



**HAL**  
open science

# Développement d'un diagnostic acoustique pour la détermination des fluctuations du taux de dégagement de chaleur dans des flammes pulsées

Jingxuan Li, Franck Richecoeur, Thierry Schuller

► **To cite this version:**

Jingxuan Li, Franck Richecoeur, Thierry Schuller. Développement d'un diagnostic acoustique pour la détermination des fluctuations du taux de dégagement de chaleur dans des flammes pulsées. CFM 2011 - 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. hal-03421326

**HAL Id: hal-03421326**

**<https://hal.science/hal-03421326v1>**

Submitted on 9 Nov 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Développement d'un diagnostic acoustique pour la détermination des fluctuations du taux de dégagement de chaleur dans des flammes pulsées

Jingxuan Li, Franck Richecoeur, Thierry Schuller

. Laboratoire EM2C, CNRS et Ecole Centrale Paris, 92295 Châtenay-Malabry, France.

## Résumé :

*Les fluctuations du taux de dégagement de chaleur sont à l'origine d'instabilités de combustion qui posent des problèmes récurrents dans de nombreux foyers. Ces quantités sont difficiles à mesurer et des techniques optiques sont généralement mises en oeuvre. Les premières validations d'une méthode alternative sont présentées dans le cas de flammes laminaires prémélangées pulsées. La technique repose sur la détermination du temps de vol d'ondes ultrasonores qui traversent l'écoulement. Le lien entre les fluctuations du taux de dégagement de chaleur et du temps de vol des ondes sonores est établi. Des mesures réalisées avec cette méthode sont comparées à des mesures optiques et un modèle analytique. Un bon accord est obtenu pour le gain et la phase de la fonction de transfert de la flamme soumise à des modulations harmoniques de l'écoulement. Ces travaux permettent de valider le principe de la technique proposée et posent les bases des développements futurs.*

## Abstract :

*Heat release rate fluctuations are the source of combustion instabilities that cause recurrent problems in many combustors. These quantities are difficult to measure and optical techniques are generally implemented. The initial validation of an alternative method is presented in the case of pulsated laminar premixed flames. The technique relies on determining the travel time of ultrasonic waves propagating through the flow. The link between heat release rate fluctuations and perturbations of sound waves is established. Measurements made with this method are compared with optical measurements and an analytical model. A good agreement is obtained for the gain and phase of the transfer function of the flame subjected to harmonic modulation of the flow. This work validates the principle of the proposed technique and lays the foundations for future developments.*

**Mots clefs :** ultrasons, flamme, diagnostics

## 1 Introduction

Les fluctuations du taux de dégagement de chaleur sont souvent responsables d'intensification des flux thermiques aux parois, de vibrations et d'émissions sonores qui peuvent éventuellement dégénérer en instabilités thermo-acoustiques et provoquer un vieillissement prématuré de certains éléments de la chambre de combustion, voire des dégâts plus importants sur l'installation [1]. Ces perturbations sont difficiles à mesurer dans les foyers car il n'existe pas de diagnostic qui permette de directement accéder au taux de dégagement de chaleur.

Des méthodes optiques sont généralement mises en oeuvre au niveau du laboratoire. Elles reposent sur l'exploitation du signal de chimiluminescence de la flamme ou sur des diagnostics plus complexes avec l'utilisation de techniques basées sur la fluorescence induite par laser. Ces dernières sont lourdes à mettre en oeuvre. Elles sont encore au stade de développement et les mesures résolues en temps sont limitées par la puissance et la cadence du laser ou des caméras [2, 3]. L'exploitation du signal de chimiluminescence reste l'outil privilégié pour analyser les perturbations du taux de dégagement de chaleur.

