their temperature field is of prime interest for researchers and industry to model and optimize the torch design. For that, radiometric techniques provide an adequate means to measure contactless temperature. In this work, a method based on infrared spectroscopy to simultaneous measure emissivity and temperature was developed and validated at the laboratory scale using burner flames. It will subsequently be transposed onto plasma torches at the industrial scale.

Keywords: Infrared spectrscopy; High temperature; Emissivity measurement; Flame temperature measurement;

Nomenclature

λ	Longueur d'onde, m	<i>Symboles grecs</i>	
L, l^0	Luminance, $W.m^{-2}.sr^{-1}$	α	Absorptivité
T	Température, K	τ	Transmissivité
IR	InfraRouge	ρ	Refléctivité
CN	Corps Noir	ϵ	Emissivité
TI	Temps d'intégration	σ	constante de Stefan-Boltzmann, $W.m^{-2}.K^{-4}$

3. Introduction

Ces travaux de recherche s'inscrivent dans le cadre d'un projet qui vise à caractériser thermiquement et chimiquement des torches à plasma. L'enjeu principal est la mesure de champ 3D de température sans contact en vue de l'optimisation énergétique de ces torches.

La torche à plasma est un type de source qui génère de très hautes températures et flux et qui est essentiellement utilisée dans des applications de traitement de surface et du traitement ultime des déchets. Afin de réduire le coût énergétique de cette technologie, plusieurs industriels cherchent à optimiser le design des torches [1]. Leur optimisation nécessite - entre autre - la connaissance de sa température en tout point. Néanmoins, la mesure des hautes températures est difficilement accessible et nécessite généralement l'utilisation de techniques non-intrusives (sans contact) [2]. Par conséquent, les techniques radiométriques fournissent un moyen adéquat pour remédier à ce problème.

Les caméras IR mesurent des luminances qui résultent essentiellement du produit de l'émissivité du corps par sa température. Il est donc nécessaire de déterminer l'émissivité d'un corps afin d'accéder à sa température réelle [3]. Des mesures d'émissivité de flammes ont déjà été réalisées par Jir-Ming Char et al. [4] où il a été démontré que les flammes sont peu émissives. Dans le cadre d'une flamme bleue de brûleur dont la température atteint 1600°C , les auteurs ont mesuré des émissivités allant de 0,08 à 0,1. De plus il a été montré que l'émissivité varie spatialement.

Une méthode permettant de mesurer les hautes températures est présentée dans cet article, en s'appuyant sur la spectroscopie infraRouge (IR). Cette méthode est appliquée et validée à l'échelle du laboratoire sur des flammes générées par des brûleurs et sera par la suite transposée sur des torches à plasma. Elle nous permettra de remonter à l'émissivité de la flamme à l'aide de sa luminance mesurée par une caméra infraRouge afin d'accéder à sa vraie température.

