

A. Fuentes, G. Legros, P. Joulain, J.P. Vantelon, and J.L. Torero, *Caractérisation de la fraction volumique et de la température des suies d'une flamme de diffusion établie en micropesanteur*, 17^{ème} Congrès Français de Mécanique (2005).

Caractérisation de la fraction volumique et de la température des suies d'une flamme de diffusion établie en micropesanteur

Andrés Fuentes⁽¹⁾, Guillaume Legros⁽¹⁾, Pierre Joulain⁽¹⁾, Jean-Pierre Vantelon⁽¹⁾ & José Torero⁽²⁾

⁽¹⁾Laboratoire de Combustion et de Détonique, UPR 9028 du CNRS, Poitiers - FRANCE

⁽²⁾School of Engineering and Electronics, The University of Edinburgh, Edinburgh - UNITED KINGDOM
andres.fuentes@lcd.ensma.fr

Résumé :

Les suies ont un rôle radiatif dominant dans les flammes de diffusion en micropesanteur. En effet, les pertes radiatives sont particulièrement importantes en queue de flamme, où les produits de combustion, dont les suies, se concentrent, faute d'évacuation par convection suffisante. Une technique optique de caractérisation de la fraction volumique et de la température des suies, innovante est proposée, combinant mesures d'absorption et d'émission modulées à deux longueurs d'onde simultanées : 470 nm et 530 nm. Une matrice de LEDs bicolores (en l'occurrence vertes et bleues) permet l'émission des petits faisceaux qui rendent une cartographie détaillée de l'extinction à travers la flamme. Ainsi, les conditions en queue de la flamme de diffusion, où intervient l'extinction, sont-elles caractérisées en fraction volumique et température de suie .

Abstract :

The soot has a dominant radiative role in microgravity diffusion flames. In fact, the radiative losses are particularly important in the trailing edge of the flame, where the combustion products, especially the soot, concentrate due to lack of convection. A new optical technique in microgravity is proposed that combines modulated absorption and emission measurements at two wavelengths simultaneously : 470 nm and 530 nm. A bicolor matrix of LEDs (blue and green) allows the emission of a series of little beams that cross the flame and form a detailed cartography of extinction along the flame. In this way, the conditions in the trailing edge of the diffusion flame, where quenching occurs, can be characterized in soot volume fraction and temperature.

Mots-clefs :

Flamme de diffusion / micropesanteur / suie / transfert radiatifs

1 Introduction

A gravité terrestre, la plupart des théories des flammes de diffusion se contente de considérer les transferts radiatifs comme une constante du problème contrairement aux transferts conductifs et convectifs [1]. Cette hypothèse est généralement vérifiée, hormis dans le cas des grands feux [2]. La micropesanteur se caractérise par une absence de convection naturelle et laisse alors apparaître une forte sensibilité des transferts radiatifs, devenus prépondérants, aux conditions expérimentales, et ce même aux petites échelles [3]. Alors que les phénomènes radiatifs à gravité terrestre sont extrêmement difficiles à appréhender du fait de la nature turbulente de la plupart des feux, une grande partie des flammes en micropesanteur présentent l'avantage d'être laminaires et offrent ainsi un champ d'investigation plus aisé des transferts radiatifs, encore mal connus aujourd'hui.

La littérature montre l'importance des pertes radiatives des flammes non-prémélangées établie en micropesanteur. L'écart entre la température adiabatique de flamme et la température de flamme réelle ($\Delta T = T_{ad} - T_{réelle}$) peut ainsi atteindre plus de 1000 K [4], ce en fonction des configurations adoptées. Cependant, ce maximum de ΔT se trouve systématiquement dans la zone de "quenching" de la flamme, là où le temps caractéristique de résidence croît. Les produits de combustion, dont les suies, émettent alors d'autant plus dans cette zone chaude [5], notamment vers l'environnement, ce qui relativement à l'énergie de combustion représente une perte non-négligeable dans l'auto-entretien de la réaction.