Si son interprétation est relativement aisée pour des flammes prémélangées dans des milieux optiquement minces, l'analyse de configurations partiellement prémélangées ou non-prémélangées, l'évolution du signal avec l'étirement, la pression et la composition des gaz reste un champ d'investigation très actif [4, 5, 6, 7]. Il est donc intéressant d'explorer des solutions alternatives notamment lorsque l'accès optique à la chambre de combustion est réduit comme sur les installations pratiques.

L'objectif de cette étude est de proposer une méthode basée sur l'exploitation du temps de vol d'ondes ultrasonores qui traversent l'écoulement pour accéder aux fluctuations du taux de dégagement de chaleur d'une flamme perturbée. L'utilisation d'ondes ultrasonores pour sonder les écoulements est très répandue. Cette technique n'a cependant pas été envisagée jusqu'ici pour accéder aux taux de dégagement de chaleur. Ces ondes offrent des caractéristiques intéressantes puisqu'elles ne perturbent pas la dynamique de la combustion [8]. Elles peuvent cependant être diffractées par des flammes turbulentes ce qui peut potentiellement réduire le rapport signal sur bruit de la technique proposée.

Le principe de la méthode est présenté dans la section 2. Un lien théorique est établi entre les fluctuations du taux de dégagement de chaleur et du temps de vol d'ondes ultrasonores ayant traversées des flammes prémélangées laminaires coniques soumises à des modulations harmoniques de l'écoulement amont. Le dispositif expérimental servant à valider les prévisions est décrit dans la section 3. Des mesures acoustiques et optiques du taux de dégagement de chaleur sont confrontées à des prévisions théoriques dans la section 4. Ces éléments sont utilisés pour déterminer la sensibilité de la méthode acoustique et les progrès futurs à réaliser.

## 2 Modélisation du temps de vol et du taux de dégagement de chaleur

On envisage dans cette étude uniquement des flammes laminaires prémélangées soumises à des modulations de vitesse dont le mélange est maintenu à richesse constante. La longueur d'onde des perturbations envisagées étant grande devant l'épaisseur du front de flamme, celui-ci peut être considéré comme une interface fine séparant le mélange réactif des produits de combustion. Le front de flamme se propage dans ses conditions à la vitesse de flamme  $S_L$  et les effets d'étirement et de courbure sont négligés dans notre étude. Des approximations successives sont menées ci-dessous permettant d'aboutir à une expression analytique du taux de dégagement de chaleur en fonction du temps de vol d'ondes ultrasonores. Certaines hypothèses sont discutables, mais ces développements offrent un cadre théorique simple pour tester les effets des différents paramètres afin de valider la technique proposée. Cette analyse est ensuite complétée par une validation expérimentale indépendante basée sur une technique optique classique.

On considère dans un premier temps une configuration avec deux gaz homogène et on s'intéresse au cas d'une onde sonore se propage dans un mélange de gaz frais caractérisé par une célérité  $c_u$  sur une distance  $L - L_f$  et des gaz brûlés sur une distance  $L_f$  caractérisés par une célérité  $c_b$ . Cette situation est représentée à la Fig. 1 et on suppose que la flamme à l'interface entre les gaz frais et brûlés est fine. Dans cette situation, le temps de vol  $\Delta t$  pour parcourir la distance  $L$  entre l'émetteur et le récepteur prend la forme :

$$\Delta t = \frac{L - L_f}{c_u} + \frac{L_f}{c_b} = \Delta t_0 - \frac{L_f}{c^*} \quad (1)$$

où  $\Delta t_0$  est le temps de vol pour parcourir la distance  $L$  quand il n'y a qu'un mélange de gaz frais et  $c^* = c_b c_u / (c_b - c_u)$  est une vitesse du son effective.

