

# Transferts thermiques lors de l'interaction flamme paroi.

Hélène ROINARD\*, Francis MICHELI, Philippe REULET, Pierre MILLAN

ONERA / DMAE

BP 4025 - 2 av. Edouard Belin

31055 Toulouse Cedex 4

\*(auteur correspondant : [helene.roinard@oncert.fr](mailto:helene.roinard@oncert.fr))

**Résumé** - Afin de valider une méthodologie d'identification des flux de chaleur convectifs et radiatifs lors d'un impact de flamme sur une paroi, un banc d'impact autour d'un brûleur permettant de générer une flamme de prémélange propane-air est développé à l'ONERA. Les premiers essais consistent en l'étude de la flamme libre et en impact afin d'obtenir à terme la définition d'un modèle simplifié représentant les parts convective et radiative du flux, en fonction des paramètres d'alimentation de la flamme et de la géométrie de l'impact.

## Nomenclature

|           |                                      |               |   |
|-----------|--------------------------------------|---------------|---|
| T         | Température [K]                      | $\lambda$     | Longueur d'onde [m]                             |
| r         | richesse                             | $L_v$         | Luminance monochromatique [ $W/m^2/Sr/m^{-1}$ ] |
| $S_L$     | Vitesse fondamentale de flamme [m/s] | $\kappa_v$    | Coefficient d'absorption [ $m^{-1}$ ]           |
| $\dot{m}$ | Débit massique [kg/s]                | $\sigma_v$    | Coefficient de diffusion [ $m^{-1}$ ]           |
| H         | Distance buse/paroi [m]              | $\alpha$      | Rapport de mélange                              |
| d         | Diamètre d'éjection [m]              | $\alpha_{st}$ | Rapport de mélange à la stœchiométrie           |

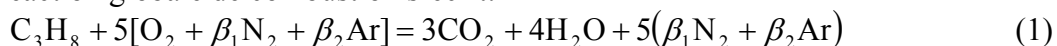
## 1. Introduction

Ces travaux sont réalisés dans le cadre de l'étude d'une flamme utilisée pour la certification incendie des zones moteur d'avion. Le dispositif expérimental permet d'effectuer des mesures directement dans la flamme ou sur la plaque impactée. Une cartographie complète des échanges ne pouvant pas être faite directement sur la face impactée de la plaque, une méthode de traitement de mesures de températures effectuées en face arrière sous la forme de méthodes de résolution des problèmes inverses est utilisée.

## 2. La flamme de prémélange propane-air

### 2.1. Théorie de la flamme

La réaction globale de combustion s'écrit:



Avec  $\beta_1 = 3.717$  et  $\beta_2 = 0.047$  ; la richesse est calculée à partir des débits massiques selon la formulation (2), où les indices *carb* représente le carburant ( $C_3H_8$ ) et *comb* le comburant (air).

$$r = \alpha / \alpha_{st} \quad \text{avec} \quad \alpha = (\dot{m}_{carb} / \dot{m}_{comb}) \quad (2)$$

La flamme de prémélange est accrochée au sommet du brûleur. Le front de flamme est la zone la plus chaude ; il apparaît sous la forme d'un cône aux bords très lumineux et est le siège de la réaction, lieu d'un fort dégagement de chaleur. Cette zone lumineuse est d'une épaisseur inférieure au millimètre et se situe entre les gaz frais et les gaz brûlés. Son positionnement dépend de la vitesse du mélange combustible-comburant par rapport à la vitesse de propagation du front de flamme. La modélisation d'une flamme doit prévoir : la vitesse

fondamentale de propagation,  $S_L$ , la structure du front, son épaisseur, sa stabilité, les limites d'extinction ou d'inflammabilité. La flamme laminaire plane est employée comme régime de référence. On considère alors la vitesse fondamentale de flamme  $S_L$  qui est la vitesse minimale de consommation des gaz frais, normale à la surface de la flamme, (dirigée vers les gaz frais). Cette vitesse fondamentale de flamme laminaire est de l'ordre de  $10^{-1}m/s$  pour les mélanges  $C_nH_m/air$  classiques.