4. Matériel et méthodes

4.1. Dispositif expérimental

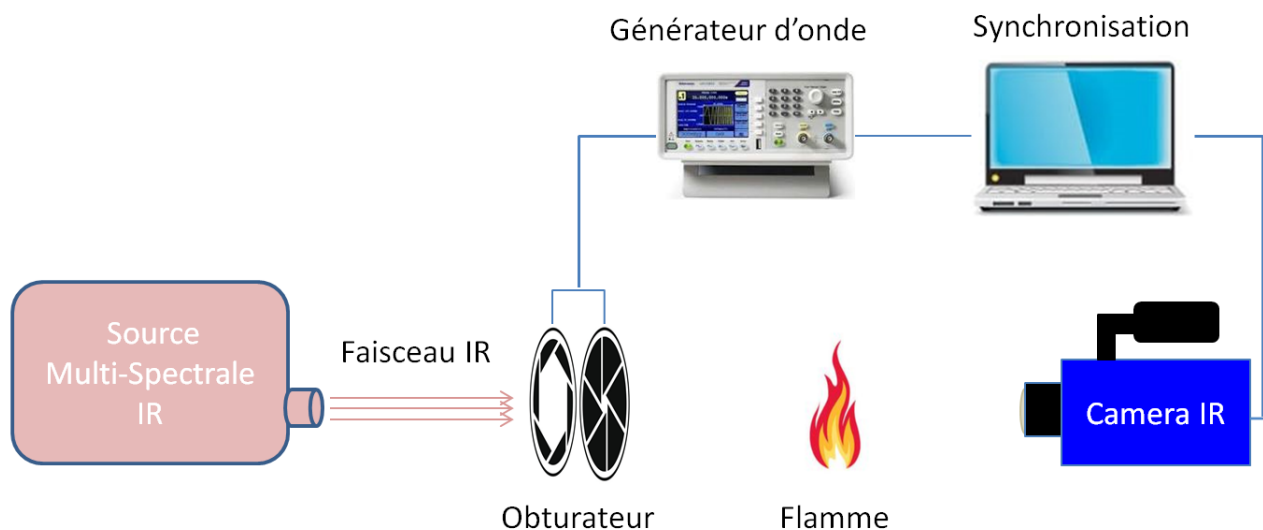


Figure 3: Description du montage expérimental

Le montage expérimental est décrit dans la figure 1. Une source infrarouge étendue, assimilable à un corps noir de 1450 K , délivre un faisceau infrarouge dans une large gamme [$1\ \mu\text{m} - 20\ \mu\text{m}$]. Le faisceau IR est collimaté et agrandi grâce à des optiques, et vient éclairer

un obturateur piloté par LabVIEW à l'aide d'un générateur d'onde. Le tout est synchronisé avec une caméra IR. La caméra utilisée est de type lointain infrarouge dans la gamme spectrale [7 μm – 11 μm]. L'intérêt de travailler dans cette gamme spectrale est d'éviter les effets de saturation à hautes températures qui peut s'expliquer par la loi de Planck. La caméra IR est utilisée avec une haute fréquences d'acquisitions de 125 Hz afin de pallier aux éventuelles fluctuations de la flamme due à des effets de turbulence qui naturellement les rendent instables [7]. La flamme dont on souhaite mesurer la température réelle est placée entre l'obturateur et la caméra IR. Dans notre étude, un bruleur qui délivre des flammes de températures comprises entre [700 K – 1600 K] est utilisé. L'idée est de faire un créneau par l'obturateur où il reste ouvert au front montant, et se referme complètement au front descendant, cette démarche nous permet d'obtenir un film où, au front montant, des images de l'émission thermique de la flamme et du faisceau IR sont acquises, et au front descendant, des images de l'émission thermique de la flamme seule sont acquises.

4.2. Méthode de mesure

La caméra infrarouge mesure des radiations qui sont proportionnelles à la luminance émise par un corps, cette luminance est reliée à la température et à l'émissivité de ce corps par la loi de Stefan-Boltzmann :

$$L = \frac{\epsilon\sigma T^4}{\pi} . \quad (2)$$

L'émissivité d'un corps se définit comme le rapport de sa luminance par celle du corps noir pris dans les mêmes conditions de température et pour les mêmes longueurs d'onde. Afin d'accéder à cette grandeur, deux hypothèses sont utilisées. La première, la flamme est considérée comme étant un corps semi-transparent [5], la conservation globale de l'énergie radiative dans les milieux semi-transparentes d'après la loi de Kirchhoff peut s'exprimer comme suit :

$$\tau + \alpha = 1 \quad \text{avec} \quad \rho = 0, \quad (3)$$

où :

$$\begin{aligned} \text{Réflectivité} : \rho &= \frac{\text{énergie réfléchie}}{\text{énergie reçue}} = \frac{\phi_r}{\phi_i}, \\ \text{Absorptivité} : \alpha &= \frac{\text{énergie absorbée}}{\text{énergie reçue}} = \frac{\phi_a}{\phi_i}, \\ \text{Transmissivité} : \tau &= \frac{\text{énergie transmise}}{\text{énergie reçue}} = \frac{\phi_t}{\phi_i}. \end{aligned}$$

La deuxième hypothèse est basée aussi sur la loi de Kirchhoff qui stipule qu'à l'équilibre thermique on a : $\alpha(\lambda) = \epsilon(\lambda)$. Cette hypothèse est applicable dans les flammes car l'équilibre thermique est considéré toujours atteint [6]. Afin d'accéder à l'empreinte spectroscopique de la flamme (énergie transmise), et de ce fait en déduire la Transmissivité (τ) de la flamme, une acquisition de trois images différentes est nécessaire : source IR de référence, source IR après sa traversée de la flamme et la flamme seule,.

Ces images sont dans le cas d'une source monochromatique :

Y_1 proportionnel à : $l_{(\lambda, T_L)}^0$ "source IR seule".