Alors que les séjours spatiaux, toujours plus longs, requièrent une maîtrise de ce phénomène d'extinction afin d'assurer la sécurité-incendie des véhicules, l'étude d'une flamme établie sur un combustible solide au sein d'une couche-limite de plaque plane s'avère judicieuse pour modéliser la propagation d'un incendie spatial alimenté par une ventilation. Torero *et coll.* [6] montrent alors que la longueur de flamme est un des trois paramètres caractéristiques de la vitesse de propagation. A l'aide de différentes techniques tomographiques, Legros *et coll.* [7] ont mis en évidence le rôle prépondérant des suies dans cette flamme de diffusion en micropesanteur, laissant présager l'existence de conditions critiques en concentration, conduisant à l'extinction en queue de flamme. Pour cette raison, une cartographie de la fraction volumique et de la température des suies permettrait de connaître de manière précise leur distribution. Selon la méthode dite d'absorption/émission modulée [8], une mesure en absorption et en émission à deux longueurs d'ondes différentes permet *a priori* de déduire la température et la concentration des suies. La présente étude se propose de mettre en application cette technique autour d'une flamme présentant des caractéristiques tridimensionnelles, à l'inverse de celle de l'étude de référence [8].

2 Mise en œuvre expérimentale

La flamme non-prémélangée est établie sur un brûleur gaz-gaz, dont le schéma de la figure 1 a/ donne les dimensions. Un poreux permet l'injection uniforme de gaz combustible sur une section efficace de $50 \times 50 \text{ mm}^2$. L'écoulement transversal d'oxydant est laminarisé au travers d'un nid d'abeilles situé en entrée de la chambre de combustion. L'alimentation en combustible et le mélange en ligne d'oxydant sont régulés par des débitmètres massiques. Cette régulation est contrôlée par une centrale de commande. Le brûleur est disposé au sein d'une chambre de combustion en acier inoxydable d'une capacité de 50 l. Si ce volume restreint conduit à un confinement certain de la flamme, cette mise en œuvre répond avant tout à différents impératifs. La flamme ne doit pas subir de perturbations, en particulier du fait de composantes convectives extérieures. De plus, l'évacuation des produits de combustion doit être strictement contrôlée. Cette évacuation est régulée par une vanne et un capteur de pression différentiel qui conditionnent la chambre à pression atmosphérique. Par ailleurs, la chambre est munie d'un ensemble de hublots permettant différentes visualisations des phénomènes étudiés.

Le même schéma de la figure 1 a/ représente le montage expérimental mis en œuvre pour la technique d'absorption et d'émission modulée. En fait, une matrice de LEDs de 6 W, émettant à la longueur d'onde $\lambda_1 = 530 \text{ nm}$ pour le vert et $\lambda_2 = 470 \text{ nm}$ pour le bleu, est disposée au-dessous du brûleur. Pour obtenir une cartographie de la flamme, la plaque du brûleur a été perforée en créant une matrice de 21×18 trous transmissifs qui sont disposés régulièrement dans toute la zone située en aval du poreux. Chaque trou a un diamètre $\phi = 1 \text{ mm}$ permettant l'émission de petits faisceaux sans perturber les propriétés radiatives de la surface. La lumière émise par la matrice des diodes passe tout d'abord à travers trois verres dépolis qui garantissent

