

# Développement d'un capteur miniaturisé pour la mesure de flux plasma à haute enthalpie.

J-L Gardarein<sup>1\*</sup>, S. Löhle<sup>2</sup>, J-L Battaglia<sup>3</sup>

<sup>1</sup> IUSTI UMR CNRS 6595 Université de Provence Marseille, FRANCE

<sup>2</sup> Institut für Raumfahrtssysteme, University of Stuttgart Pfaffenwaldring 31, 70569 Stuttgart, Germany

<sup>3</sup> TREFLE, Université Bordeaux I, Esplanade des Arts et Métiers, 33405 Talence, France

\* (auteur correspondant : [jean-laurent.gardarein@polytech.univ-mrs.fr](mailto:jean-laurent.gardarein@polytech.univ-mrs.fr))

**Résumé** - Un nouveau fluxmètre stylo a été développé pour mesurer le profil spatial de flux convectifs de l'ordre de 60 MW/m<sup>2</sup> dans des torches à plasma d'arc. Le concept du fluxmètre est basé sur une mesure interne avec un thermocouple et une calibration avancée avec un laser dont la puissance est connue. Pour cette calibration, on utilise une procédure d'identification de système non-entier qui consiste à solliciter aléatoirement le fluxmètre avec une série de créneaux de flux connus et d'en déduire la réponse impulsionnelle du capteur à partir des paramètres identifiés. Ce nouveau fluxmètre présente l'avantage d'être plus petit, plus rapide et plus sensible que les fluxmètres coniques classiques permettant ainsi une estimation plus précise du profil du jet. Dans ce papier, on présente le design complet du fluxmètre, la procédure de calibration et les résultats expérimentaux face une torche à plasma avec des flux de l'ordre 60 MW/ m<sup>2</sup>.

## Nomenclature

$D$  Opérateur de dérivation

$L, M$  Nombre de paramètres

$n$  Ordre de dérivation

$R$  Rayon, m

$T$  temps, s

*Indices et exposants*

$s$  Surface

$\lambda$  Longueur d'onde

*Symboles grec*

$\alpha, \beta$  Paramètres du modèle non entier

$\varphi$  Densité de flux (W/m<sup>2</sup>)

$\rho, \varepsilon$  Réflectivité, émissivité

## 1. Introduction

La simulation d'entrée atmosphérique est réalisée grâce à une torche à plasma à haute enthalpie de 5 à 11 MJ/kg dans laquelle un écoulement supersonique ou subsonique permet d'obtenir des flux thermiques de quelques dizaines de MW/m<sup>2</sup>. L'objectif est de tester des matériaux résistant à des charges thermiques élevées. Avant de tester ces matériaux, une caractérisation complète de l'écoulement est nécessaire. Le paramètre que nous cherchons à estimer dans ce papier est le flux appliqué sur un matériau traversant l'écoulement. Celui-ci peut être approché par des considérations thermodynamiques, mais cette étude porte essentiellement sur la détermination expérimentale de ce flux avec un capteur conçu spécifiquement pour cette application. Pendant les années 70, une sonde conique équipée d'un thermocouple proche du bout du cône a été développée [1]. Les travaux réalisés en 2006 [2, 3] ont permis d'améliorer la précision de ce type de fluxmètres en utilisant une procédure d'identification de type non entière du fluxmètre en laboratoire. Cette phase de calibration consiste à solliciter le fluxmètre avec une source laser dont la puissance est connue et de type PRBS (Pseudo Random Binary Sequence). La réponse en Volts du thermocouple permet ensuite la détermination de la réponse impulsionnelle du fluxmètre. Par ailleurs, un nouveau type de fluxmètre a été développé et testé en 2008 afin d'améliorer la sensibilité du signal et de diminuer le temps de réponse.

Après une brève description de ce nouveau fluxmètre, nous présentons la méthode d'identification et son application aux deux types de capteur. Enfin, les résultats expérimentaux obtenus avec les deux fluxmètres au cours d'un essai mené avec la torche « JP HP (EADS-CEA) » sont comparés et discutés.