Y_2 proportionnel à : $l_{(\lambda, T_F)} + (1 - \alpha(\lambda))l_{(\lambda, T_L)}^0$ "source IR + émission propre de la flamme".

Y_3 proportionnel à : $l_{(\lambda, T_F)}$ "émission propre de la flamme seule".

Rappelons que :

T_L est la température du faisceau IR.

T_F est la température de la flamme.

les signaux Y permettent de calculer la transmissivité :

$$\tau(\lambda) = \frac{Y_2 - Y_3}{Y_1} = \frac{l_{(\lambda, T_F)} + (1 - \alpha(\lambda))l_{(\lambda, T_L)}^0 - l_{(\lambda, T_F)}}{l_{(\lambda, T_L)}^0} = 1 - \alpha(\lambda), \quad (4)$$

d'autre part, à l'équilibre thermique $\alpha_\lambda = \epsilon_\lambda$, ce qui permet d'écrire :

$$\tau(\lambda) = 1 - \epsilon(\lambda) \quad \text{donc} \quad \epsilon(\lambda) = 1 - \tau(\lambda). \quad (5)$$

l'équation (4) nous permet de remonter à l'émissivité hémisphérique totale dans la gamme spectrale de la caméra IR [7 μm – 11 μm], elle définie comme suit :

$$\epsilon(T) = \frac{\int_{\lambda_1=7 \mu\text{m}}^{\lambda_2=11 \mu\text{m}} \epsilon(\lambda) d\phi_\lambda}{\int_{\lambda_1=7 \mu\text{m}}^{\lambda_2=11 \mu\text{m}} d\phi_\lambda} = \frac{l(T)}{l_{CN}^0(T)}. \quad (6)$$

4.3. Calibration de la caméra

La première étape préalable à toute mesure de température absolue, est de calibrer la caméra IR. Celle-ci nous fournit des images en DL (digital level) qui est une unité propre au constructeur et qui est différente de la luminance dont l'unité est le ($W.m^{-2}.sr^{-1}$). La calibration de la caméra s'effectue à l'aide d'un corps noir (CN) de chez "Prisma instruments" et dont l'émissivité est estimée avec une incertitude de 0.5% à $\epsilon_{CN} = 0.98$, la température du corps noir est réglable dans la gamme [773 K; 1473 K]. Chaque calibration est effectuée pour un temps d'intégration spécifique, pris dans notre cas à $TI = 20\mu\text{s}$. La fonction "f" est identifiée par régression linéaire, cette fonction est un polynôme d'ordre trois de sorte que :

$$T_{CN} = \epsilon_{CN} \cdot f(DL(T_{CN})). \quad (7)$$

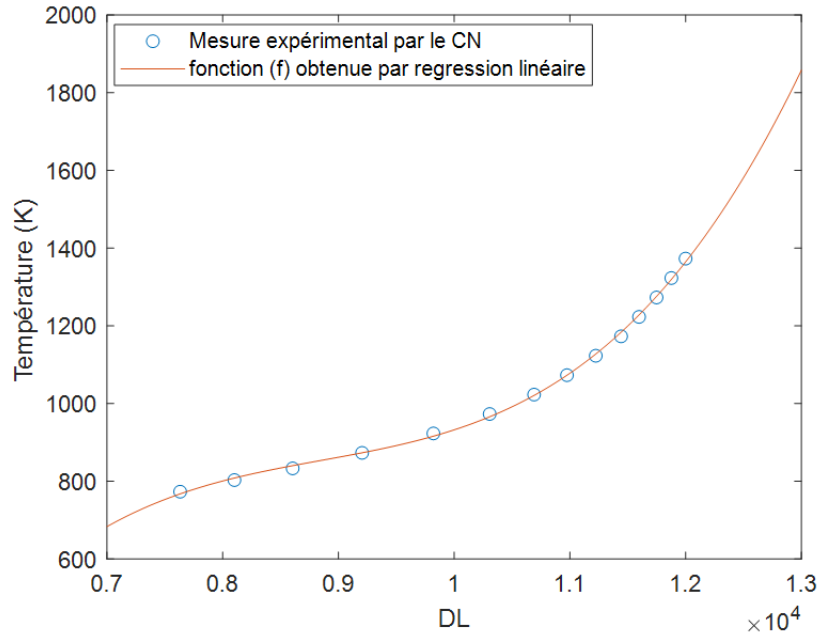


Figure 4: Calibration de la caméra IR par le CN à $TI = 20 \mu s$

Une fois la fonction (f) identifiée, la température peut se déduire comme suit :

$$DL_{i,j}^{\text{mesurés}} = \epsilon_{i,j}^{\text{flamme}} \cdot \frac{DL_{i,j}^{\text{flamme}}}{\epsilon_{i,j}^{\text{CN}}} \implies DL_{i,j}^{\text{flamme}} = \frac{\epsilon_{i,j}^{\text{CN}} \cdot DL_{i,j}^{\text{mesurés}}}{\epsilon_{i,j}^{\text{flamme}}} \quad (8)$$