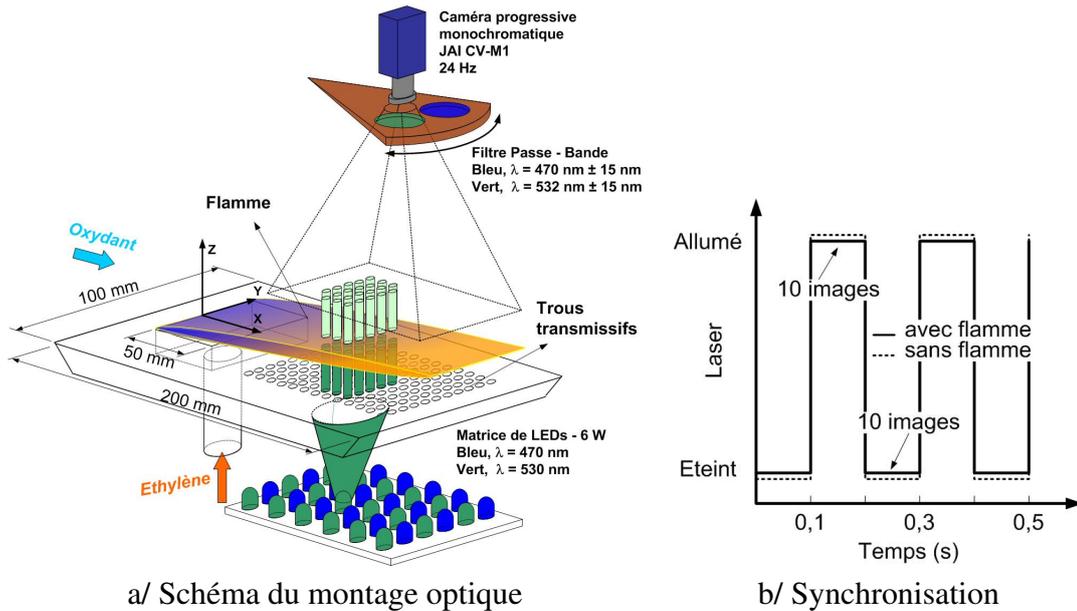


FIG. 1 – Mise en œuvre expérimentale de l’Absorption/Emission Modulée

la diffusion de la lumière et ensuite à travers une plaque en pyrex qui protège la flamme d’une alimentation parasite en oxydant.

De façon à obtenir une représentation bidimensionnelle, une caméra numérique est positionnée à l’aplomb de la zone à explorer. Cette caméra est progressive et monochromatique à $24Hz$, permettant une définition de 1280×510 pixels. Chaque petit faisceau qui traverse la flamme passe au travers de filtres interférentiels possédant une largeur de 15 nm à mi-hauteur mais centrés sur 532 nm pour le vert et 470 nm pour le bleu, avant d’impressionner la matrice CCD. La fréquence de positionnement des filtres est synchronisée sur la fréquence d’émission des LEDs, elles-mêmes pulsées à la fréquence d’acquisition de la caméra. La figure 1 b/ illustre le mode d’enregistrement des images : deux images avec les LEDs allumées, suivies de deux images avec les LEDs éteintes. La même synchronisation est réalisée avant l’allumage pour avoir les images de référence. Les conditions de micropesanteur ont été reproduites lors des campagnes de vols paraboliques du (CNES) et de l’(ESA) à bord de l’A300 zéro-G de Novespace.

L’étude présentée ici a pour objectif l’évaluation de la fraction volumique des suies et de la température. Les résultats d’une seul couplage combustible oxydant sont exposés. Il s’agit en l’occurrence d’une vitesse de soufflage d’oxydant de 200 mm.s^{-1} et d’une vitesse d’injection de combustible de 5 mm.s^{-1} . Le combustible choisi est l’éthylène du fait de sa forte propension à produire des suies. Le mélange oxydant est, quant à lui, composé de 65% de N_2 et de 35% de O_2 .