On examine désormais une situation avec des perturbations du taux de dégagement de chaleur dont la fréquence reste faible devant l'inverse du temps de vol  $f \Delta t \ll 1$ . La situation apparaît donc figée pour les ultrasons qui traversent la flamme perturbée. Ces perturbations résultent des ondulations du front de flamme qui se déforme sous l'action de la modulation du champ de vitesse [1]. Les perturbations de la position du front de flamme  $L'_f$  induisent indirectement des modifications du temps de vol :

$$\Delta t' = - \frac{L'_f}{c^*} \quad (2)$$

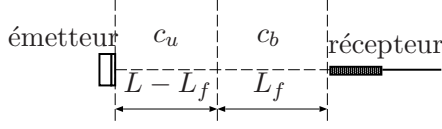


FIGURE 1 – Schématisation de deux différents milieux homogènes entre l'émetteur et le récepteur

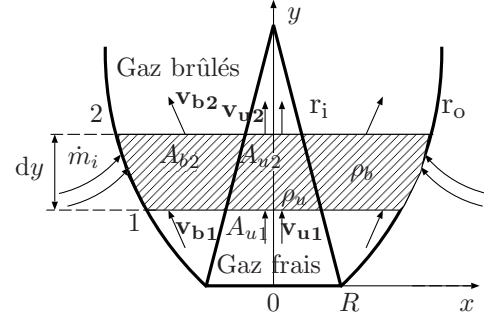


FIGURE 2 – Schéma d'une flamme de prémélange conique entourée de gaz brûlés.

Dans cette expression seules les perturbations du chemin acoustique sont considérées, les fluctuations de la température et de la composition des gaz frais et brûlés sont négligées. Cette approximation est valable tant que les perturbations de la célérité effective restent faibles ( $c^*/\bar{c}^* \ll 1$ ). On examine plus spécifiquement le cas d'une flamme conique stabilisée sur un brûleur axisymétrique présenté à la Fig. 4 qui sert à valider le principe de la technique. Dans cette situation des ondes ultrasonores traversent un mélange de gaz réactifs entouré d'un panache de gaz brûlés au contact de l'air ambiant. Un émetteur et un récepteur d'onde ultrasonores sont disposés autour du brûleur. On suppose de plus que le mélange combustible est injecté à la même température que l'air ambiant et qu'il est suffisamment dilué par l'azote pour considérer que la célérité de l'air ambiant et dans le mélange frais sont identiques  $c_u = c_0$ . Le chemin couvert par les ondes ultrasonores dans les gaz brûlés vaut dans ces conditions  $L_f = 2(r_0 - r_i)$ , où  $r_0$  est le rayon du panache des gaz brûlés et  $r_i$  la position correspondante du front de flamme. Une vue détaillée est représentée à la Fig. 2.

En considérant uniquement des quantités moyennées sur les surfaces de contrôle, un bilan de masse sur le volume de contrôle grisé de la Fig. 2 d'épaisseur élémentaire  $dy$  suivant la direction axiale permet d'obtenir une relation entre le rayon  $r_i$  de la flamme et celui des gaz brûlés  $r_0$  à l'instant  $t$ . Les quantités instantanées  $a(t)$  sont décomposées en leur moyenne sur une période et une perturbation  $a(t) = \bar{a} + a'$  où  $a'/\bar{a} \ll 1$ . En régime stationnaire, il vient :

$$\bar{\rho}_b \bar{v}_b (\bar{r}_0^2 - \bar{r}_i^2) - \bar{\rho}_u \bar{v}_u (R^2 - \bar{r}_i^2) = 0 \quad (3)$$

Dans cette expression la surface de contrôle latérale est supposée imperméable ( $\dot{m}_i = 0$ ). Les vitesses  $v_u$  et  $v_b$  correspondent aux composantes axiales du champ de vitesse  $\mathbf{v}$  dans les gaz frais et brûlés respectivement. Pour des perturbations du front de flamme dont la longueur d'onde est importante devant la taille  $dy$ , une analyse au premier ordre du bilan de masse permet d'établir l'expression suivante entre les fluctuations de la position du front de flamme  $r_i'$  et celles des gaz brûlés  $r_0'$  :

$$\bar{\rho}_b \bar{v}_b (\bar{r}_0 r_0' - \bar{r}_i r_i') + \bar{\rho}_u \bar{v}_u \bar{r}_i r_i' = 0 \quad (4)$$