Une fois que les "DL" exactes de la flamme sont obtenus, la température de la flamme est déduite grâce à l'équation (6). On en déduit de ce fait que le corps noir nous permet de calibrer la caméra IR pour des mesures de températures comprises entre 770 K et 1370 K.

5. Résultats et discussions

5.1. Mesure de l'émissivité de la flamme

La Figure 3(a) montre l'image de la source IR pour un temps d'intégration de ($TI = 20 \mu s$), l'intensité du faisceau atteint environ 300 DL. Les résultats ne sont analysés que dans le périmètre du faisceau IR. Les figures 3(c) et 3(b) montrent respectivement l'émission propre d'une flamme émise par un brûleur sans et avec la source IR. Une partie de la buse métallique par laquelle les gaz sont éjectés est visible sur la Figure 3(c). La figure 3(d) montre la cartographie de transmissivité (τ) de la flamme obtenue en s'appuyant sur l'équation (4). La transmissivité varie entre 0,5 et 0,85.

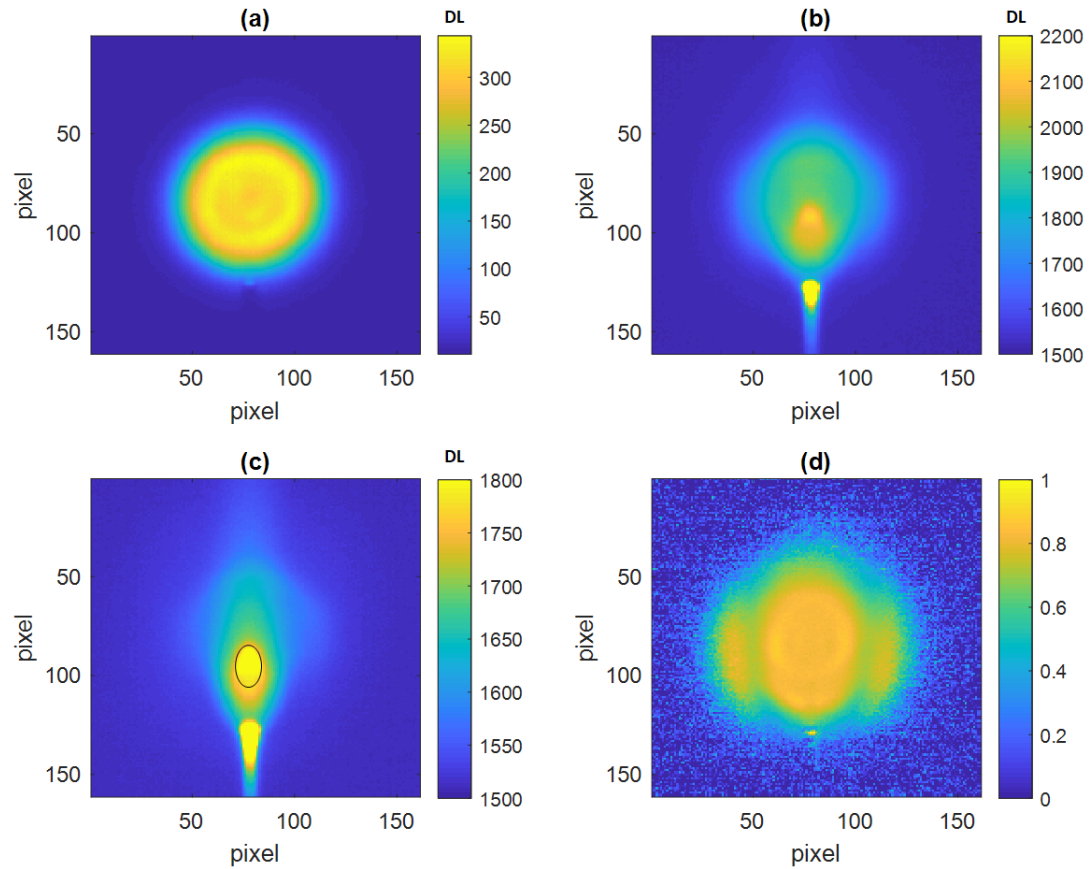


Figure 5: (a)- Source IR seul (Y_1), (b)- Source IR + emission propre de la flamme (Y_2), (c)- Emission propre de la flamme (Y_3), (d)- Transmissivité (τ)