## 2. Présentation du fluxmètre stylo

L'ancienne sonde conique a un diamètre de base de 50mm ; elle avait été développée par la NASA pour caractériser un jet de plasma d'un mètre de diamètre. La torche utilisée à EADS-LV permet de produire un jet d'un diamètre de 40mm à une distance de 6mm du nez de sortie. De ce fait, il a fallu réduire le diamètre de la nouvelle sonde de manière significative en s'assurant de sa tenue au flux thermique imposé [4]. La longueur du nouveau capteur appelé « fluxmètre stylo » est définie de telle sorte que la base ne perturbe pas l'écoulement au bout du capteur [3]. Le capteur représenté sur la fig. 1, est un cylindre en cuivre percé de part en part par électroérosion. Un thermocouple gainé est ensuite inséré à l'intérieur du tube de cuivre, puis serti avec un outil en acier spécialement conçu pour cette application. Le principal avantage de cette méthode est qu'elle permet de positionner la soudure du thermocouple au plus près de la surface du capteur et d'avoir un très bon contact entre la gaine du thermocouple et le cuivre. La mesure du temps de réponse du capteur est ensuite effectuée en appliquant des impulsions laser sur le capteur et en mesurant la réponse en tension du thermocouple. Ce temps de réponse peut être réduit jusqu'à la dizaine de microsecondes en limant la gaine du thermocouple, mais nous conserverons un temps de réponse de 0.1 ms, ce qui constitue déjà une diminution d'un facteur 5 par rapport à l'ancienne sonde. D'autre part, la réduction de matière de ce nouveau capteur par rapport aux capteurs existants a permis d'augmenter la sensibilité de la mesure.

## 3. Étalonnage et incertitudes

### 3.1. Aspects théoriques

Les fluxmètres utilisés pour la caractérisation de hauts flux thermiques sont généralement constitués d'une structure en cuivre dans laquelle est placé un thermocouple de type K. La résolution du problème inverse de conduction dans le fluxmètre permet de calculer le flux déposé à la surface du capteur à partir d'une mesure de température et de la réponse impulsionnelle du capteur. Pour connaître cette réponse, plusieurs solutions sont envisageables, calcul par éléments finis, modèles analytiques... Cependant, toutes ces méthodes supposent la connaissance parfaite du capteur, notamment en termes de géométrie, de propriétés thermiques mais également de position du thermocouple dans le massif en cuivre. Un moyen de s'affranchir de la connaissance de tous ces paramètres est de caractériser le capteur en laboratoire avec une sollicitation connue en utilisant une méthode de type NISI (Non Integer System Identification). En effet il a été montré que le modèle non entier reliant la température à la densité de flux d'un système thermique linéaire peut s'écrire [5] :

$$\sum_{n=M_0}^M \alpha_n D^{n/2} T(t) = \sum_{n=L_0}^L \beta_n D^{n/2} \varphi(t) \quad (1)$$

où  $\alpha_n$  et  $\beta_n$  sont les paramètres du modèle non entier,  $T(t)$  est la température,  $\varphi(t)$  la densité de flux, et  $D$  l'opérateur de dérivation. C'est un modèle exact où le nombre de paramètres dans la série est infini ( $M \rightarrow \infty, L \rightarrow \infty$ ). Cependant, on s'aperçoit expérimentalement que même pour une géométrie complexe en 3D, un faible nombre de paramètres suffit à obtenir

un modèle non-entier précis. Nous présentons dans la section suivante des résultats expérimentaux.

### 3.2. Procédures d'identification

Lorsque l'on veut identifier le système constitué par le capteur, on cherche à identifier les paramètres  $\alpha_n$  et  $\beta_n$  de la relation (1), ainsi que les ordres de dérivation associés ( $L$  et  $M$ ). Pour cela, on réalise en laboratoire, une calibration pendant laquelle une densité de flux connue est imposée à la surface du capteur tandis que la tension aux bornes du thermocouple est par ailleurs mesurée. On peut alors identifier les paramètres du modèle non entier. Sur la Fig. 3, un exemple de signaux de calibration est présenté. La Fig. 2 montre le schéma de l'expérience de calibration.

Le laser utilisé est une diode laser DILAS DFx20-980 pouvant produire 200W à la longueur d'onde 980 nm. Dans le cas d'une identification de système, on sait que les meilleurs résultats sont obtenus lorsque la sollicitation du système est une série de pulses de durées variables permettant d'obtenir la réponse du système pour le maximum de fréquences d'excitation (comportement aux temps courts et aux temps longs). Pour cela, le laser est piloté par un générateur de fonction (Agilent 33120A) permettant de générer un PRBS (Pseudo Random Binary Signal). L'utilisation d'une photodiode Melles Griot 13DAH003 permet de synchroniser les impulsions lasers et la mesure de tension aux bornes du thermocouple. Toutes les données (photodiode et thermocouple) sont enregistrées sur un oscilloscope (Lecroy Waverunner LT364). De plus, les données du thermocouple sont amplifiées avec un gain constant de 250. Le flux radiatif émis par la surface du fluxmètre étant négligeable par rapport au flux absorbé par le capteur (environ 5MW/m<sup>2</sup>), on peut écrire que le flux absorbé par le capteur est :

$$\varphi(t) = \frac{(1 - \rho_{\lambda_{las}})\phi(t)}{\pi R^2} \quad (2)$$

où  $\rho_{\lambda_{las}}$  est la reflectivité du cuivre oxydé à la longueur d'onde du laser,  $\phi(t)$  est le flux produit par le laser et  $R$  est la rayon du faisceau laser. Les propriétés optiques du cuivre oxydé ont été mesurées au CEA/CESTA et peuvent être considérées constantes dans l'infrarouge.