Cette expression est valable tant que les fluctuations de vitesse restent faibles devant la vitesse de l'écoulement  $v'/v \ll 1$  et les fluctuations de densité dans les gaz frais et les gaz brûlés peuvent être négligées devant l'effet de la perturbation du front de flamme. Le lien entre la vitesse des gaz brûlés et des gaz frais pour une flamme conique inclinée d'un angle  $\alpha$  étant connu  $\bar{v}_b/\bar{v}_u = 1 + (\rho_u - \rho_b)/\rho_u \sin^2 \alpha$  [9], il est alors possible d'exprimer les liens entre les positions :

$$\bar{r}_0^2 = \Gamma \bar{r}_i^2 + (1 - \Gamma) R^2 \quad \text{et} \quad r_0' = \Gamma \frac{\bar{r}_i}{\bar{r}_0} r_i' \quad (5)$$

où  $\Gamma = 1 - (\rho_u/\rho_b)[1 + (\rho_u/\rho_b) \sin^2 \alpha]^{-1}$  est fixé pour un point de fonctionnement donné.

Il est maintenant nécessaire de disposer d'un modèle permettant de décrire l'évolution des perturbations de la position du front de flamme en fonction de la modulation de vitesse imposée. La solution à ce problème a fait l'objet de nombreux travaux [10, 11]. Pour une flamme inclinée, elle prend la forme

d'une équation de transport pour les perturbations normales au front de flamme qui sont advectées par l'écoulement moyen parallèle au front [12] :

$$\frac{\partial r'_i}{\partial t} + \bar{v}_u \cos^2 \alpha \frac{\partial r'_i}{\partial y} = v'_u \tan \alpha \quad (6)$$

Les expériences réalisées sur des flammes laminaires coniques soumises à des modulations harmoniques montrent que la perturbation du champ de vitesse correspond essentiellement à une onde convective de la forme  $v'_u(y, t) = \tilde{v}_u \exp(-i\omega t + ik y)$  où le nombre d'onde  $k = \omega/\bar{v}_u$  est basé sur la vitesse de l'écoulement moyen  $\bar{v}_u$  et  $\omega = 2\pi f$  est la fréquence angulaire de modulation. La modulation étant harmonique, la réponse  $r'_i$  est également harmonique  $r'_i(y, t) = \tilde{r}_i(y) \exp(-i\omega t)$ . En injectant cette expression dans l'équation précédente, il vient [11] :

$$\tilde{r}_i(y) = \frac{\tilde{v}_u}{\bar{v}_u} \frac{1}{ik \sin \alpha \cos \alpha} \left[ \exp\left(\frac{iky}{\cos^2 \alpha}\right) - \exp(iky) \right] \quad (7)$$

Le taux de dégagement de chaleur est donné par  $\dot{Q} = \int_A \rho_u S_L \Delta q dA$  où  $A$  correspond à la surface de flamme et  $\Delta q$  au dégagement de chaleur par unité de masse de mélange. Pour une flamme maintenue à richesse constante, les perturbations du taux de dégagement de chaleur correspondent uniquement à des fluctuations de la surface de flamme  $A' = \tilde{A} \exp(-i\omega t)$  [12]. En intégrant l'expression précédente le long du front de flamme et en négligeant le mouvement à la base de la flamme, il vient [11] :

$$\frac{\tilde{\dot{Q}}}{\overline{\dot{Q}}} = \frac{\tilde{A}}{\bar{A}} = \frac{\tilde{v}_u}{\bar{v}_u} \frac{2}{\omega_*^2 \sin^2 \alpha} \left[ 1 - \exp(i\omega_*) + \frac{\exp(i\omega_* \cos^2 \alpha) - 1}{\cos^2 \alpha} \right] \quad (8)$$