3 Principe général de L’Absorption/Emission Modulée (MAE)

A partir de mesures à une ou à deux longueurs d’onde simultanées, Jenkins *et coll.* [8] proposent deux techniques d’absorption/émission modulée, dans le but de remonter à la température des suies. Les particules de suie étant une matière condensée, l’intensité spectrale \mathcal{I}_λ de leur émission peut s’écrire en fonction de l’intensité $\mathcal{I}_{b\lambda}$ du corps noir, donnée par la loi de Planck

à la même température T , et de l'émissivité spectrale des suies ϵ_λ :

$$\mathcal{I}_\lambda(T) = \epsilon_\lambda \mathcal{I}_{b\lambda}(T) \quad \mathcal{I}_{b\lambda}(T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right]} \quad (1)$$

où C_1 et C_2 sont les première et deuxième constantes de Planck. Deux inconnues, ϵ_λ et T , restent à préciser. On fait appel à la loi de Kirchhoff, montrant l'égalité entre émissivité et absorptivité directionnelles spectrales, où τ_λ est la transmittivité $\frac{i_\lambda(s)}{i_\lambda(0)}$ mesurée et définie par la loi de Bouguer. Aussi, à partir de la théorie de Mie, on peut alors exprimer l'émissivité des suies, où R_o est une constante qui dépend de la partie réelle et imaginaire de l'indice de réfraction du milieu [9], et L le chemin optique de la mesure d'absorption :

$$\epsilon_\lambda = \alpha_\lambda = 1 - \tau_\lambda = 1 - e^{-\frac{R_o}{\lambda} f_{sui} L} \quad (2)$$

Idéalement, la mesure de la fraction volumique f_{sui} permet donc d'obtenir la température par l'intermédiaire des équations (1) et (2) et ce à une seule longueur d'onde. Cependant, cette mesure requiert un étalonnage à partir d'une source de température connue. En faisant des mesures à deux longueurs d'ondes différentes, on peut retrouver directement une expression de la température. En effet, dans la gamme de température relevée $C_2 \gg \lambda T$ et, en conséquence, $e^{\frac{C_2}{\lambda T}} \gg 1$. Le rapport entre les intensités $\mathcal{I}_{\lambda_1}(T)$ et $\mathcal{I}_{\lambda_2}(T)$ est alors déduit de la relation suivante, où $\frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_2}}$ et $\frac{\epsilon_{\lambda_1}}{\epsilon_{\lambda_2}}$ sont les grandeurs mesurées :

$$T = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln \left[\frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_2}} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^5 \frac{\epsilon_{\lambda_2}}{\epsilon_{\lambda_1}} \right]} \quad (3)$$

4 Résultats et discussion

L'origine du repère cartésien lié au domaine d'étude se trouve à l'intersection du bord amont de la section efficace du poreux et du plan de symétrie (x, z) du brûleur. Ainsi le poreux est défini par le domaine $\{-25 \text{ mm} \leq y \leq +25 \text{ mm}; 0 \text{ mm} \leq x \leq 50 \text{ mm}; z = 0 \text{ mm}\}$, tandis que le domaine concernant la cartographie de la MAE est représenté par $\{-25 \text{ mm} \leq y \leq 25 \text{ mm}; 70 \text{ mm} \leq x \leq 135 \text{ mm}; z = 0 \text{ mm}\}$. Ce repère a été adopté car toutes les courbes expérimentales montrent cette symétrie du fait de la géométrie de la flamme.

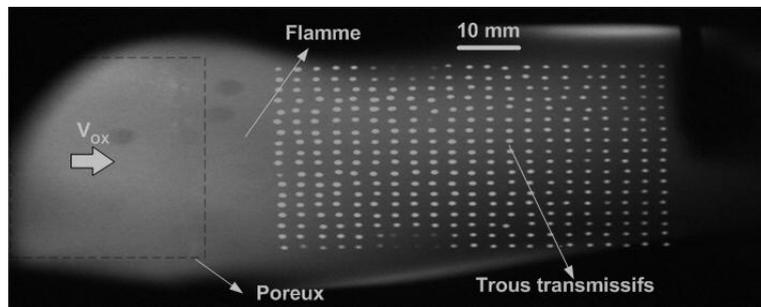


FIG. 2 – Image instantanée en niveaux de gris de l'émission de la flamme et de la source à $\lambda = 532 \text{ nm}$

La figure 2 montre une image instantanée de la flamme prise lors d'une séquence modulée en micropesanteur au moment où la matrice de LEDs verte a été allumée. Le soufflage oxydant est orienté de la gauche vers la droite. On peut observer aisément la forme de la flamme qui recouvre presque complètement le domaine de trous transmissifs. De plus, on peut constater une diminution progressive de l'émission, à cette longueur d'onde, vers le bord de fuite en démontrant ainsi l'extinction en queue de flamme.