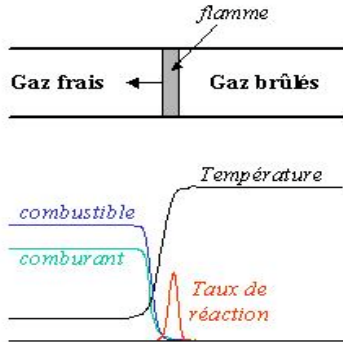


Fig. 1 – Schéma du front de flamme pour une flamme de prémélange

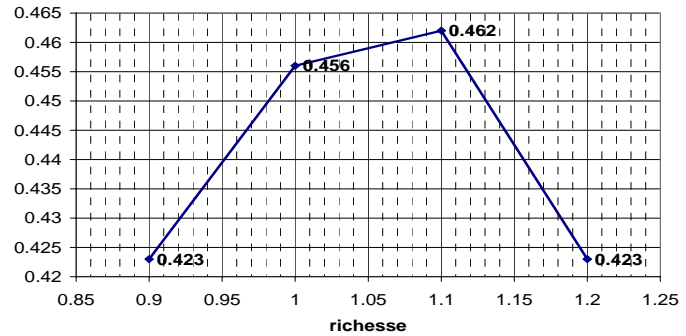


Fig. 2 – Vitesse apparente  $S_L$  d'une flamme laminaire plane de propane

Suivant la théorie thermique de Mallard et Le Chatelier (1880), les réactifs froids doivent être chauffés avant de brûler. La flamme se décompose en une zone thermique (le phénomène prépondérant est l'élévation en température des réactifs), et une zone chimique (le phénomène prépondérant est la réaction chimique). Alors, la puissance dégagée par la réaction en zone chimique d'une masse  $m$  sert à chauffer la même masse de réactifs en zone thermique.

## 2.2. Température adiabatique de flamme

Considérant la flamme de prémélange propane-air, initialement à la température  $T_0=298.16K$ , l'enthalpie du mélange est de  $-103.75kJ/mole$  à la stoechiométrie ; dans le cas d'un mélange de richesse  $r \leq 1$ , avec  $Air=O_2+3.717N_2$ , on aura :

$$rC_3H_8 + 5Air = r(3CO_2 + 4H_2O) + 5((1-r)O_2 + \beta_1N_2 + \beta_2Ar) \quad (3)$$

Pour une richesse de 0.52, la température adiabatique vaut 1559K et varie linéairement jusqu'à la température atteinte pour le mélange stoechiométrique qui est 2408K (2135°C).

En réalité, des pertes de chaleur font que la température de flamme est moins élevée que cette température théorique, qui peut donc être utilisée comme température maximale lors du choix de l'instrumentation.

## 2.3. Impact de flamme sur une plaque plane

De la même façon que pour l'impact d'un jet non réactif, une flamme impactant sur une plaque plane peut s'étudier sur trois zones : une région de type écoulement libre, une région d'impact ou de stagnation, et une région de type écoulement de paroi (Dong et al., 2002, [2]).

Suivant le positionnement de l'obstacle, de nombreuses modifications de la structure de la flamme peuvent apparaître. Le comportement dans le cas où l'obstacle est en dehors du front de flamme est celui qui se rapproche le plus du jet chaud. La totalité des gaz frais est brûlée avant d'atteindre l'obstacle, ce qui élimine toute possibilité de seconde zone de combustion liée à l'échauffement de l'obstacle, mais dans le cas de la flamme, il existe en plus des phénomènes de convection des phénomènes radiatifs dus aux radicaux libres dans le front de flamme.

Pour ce qui est de l'impact de flamme sur une paroi avec interaction entre le front de flamme et l'obstacle, quatre situations de flammes peuvent être observées (figure 3).