Les perturbations de la position du front de flamme et de l'interface entre les gaz brûlés et l'air ambiant induisent des perturbations harmoniques du temps de vol  $\Delta t' = \tilde{\Delta t} \exp(-i\omega t)$  :

$$\frac{\tilde{\Delta t}}{\overline{\Delta t} - \Delta t_0} = \frac{\tilde{r}_0 - \tilde{r}_i}{\bar{r}_0 - \bar{r}_i} \quad (9)$$

En plaçant l'émetteur et le récepteur d'onde ultrasonores à mi-hauteur de la flamme  $y = H/2 = R/\tan \alpha$ , et en combinant les expressions Eqs. (5), (7), (8) et (9) on obtient le lien entre les fluctuations du taux de dégagement de chaleur et du temps de vol :

$$\mathcal{H} = \frac{\tilde{\dot{Q}}/\overline{\dot{Q}}}{\tilde{\Delta t}/(\overline{\Delta t} - \Delta t_0)} = \frac{(4 - 3\Gamma)^{1/2} - 1}{\Gamma(4 - 3\Gamma)^{-1/2} - 1} \times \frac{i}{\omega_*} \frac{[1 - \exp(i\omega_*)] \cos^2 \alpha + \exp(i\omega_* \cos^2 \alpha) - 1}{\exp(1/2i\omega_*) - \exp(1/2i\omega_* \cos^2 \alpha)} \quad (10)$$

On voit en particulier que cette relation dépend du point de fonctionnement au travers du premier groupement ( $\Gamma$ ), de la géométrie de la flamme ( $\alpha$ ) et de la fréquence réduite  $\omega_* = \omega R/(S_L \cos \alpha)$ .

### 3 Dispositif expérimental

Les mesures sont réalisées sur un brûleur équipé d'un convergent de diamètre de sortie  $D = 20$  mm. Des flammes coniques laminaires stabilisées sur les lèvres du brûleur sont soumises à des modulations harmoniques de l'écoulement grâce à un haut-parleur  $L_2$  placé au fond de celui-ci. Un train d'onde, illustré à la Fig. 3, est généré par un synthétiseur de signal. Ce signal est amplifié puis transmis à l'espace grâce à un tweeter  $L_1$  situé sur un des cotés du brûleur en regard de la flamme. Les ondes sonores avant et après leur passage dans la flamme sont enregistrées par les microphones  $M_1$  et  $M_2$ , B&K 4938, qui sont alignés sur une ligne de visée qui passe par l'axe de symétrie du brûleur. Ces signaux sont ensuite amplifiés, filtrés et traités pour construire la corrélation croisée entre les signaux incident et transmis. Chaque train d'impulsion correspond à un signal de type "chirp" d'amplitude constante modulé en fréquence sur une bande  $B$  pendant une durée  $\tau$ . Cette technique permet d'obtenir un pic très étroit pour la corrélation entre le signal incident et transmis correspondant au temps de vol

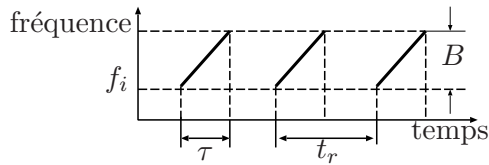


FIGURE 3 – Schéma d'une séquence de "chirps".