4.1 Cartographie de la fraction volumique en suies

Les valeurs de mesure d'extinction sur chaque trou peuvent être étalonnées en terme de fraction volumique de suies, intégrées sur le chemin optique, par référence aux valeurs d'indices complexes des particules fournies par Habib et Vervish [10]. La figure 3 /a montre une cartographie de la fraction volumique de suies, évaluée pour une longueur d'onde $\lambda = 532 \text{ nm}$, selon l'axe x tout au long de la flamme. Les positions de la source sont localisées sur le graphique par des cercles. On peut constater une augmentation de la concentration vers le bord de fuite

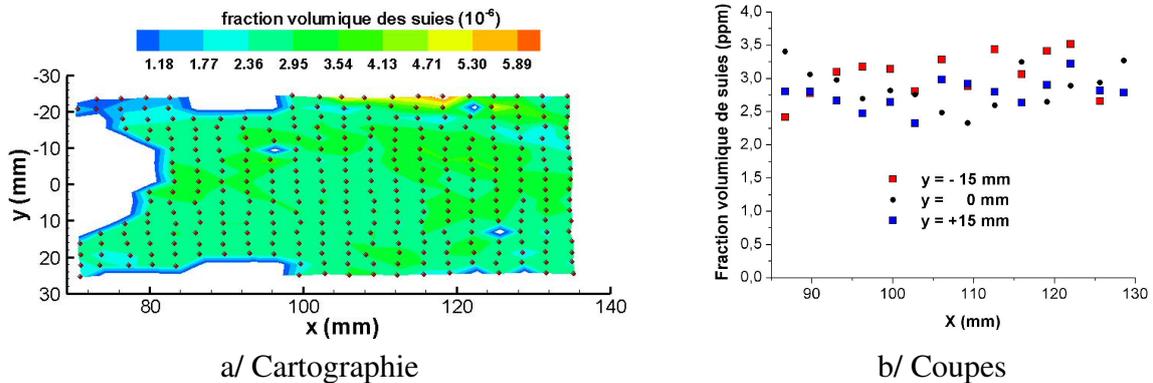


FIG. 3 – Evolution de la fraction volumique de suies en fonction de la coordonnée x pour différentes valeurs de la coordonnée verticale y

en passant de 1 *ppm* environ dans la zone proche du poreux à 3 *ppm* en queue de flamme. De plus, les symboles du graphique de la figure 3 /b montrent la variation de la fraction volumique à différentes abscisses y . Dans le plan médian, la bande de la concentration en suies est comprise entre 2,5 *ppm* et 3 *ppm*. Sur les côtés de la flamme, les carrés montrent un certain écart en concentration, confirmé sur la cartographie, mais montrent en même temps une évolution similaire, démontrant ainsi une certaine symétrie du phénomène.

4.2 Temperature des suies

La figure 4 est un exemple représentatif du profil des températures de suies le long de l'axe longitudinal x , déduites, par l'intermédiaire de l'équation (3), d'une évolution de l'extinction et de l'émission de la flamme et des sources, pour les deux longueurs d'onde. La courbe pleine représente l'évolution pour le plan médian $y = 0$ tandis que la courbe en pointillé est le résultat de la moyenne T_{MOY} évaluée pour chaque colonne de la matrice de trous transmissifs. On constate que la température augmente et reste ensuite relativement constante aux alentours de 1250 K et 1300 K entre $\{95 \text{ mm} \leq x \leq 115 \text{ mm}\}$ pour finalement décroître rapidement dans

la zone de “quenching” proche du bord de fuite.