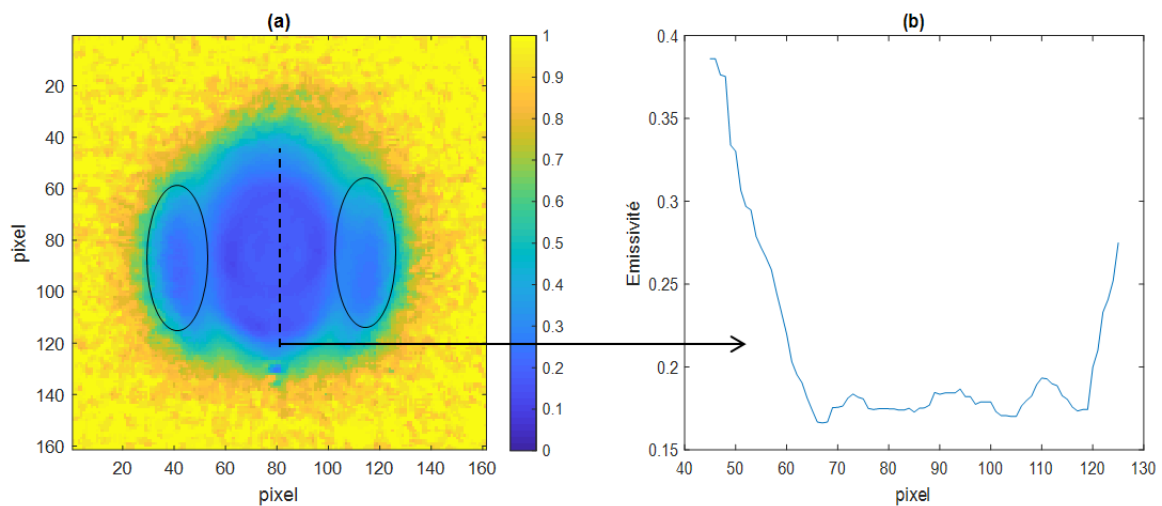


Figure 6: (a)- Cartographie de l'émissivité de la flamme, (b)- Tracé de la coupe longitudinale de l'émissivité de la flamme

La figure 4(a) montre la cartographie de l'émissivité de la flamme. Une tâche centrale qui

fait la taille de la flamme, ainsi que deux lobes (entourés par des ellipses) plus petits autour de cette tâche sont visibles sur cette figure. L'émissivité est déduite à partir de la transmissivité en utilisant l'équation (5). Elle varie entre 0,15 et 0,5. Sur la figure 4(b), l'émissivité varie légèrement le long de la flamme (entre le pixel "65" et le pixel "120"), mais cela va avoir au contraire une influence importante sur la correction de la température. De ce fait le cœur centrale de la flamme, qui correspond à la partie la plus chaude sur la figure 3(c), possède une émissivité inférieure au reste de la flamme. Cela veut dire que la caméra mesure une température inférieure à la réalité, d'où la nécessité de mesurer précisément l'émissivité. nous pouvons en conclure que les flammes sont peu émissives (autour de 0,15 dans notre cas). Ceci est en adéquation avec les résultats de Jir-Ming Char [4].