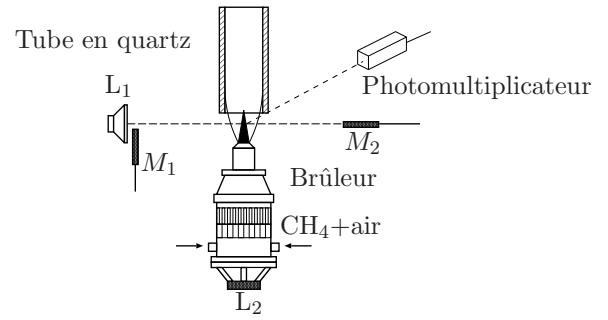


FIGURE 4 – Schéma du dispositif expérimental.

recherché. Si le temps de répétition  $t_r$  entre les paquets d'ondes est suffisamment grand devant le temps de vol recherché  $\Delta t$ , la résolution temporelle de la méthode augmente avec le facteur de compression  $B\tau$  [13]. Les paramètres utilisés dans cette étude pour la technique de compression d'impulsion sont  $f_i = 20$  kHz,  $B = 20$  kHz,  $\tau = 0.8$  ms and  $t_r = 1.0$  ms.

La vitesse de l'écoulement en l'absence et en présence de modulation de l'écoulement est mesurée par un fil chaud au niveau de la section de sortie du brûleur (et en l'absence de combustion). Un tube en quartz d'un diamètre de 50 mm et d'une hauteur de 300 mm est également utilisé pour confiner partiellement les gaz brûlés et limiter les effets de flottabilité [14]. Un photomultiplicateur PM est également utilisé pour enregistrer le signal de chimiluminescence émis par la flamme. Pour des flammes parfaitement prémélangées et en l'absence de perturbations de la composition du mélange, les fluctuations de l'émission lumineuse  $I$  des radicaux  $\text{CH}^*$ ,  $\text{OH}^*$  ou  $\text{C}_2^*$  présents dans le front de flamme sont proportionnelles aux perturbations du taux de dégagement de chaleur [4]

$$\dot{Q}'/\bar{Q} = I'/\bar{I} \quad (11)$$

En utilisant, le signal d'émission lumineuse et les mesures réalisées avec les microphones, il est possible de reconstruire la fonction  $\mathcal{H}$  expérimentalement et de comparer les résultats aux prévisions de l'Eq. (10).

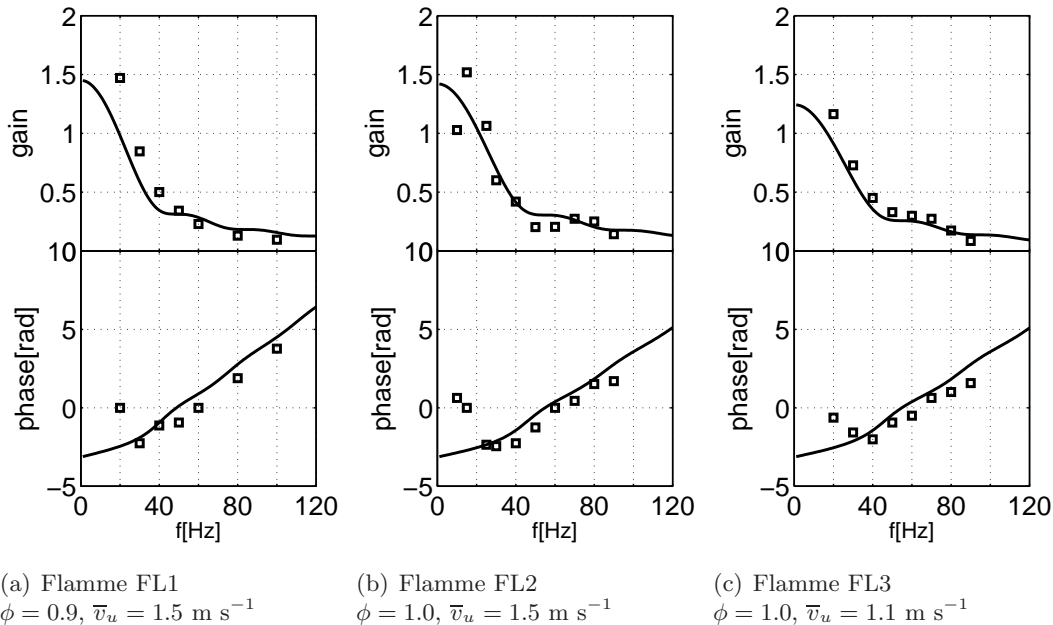


FIGURE 5 – Comparaison entre les prévisions analytiques et les résultats expérimentaux pour la fonction de transfert  $\mathcal{H}$  en fonction de la fréquence de modulation  $f$ ,  $v_{urms}/\bar{v}_u = 0.07$ .