La mesure du flux en sortie de laser est réalisée avec une diode de type corps noir avec une précision de 1mW. Le capteur est constitué de cuivre oxydé dont l'émissivité a été mesurée à 0,7 dans la longueur d'onde du laser avec une incertitude de 6%. La mesure du rayon du faisceau laser est quand a elle mesurée avec une incertitude de 0,1 m. Pour avoir un niveau de confiance de 99,73% sur le flux absorbé lors d'une calibration, nous obtenons une incertitude de 11,8% (en utilisant la norme AFNOR NF ENV 13005). Le bruit de mesure du thermocouple a été mesuré sans chauffage. Son analyse montre qu'il a une distribution Gaussienne et que les points entre deux pas de temps sont indépendants. Cette analyse du bruit permet de conclure qu'il est possible d'utiliser les moindres carrés récursifs pour l'identification des paramètres du modèle non entier.

### 3.3. Résultats et analyse

La Fig. 3 montre la tension aux bornes du thermocouple et la valeur du flux mesurée pendant une calibration (la période d'acquisition est 100  $\mu$ sec) dans le cas du fluxmètre stylo. Le modèle optimal peut être obtenu de différentes manières. Nous avons choisi de minimiser la valeur des résidus en faisant varier la valeur du 1<sup>er</sup> ordre de dérivation  $\eta = M_0$  (eq.1), en

prenant plusieurs valeurs de  $M_0$ . Pour les deux capteurs utilisés dans la simulation, la relation (1) nous conduit à identifier le système non entier suivant :

$$(\alpha_0 D^{-1} + \alpha_1 D^{-0,5} + \alpha_2)V(t) = (\beta_0 D^{-1,5} + \beta_1 D^{-1} + \beta_2 D^{-0,5})\varphi(t) \quad (3)$$

Les valeurs obtenues pour les paramètres  $\alpha_n$  et  $\beta_n$  sont reportées dans le tableau suivant pour 2 types de capteur :

Paramètres	Ordres de dérivation	Valeurs identifiées Sonde conique	Valeurs identifiées Sonde stylo
$\alpha_0$	-1	1	1
$\alpha_1$	-0,5	$4,85 \cdot 10^{-2}$	$6,27 \cdot 10^{-2}$
$\alpha_2$	0	$3 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$
$\beta_0$	-1,5	$5,97 \cdot 10^{-5}$	$2,31 \cdot 10^{-5}$
$\beta_1$	-1	$7,63 \cdot 10^{-7}$	$1,92 \cdot 10^{-5}$
$\beta_2$	-0,5	$-1,9 \cdot 10^{-8}$	$-2,29 \cdot 10^{-7}$

Tableau 1 : Valeurs des paramètres du modèle non entier optimal pour les 2 fluxmètres

Il est maintenant possible de calculer les réponses impulsionnelles des 2 fluxmètres. Sur la Fig. 4 sont tracées les réponses impulsionnelles calculées normalisées pour les 2 fluxmètres. La réponse impulsionnelle analytique d'un milieu semi infini 1D s'exprime comme suit :

$$T(x,t) = \frac{\varphi_0}{\sqrt{\pi t \rho C_p k}} \exp\left(-\frac{x^2}{4at}\right) \quad (4)$$

$$\text{avec } x=0,2\text{mm}, k=387 \text{ W/mK}, \rho=8750 \text{ kg/m}^3, C_p=382 \text{ J/kg.K}$$

Cette réponse impulsionnelle a été normalisée et également représentée sur la Fig. 4. On remarque que celle-ci est insuffisante pour modéliser le capteur et justifie l'utilisation de la méthode d'identification de système non-entier. Par ailleurs, on constate que les temps de réponse des deux fluxmètres sont plus faibles que celui du milieu semi-infini, et le temps de réponse du fluxmètre stylo est beaucoup plus faible que celui du fluxmètre conique, ce qui était un des objectifs du nouveau capteur.