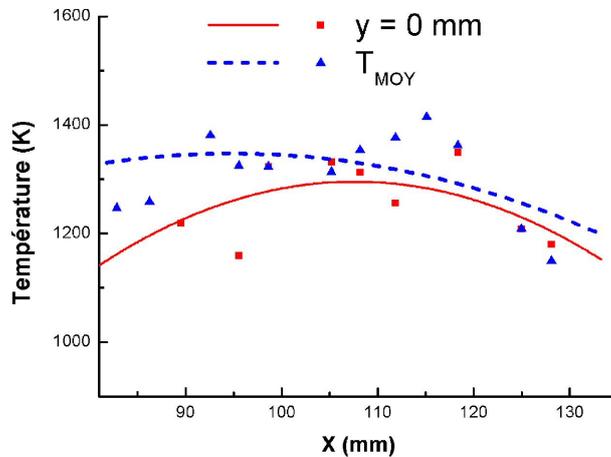


FIG. 4 – Evolution de la température de suies en fonction de la coordonnée longitudinale x pour $y = 0 \text{ mm}$ et T_{moy} pour chaque colonne de la matrice des trous transmissifs

5 Conclusions

Ce travail montre le potentiel de la technique optique non-intrusive MAE comme moyen permettant d’évaluer de manière locale la fraction volumique de suies et sa température dans une flamme de diffusion établie en micropesanteur.

La concentration moyenne en suies est d’environ 3 ppm , valeur tout à fait en accord avec les résultats obtenus par Legros *et coll.* [7]. L’évolution de la température des suies le long de la flamme a pu être également évaluée. Elle correspond bien aux mesures obtenues par thermocouple lors de la même expérimentation. Le niveau observé, de l’ordre de 1300 K , apparaît un peu moins élevé qu’à gravité terrestre.

Références

- [1] G. COX. Combustion fundamentals of fire. *H.D. Ross, Editor, Academic Press*, 1995.
- [2] J. DE RIS. Fire radiation – a review. *Proc. Combust. Inst.*, 17 :1003–1016, 1979.
- [3] S. BHATTACHARJEE and R. ALTENKIRCH. Radiation-controlled, opposed-flow flame spread in a microgravity environment. *23th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute*, pages 1627–1633, 1990.
- [4] O. FUJITA, K. ITO, H. ITO, and Y. TAKESHITA. Effect of thermophoretic force on soot agglomeration process in diffusion flame under microgravity. *4th NASA International Microgravity Combustion Workshop*, 17–5 :217–222, 1997.
- [5] A. ATREYA and S. AGRAWAL. Effect of radiative heat loss on diffusion flames in quiescent microgravity atmosphere. *Comb. and Flame*, 115 :372–382, 1998.
- [6] J.L. TORERO, T. VIETORIS, G. LEGROS, and P. JOULAIN. Estimation of a total mass transfer number from the stand-off distance of a spreading flame. *Comb. Sci. and Technol.*, 174 :187–203, 2002.

- [7] G. LEGROS, P. JOULAIN, J.P. VANTELON, C. BREILLAT, and J.L. TORERO. Épaisseur optique d'une couche de suie formée par une flamme de diffusion en micropesanteur. *Mécanique et Industries.*, 5 :597–605, 2004.
- [8] T.P. JENKINS and R.K. HANSON. Soot pyrometry using modulated absorption/emission. *Comb. and Flame*, 126 :1669–1179, 2001.
- [9] W. DALZELL and A. SAROFIM. Constants of soot and their application to heat flux calculations. *J. Heat Transfer*, 91 :100–104, 1969.
- [10] Z.G. HABIB and P. VERVISCH. On the refractive index of soot at flame temperature. *Comb. Sci. and Technol.*, 59 :261–274, 1988.