5.2. Mesure de la température absolue de la flamme

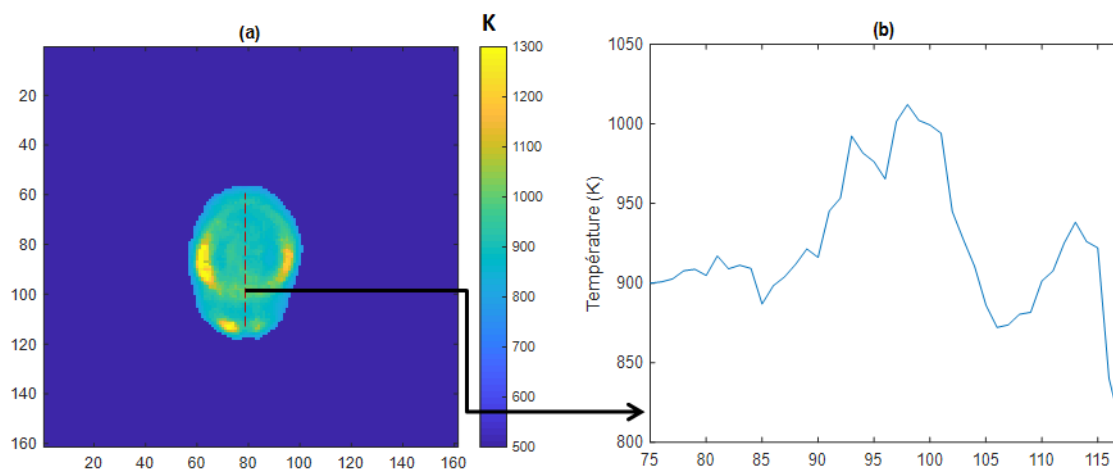


Figure 7: (a)- Température réelle de la flamme, (b)- Tracé de la coupe longitudinal de la température réelle de la flamme

La figure 5(a) montre la température réelle absolue de la flamme qui varie entre 850 K et 1300 K. La forme initiale de la flamme vue par la caméra (figure 3(c)) n'est plus visible sur cette image. Ceci s'explique par le fait que l'émissivité est variable spatialement dans la flamme. La figure 5(b) présente le profil de température le long de la ligne en pointillés de la figure 5(a). Le profil de température varie le long de la flamme : elle augmente à la sortie de la buse métallique jusqu'à atteindre un premier pic (du pixel "117" au pixel "113"). Elle diminue ensuite pour augmenter de nouveau jusqu'à atteindre le maximum de température (pixel "98") qui correspond au centre de la surface la plus chaude que voit la caméra et qui est indiqué par un cercle sur la figure 3(c). Puis elle diminue de nouveau à mesure que l'on s'éloigne du centre de la flamme.

6. Conclusion et perspectives

Une technique permettant de remonter à la température des flammes sans contact reposant sur la spectroscopie infraRouge à été présentée dans ces travaux. Elle permet grâce à trois acquisitions par caméra infraRouge d'accéder à l'empreinte spectroscopique de la flamme, de calculer sa transmissivité, et d'en déduire son émissivité afin de remonter de à la température réelle absolue de la flamme.

Cette technique a été développée afin de mesurer la température des torches à plasma qui atteignent 5000 K, ce qui aura pour conséquence des variations plus importantes en émissivité. Cette technique a été dans un premier temps validée à l'échelle du laboratoire sur des brûleurs et sera par la suite transposée pour les torches à plasma.

Références

- [1] J-Laurent Gardareina Jean-Luc Battaglia Stefan Lohle Pierre Jullien Bruno Van Ootegem Jacques Couzi Jean-Pierre Lasserre, Miniaturized heat flux sensor for high enthalpy plasmaflow characterization, *Inverse Problems in Science and Engineering*, 2013.
- [2] M. Romano M. Ryu J. Morikawa J. Batsale and C. Pradere, Simultaneous microscopic measurements of thermal and spectroscopic fields of a phase change material, *Infrared Physics and Technology*, 2016.
- [3] H. Philippe J. Cedelle I. Negreanu, Infrared Technique for Simultaneous Determination of Temperature and Emissivity, *Infrared Physics and Technology*, vol 55.2012.
- [4] Jir-Ming Char and Jun-Hsien Yeh , The Measurement of Open Propane Flame Temperature Using Infrared Technique , *Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1996.
- [5] Eulalia Planas-Cuchi, Josep M^a Chatris, Carlos Lopez and Josep Arnaldos, Determination of Flame Emissivity in Hydrocarbon Pool Fires Using Infrared Thermography, *Fire Technology*, 39, 261–273, 2003.
- [6] André MOUTET, Jean CRABOL, Lionel NADAUD, Température des gaz et des flames, *Techniques de l'ingénieur*, 1974.
- [7] S. Nechipurenko, T. Miroshnichenko, N. Pestovskii, S. Tskhai, B. Kichatov, V. Gubernov, V. Bykov, U. Maas, Experimental observation of diffusive-thermal oscillations of burner stabilized methane-air flames, *Combustion and Flame*, 2016.