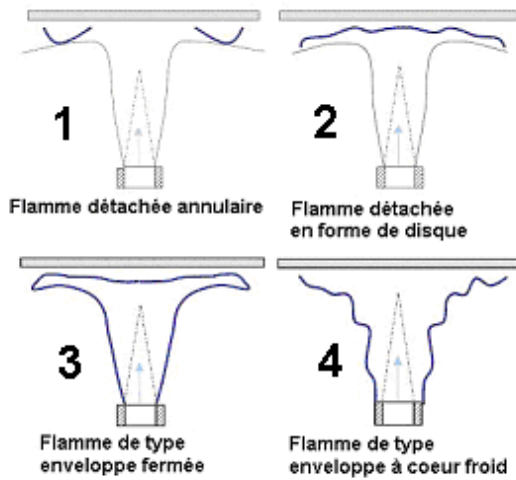


Fig. 3 – 4 types de flammes en impact sur une plaque plane

On trouve le front de flamme détaché du brûleur en forme de disque (2) et le front de flamme annulaire détaché du brûleur (1) sous des conditions riches ou à fort débit. La flamme de type enveloppe fermée (3) est observée pour des mélanges proches de la stoechiométrie, à faible nombre de Reynolds. La flamme de type enveloppe à coeur froid (4) s'observe lorsque la vitesse augmente, les gaz frais atteignent la température critique de plus en plus tard, l'enveloppe du front de flamme peut alors s'ouvrir. Alors, plus le nombre de Reynolds de l'écoulement est élevé, plus la zone centrale de la flamme est froide (sur une longueur croissant avec le nombre de Reynolds) et donc plus on s'éloigne du comportement d'un jet non réactif. Nous rencontrons des flammes de type 3 voire 4.

#### 2.4. Mécanismes de transferts thermiques

Pour ce qui est des flammes en impact, les causes d'élévation de température à la paroi pouvant être évoquées sont les suivantes :

**Transfert de chaleur de type convection forcée** : il y a élévation de température par conduction dans la couche limite thermique bordant le solide. Le temps caractéristique relativement lent est fonction de la conductivité de l'air dans la couche limite et de l'épaisseur de cette couche limite.

**Transfert de chaleur de type radiatif** : le rayonnement peut représenter aussi une part importante du flux total issu de la flamme vers la cible. Une flamme est un mélange gazeux contenant éventuellement des particules solides ou liquides. De tels milieux sont généralement considérés comme semi transparents du point de vue du rayonnement thermique, c'est-à-dire qu'un élément de volume de ces milieux émet, absorbe et diffuse du rayonnement. L'équation de transfert du rayonnement (4) donne l'évolution de la luminance monochromatique directionnelle le long de la trajectoire d'un rayonnement.

$$\frac{\partial L_v(s, u)}{\partial s} = -(\kappa_v(s) + \sigma_v(s))L_v(s, u) + \kappa_v(s)n^2.L_v^0(T(s)) + \frac{\sigma_v(s)}{4\pi} \cdot \int_{4\pi} P(s, u, u')L_v(s, u')d\Omega \quad (4)$$

Pertes par absorption et diffusion

Émission propre

Gain par diffusion [terme de diffusion constructive]

Avec  $P(s, u, u')$  = fonction de phase associée à la diffusion dans la direction  $u$  depuis un angle solide  $d\Omega$ , centrée autour d'une direction  $u'$ .  $\beta_v = \kappa_v(s) + \sigma_v(s)$  = coefficient d'extinction .

On distinguera le spectre de raie produit par des espèces telles que  $CO_2$ ,  $H_2O$ , OH,  $C_2$  ou CH. Ce type de rayonnement dépend de la composition, de la température des gaz, de la pression partielle des espèces, de la longueur d'onde d'émission de l'espèce, du libre parcours moyen... Par exemple, le spectre d'émission du  $CO_2$  et de  $H_2O$  ne se situe pas dans le visible mais dans l'infrarouge, et OH dans l'ultraviolet. Le spectre continu est une conséquence de la production de suies lors de la combustion. Ce type de transfert thermique pour une flamme

peut représenter une part non négligeable du flux total. Dans le bilan des échanges, il faut également tenir compte du rayonnement provenant de la paroi chauffée.

### 3. Moyens expérimentaux

#### 3.1. Brûleur de type bec Bunsen

L'admission des gaz frais s'effectue dans la partie basse du brûleur (fig. 4). Un empilement de billes de verre permet de briser les structures éventuellement produites par les systèmes en amont, et sert également de système de sécurité contre les retours de flamme. L'écoulement est ensuite orienté dans le sens longitudinal du brûleur au passage à travers un nid d'abeille ; il est enfin tranquilisé sur une longueur de 450mm environ avant d'être canalisé dans un convergent ayant un rapport de contraction égal à 4. Un dépôt de platine et de nickel est placé au bord de fuite du convergent et permet d'accrocher la flamme.