## 4. Application au fluxmètre stylo

### 4.1. Présentation du dispositif expérimental

Après avoir été étalonné avec la nouvelle méthode d'identification de système, le prototype du nouveau fluxmètre stylo a été testé en conditions expérimentales sur la torche à plasma JP HP (EADS-LV) [6]. Le JP HP est un générateur de type Huels conçu pour les applications à haute pression. Dans la chambre de mélange, la pression du gaz atteint 100bar avec des enthalpies de l'ordre de 5MJ/kg à 11 MJ/kg. Des expériences, avec des échantillons mis en position de type point d'arrêt, permettent d'obtenir des flux thermiques variant entre 20MW/m<sup>2</sup> et 100MW/m<sup>2</sup>. Pour notre campagne d'essai, la pression dans la chambre était de 16 bars et l'enthalpie de 11 MJ/kg. Dans ces conditions, nous avons un jet de diamètre de 40mm et un flux de 55MW/m<sup>2</sup> sur un point d'arrêt situé à environ 6mm de la sortie.

## 4.2. Résultats expérimentaux

Un essai a été réalisé avec le fluxmètre stylo et le fluxmètre conique dans des conditions expérimentales similaires, les résultats sont présentés sur la figure 5. On peut penser que la valeur du flux mesurée avec le stylo est plus précise car il a été montré que celui-ci perturbait moins l'écoulement [2]. Sur la figure 6, des images prises avec une caméra rapide CCD montrent la propagation des ondes de choc le long des capteurs et un impact moindre dans le cas du stylo. Par ailleurs, le fait d'avoir amélioré la résolution temporelle améliore en réalité la résolution spatiale du fluxmètre qui passe dans la torche à une vitesse de 1m/s. Une amélioration supplémentaire pourrait permettre de mieux caractériser spatialement la structure du flux dans la torche. On peut noter également que dans le cas du fluxmètre stylo, après la sortie du capteur de la torche, le flux ne revient pas en 0. Ceci est dû au fait que toute notre démarche est basée sur une hypothèse de linéarité i.e que les propriétés thermiques ne varient pas en fonction de la température. Dans le cas du stylo, cette hypothèse n'est plus valide, car le capteur ayant moins d'inertie, il monte beaucoup plus haut en température et ses propriétés peuvent varier d'un facteur 2. Ceci pourra être corrigé en dimensionnant un nouveau stylo avec assez de matière pour rester dans des échauffements acceptables pendant une expérience tout en conservant un faible temps de réponse, celui-ci dépend surtout de la distance entre le thermocouple et la surface du capteur. D'autre part, une thèse est en cours sur l'évolution de la méthode NISI pour la rendre non linéaire.

## 5. Conclusion

Un nouveau design de fluxmètre a permis de diminuer le temps de réponse du capteur et d'augmenter sa sensibilité. D'autre part ce fluxmètre perturbe moins l'écoulement du plasma de la torche. Les expériences menées ont permis de trouver les mêmes niveaux de flux avec les 2 capteurs. Cependant, le trop fort échauffement du nouveau capteur a pour conséquence des variations non négligeables des propriétés thermiques du matériau le constituant entraînant un comportement anormal après la sortie du jet. Les résultats obtenus sont quand même prometteurs et une amélioration de la conception du capteur devrait permettre de limiter l'échauffement et de diminuer le temps de réponse conduisant à une amélioration de la résolution spatiale. D'autre part, l'utilisation de la méthode NISI en non linéaire permettra de corriger la réponse impulsionnelle la rendant dépendante aux variations des propriétés thermiques des matériaux.

## Références

- [1] Kennedy, W., Rindal, R. and Powers, C., "Heat Flux Measurement Using Swept Null Point Calorimetry," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 9, No. 9, 1972, pp. 668-675.
- [2] S. Löhle, J.-L. Battaglia, J.-C. Batsale, O. Enouf, J. Dubard, J.-R. Filtz, Characterization of a heat flux sensor using short pulse laser calibration, *Rev. Sci. Instrum.* 78, n°053501, 2007.
- [3] S. Löhle, J.-L. Battaglia, J.-C. Batsale, P. Julien and B. van Ootegem, Improvements of high flux measurements using a null-point calorimeter, *J. of Aircrafts and Rockets* 45, pp. 76-81, 2008.
- [4] S. Löhle, F. Boursereau, J.-P. Lasserre J.-P., High Heat Flux Measurements using a non-stationary Device, *Proceedings of the 5th European Workshop on Thermal Protection Systems and Hot Structures*, ESA, Noordwijk, NL, 2006.
- [5] Battaglia J.-L., Puigsegur L. and Kusiak A., Représentation non entière du transfert de chaleur par diffusion. Utilité pour la caractérisation et le contrôle non destructif thermique *Int. J. Therm. Sci.* 43, pp. 69-85, 2004.