La flamme est obtenue à partir d'un prémélange propane-air réalisé en amont du brûleur. Deux montages ont été utilisés : le banc était initialement équipé de débitmètres à flotteur (génération 1). Pour l'évolution vers la génération 2, les débitmètres régulateurs utilisés sont des débitmètres massiques, les débits maxima atteints sont pour le propane de 1.5 Nm<sup>3</sup>/h (3.02g/s) et pour l'air de 20Nm<sup>3</sup>/h (7.18 g/s) ; et leur précision est de 0.9%. Ce montage permet d'obtenir des flamme de l'ordre d'une vingtaine de kW. Expérimentalement, on détermine pour la génération 2 le domaine de stabilité de la flamme dépendant des paramètres aérodynamiques, chimiques ; celui-ci est présenté figure 5.

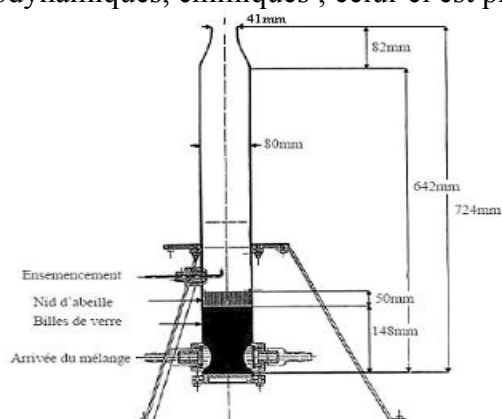


Fig. 4 – Schéma du brûleur

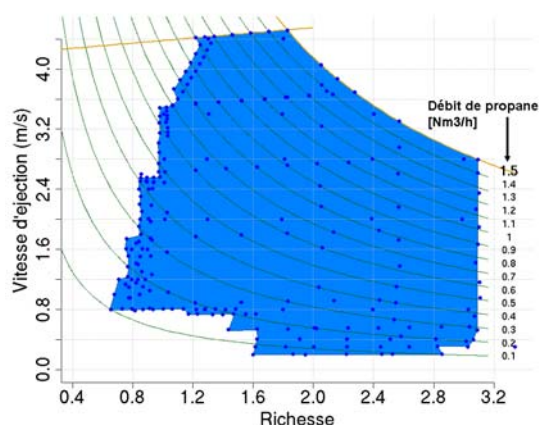
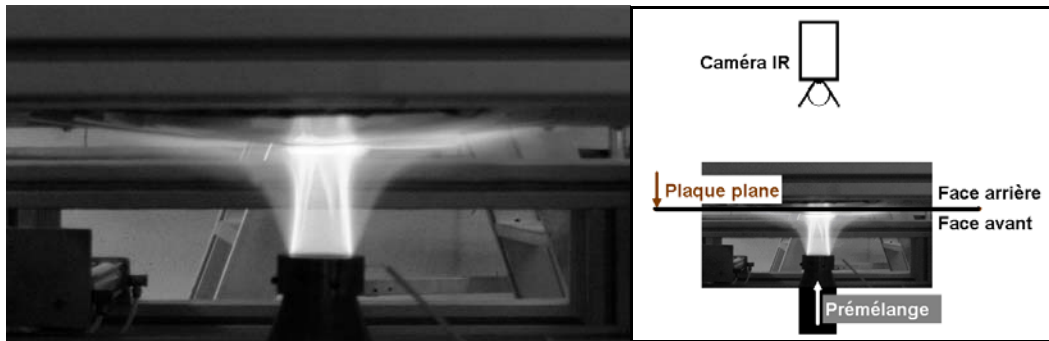


Fig. 5 – Domaines de fonctionnement  
Vitesse éjection (m/s) en fonction de richesse  
Courbes isodébit de C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> (entre 0.1 et 1.5 Nm<sup>3</sup>/h)

#### 3.2. Mesures par thermographie infrarouge.

Ne pouvant pas réaliser directement des cartographies du flux de chaleur dégagé par la flamme, des mesures de températures sont effectuées en face arrière de la paroi impactée. Une caméra de thermographie infrarouge détecte le rayonnement infrarouge et le convertit en un signal électronique qui est ensuite traité de façon à pouvoir produire des images de luminance et exécuter des calculs de température. Une loi d'étalonnage de la caméra, déterminée à partir d'un corps noir de référence, permet de calculer la température d'une surface en connaissant son émissivité. Cette technique présente l'avantage d'être non intrusive. Elle donne une cartographie 2D de la température en face arrière de la paroi d'impact au cours du temps. Il reste donc à remonter aux sources qui ont engendré ces champs de température.

L'exploitation de ces données se fait suivant une méthode de résolution des problèmes inverses (technique présentée par R. Loubat [1]).



**Fig 6 – Impact d'une flamme ( $r=1$  ; débit de prémélange= 5.68 g/s) et schéma d'une installation de mesure en face arrière**

Les résultats présentés (Tab. 1) ont été obtenus avec la première génération de débitmètres. Les différentes observations permises par le dispositif mis en place ont été réalisées avec des débits de prémélange compris entre 5.56g/s et 8.14g/s ; des richesses comprises entre 1.13 et 1.43, et des rapports H/d allant de 2.5 à 5. Elles permettent, en multipliant les configurations d'étude, de déterminer que la température maximale relevée et la densité de transfert de chaleur à l'impact maximum déterminé évoluent dans le même sens et décroissent quand le rapport H/d croit, et ce pour différentes configurations (richesse, débit, angle d'inclinaison de la plaque) ; qu'ils augmentent avec le débit total (qui est lié à la vitesse d'éjection), et qu'ils diminuent lors de l'introduction d'un angle d'inclinaison (on note en plus dans ce cas l'apparition d'un décalage de la zone de température maximale qui n'est plus centrée). Ces observations sont donc en accord avec celles réalisées par Hou et Ko [3]). Ces observations semblent de plus ne laisser apparaître que des flammes de type 3 suivant la classification donnée en figure 3.

| Épaisseur plaque (acier) | H/d | Angle d'inclinaison | Débit mélange [g/s] | Richesse | Flux maximum (W/cm <sup>2</sup> ) | Température maximale (°C) |
|--------------------------|-----|---------------------|---------------------|----------|-----------------------------------|---------------------------|
| 0.003                    | 3.5 | 0                   | 6.38                | 1.13     | 12                                | 690                       |
| 0.003                    | 2.5 | 0                   | 6.40                | 1.13     | 19                                | 730                       |
| 0.003                    | 5.0 | 0                   | 6.39                | 1.13     | 5                                 | 500 +                     |
| 0.003                    | 5.0 | 13                  | 6.38                | 1.13     | 3                                 | 450 +                     |
| 0.003                    | 5.0 | 13                  | 6.51                | 1.43     | 12                                | 660                       |
| 0.003                    | 5.0 | 0                   | 6.49                | 1.43     | 11                                | 640                       |
| 0.003                    | 3.5 | 0                   | 6.51                | 1.43     | 15                                | 690                       |
| 0.003                    | 3.5 | 0                   | 5.56                | 1.12     | 6                                 | 550                       |
| 0.003                    | 3.5 | 0                   | 8.14                | 1.20     | 20                                | 730                       |
| 0.005                    | 2.5 | 0                   | 6.39                | 1.13     | 18                                | 720                       |

*Remarque : sont suivies d'un + les valeurs pour lesquelles la stabilité n'a pas été atteinte*

**Tab 1 – Résultats obtenus suivant les configurations**

Dans la configuration présentée figure 7, un mélange de richesse 1.2 est éjecté à un débit de 8.14g/s et frappe normalement une plaque plane en acier d'une épaisseur de 3mm située à une hauteur de 3.5d de la buse (où d=41mm). Les cartographies 2D présentées sont évaluées au moment où le transfert de chaleur est maximal (soit environ 12.10<sup>4</sup>W/m<sup>2</sup> en face avant) et les températures sont indiquées en °C. Les relevés temporels gradués de 0 à 300s

représentent les évolutions au point pour lequel les échanges sont maxima ; la température atteinte est alors de 730°C. Il existe cependant une incertitude due à la dégradation de la peinture en face arrière en fin d'essai.