- [6] Boursereau F., Donnart P., Bouffet S., Astier J-C., Jullien P., Foltyn M., "Theoretical and Experimental Investigations on a New Test Configuration on Arc Heater", 4th International Symposium on Atmospheric Re-Entry Vehicles and Systems, Assoc. Aeronautique et Astronautique de France (3AF), Paris 2005.

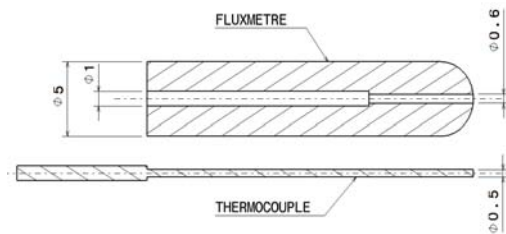


Figure 1 : Design du fluxmètre stylo (dimensions en mm)

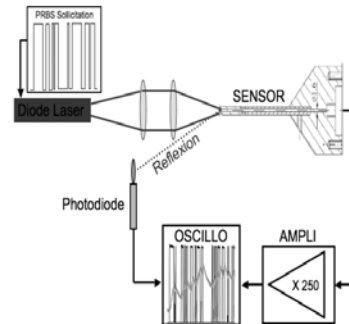


Figure 2 : Schéma de l'expérience de calibration

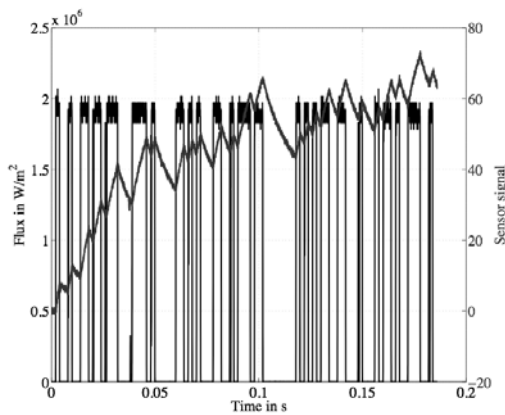


Figure 3 : Signaux de calibration obtenus pour un fluxmètre Stylo.

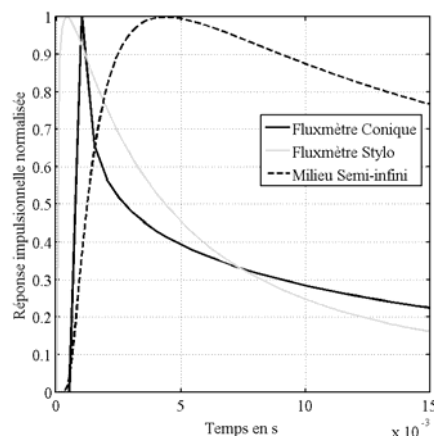


Figure 4 : Réponses impulsionnelles normalisées des deux capteurs et d'un milieu semi-infini

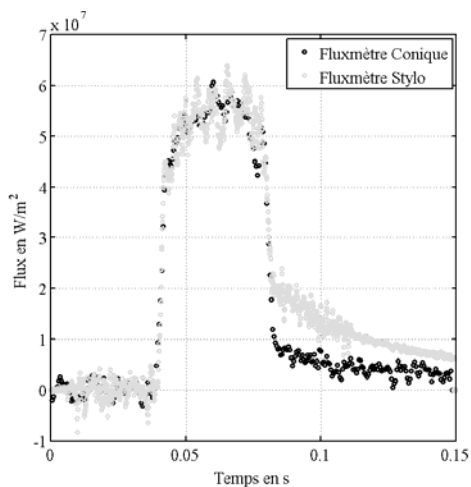


Figure 5 : Flux estimés dans le jet plasma avec les deux types de capteurs.

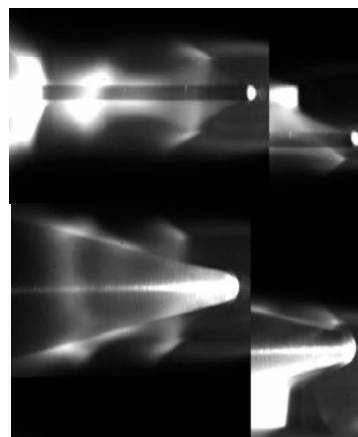


Figure 6 : Image de l'influence du fluxmètre stylo et conique dans l'écoulement plasma.