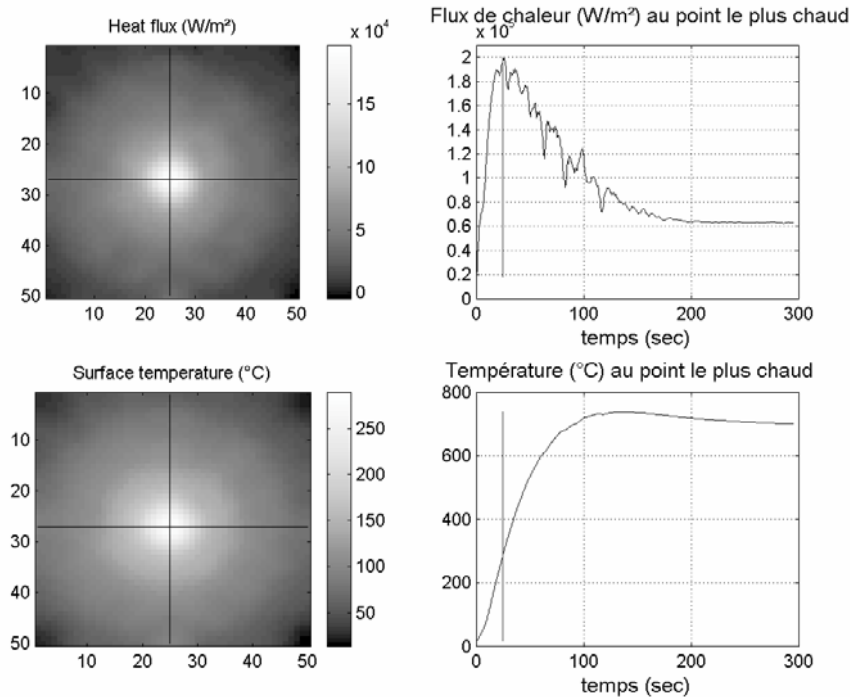


Fig. 7 - Mesure de flux surfacique (en haut à gauche), température de surface (en bas à gauche), et évolution temporelle (à droite)

## 4. Conclusion

Le domaine d'étude des transferts thermiques à l'impact de flamme est vaste. De nombreuses études ont été menées, parmi les plus récentes, Baukal et Gebhart [6], Dong, Cheung et Leung [2], Hou et Ko [3], Ayoola [5] et Chander et Ray [4]. Les expérimentations permettent de compléter ces études. Elles seront complétées par des mesures par Vélocimétrie par Images de Particules visant à caractériser la flamme utilisée du point de vue de sa structure afin de faire une comparaison avec une modélisation du phénomène réalisée à l'aide de la plateforme CEDRE de l'ONERA.

## Références

- [1] R.Loubat. Analyse des transferts de chaleur flamme paroi par méthode inverse. Thèse ENSAE, Ecole Doctorale Énergétique et Mécanique des Fluides, 416, 2005.
- [2] L.L.Dong, C.S.Cheung, and C.W.Leung. Heat transfer from an impinging butane/air slot flame jet. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45 :979-992, 2002.
- [3] S.S.Hou and Y.C.Ko. Effects of heating on flame appearance, temperature field and efficiency of an impinging laminar jet flame used in domestic gas stoves. *Energy Conversion and Management*, 45 (9-10) :1583-1595, 2004.
- [4] S. Chander and A. Ray. Flame impingement heat transfer: a review. *Energy conversion and Management*, 46(18-19):2803-2837, 2005.
- [5] B.O.Ayoola, R.Balachandran, J.H.Frank, E.Mastorakos, and C.F.Kaminski. Spatially resolved heat release rate measurements in turbulent premixed flames. *Combustion and flame*, 144(1-2), 2006.
- [6] C.E.Baukal and B.Gebhart. Heat transfer from oxygen-enhanced/natural gas flames impinging normal to a plane surface. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 16: 247-259, 1998.