## 4 Résultats

Les résultats sont présentées sur la Fig. 5 pour trois flammes méthane/air de richesse  $\phi$  et vitesse débitante  $\bar{v}_u$  différentes : FL1,  $\phi = 0.9$ ,  $\bar{v}_u = 1.5 \text{ m s}^{-1}$ ,  $H = 42 \text{ mm}$ , FL2,  $\phi = 1.0$ ,  $\bar{v}_u = 1.5 \text{ m s}^{-1}$ ,  $H = 38 \text{ mm}$  et FL3,  $\phi = 1.0$ ,  $\bar{v}_u = 1.1 \text{ m s}^{-1}$ ,  $H = 26 \text{ mm}$ . La fréquence de modulation couvre 20 à 100 Hz dans ces expériences et le niveau est fixé à  $v_{u,rms}/\bar{v}_u = 0.07$ . Un bon accord sur le gain  $G = |\mathcal{H}|$  et la phase  $\varphi = \arg(\mathcal{H})$  entre les prévisions et les mesures est trouvé, sauf à basse fréquence où les effets de flottabilité viennent fortement perturber le signal acoustique.

## 5 Conclusions

Les premières validations d'une technique de mesure acoustique des fluctuations du taux de dégagement de chaleur ont été menées sur des flammes prémélangées coniques soumises à des modulations de l'écoulement. Les résultats sont encourageants. Un modèle a également été développé qui permet de tester et valider différentes approximations pour traiter le signal acoustique et en extraire les fluctuations du taux de dégagement de chaleur. Des travaux sont en cours pour valider la technique dans des configurations plus complexes.

## Références

- [1] Candel, S., 2002. "Combustion dynamics and control : Progress and challenges". *Proc. Combust. Inst.*, **29**(1), pp. 1 – 28.
- [2] Fayoux, A., Zähringer, K., Gicquel, O., and Rolon, J., 2005. "Experimental and numerical determination of heat release in counterflow premixed laminar flames". *Proc. Combust. Inst.*, **30**(1), pp. 251 – 257.
- [3] Ayoola, B., Balachandran, R., Frank, J., Mastorakos, E., and Kaminski, C., 2006. "Spatially resolved heat release rate measurements in turbulent premixed flames". *Combust. Flame*, **144**(1-2), pp. 1 – 16.
- [4] Price, R., Hurle, I., and Sugden, T., 1969. "Optical studies of the generation of noise in turbulent flames". *Symposium (International) on Combustion*, **12**(1), pp. 1093 – 1102.
- [5] Higgins, B., McQuay, M. Q., Lacas, F., and Candel, S., 2001. "An experimental study on the effect of pressure and strain rate on ch chemiluminescence of premixed fuel-lean methane/air flames". *Fuel*, **80**(11), pp. 1583 – 1591.
- [6] Hardalupas, Y., and Orain, M., 2004. "Local measurements of the time-dependent heat release rate and equivalence ratio using chemiluminescent emission from a flame". *Combust. Flame*, **139**(3), pp. 188 – 207.
- [7] Lauer, M., and Sattelmayer, T., 2010. "On the adequacy of chemiluminescence as a measure for heat release in turbulent flames with mixture gradients". *J. Eng. Gas Turbines Power*, **132**(061502), pp. 1–8.
- [8] Lieuwen, T., 2001. "Theory of high frequency acoustic wave scattering by turbulent flames". *Combust. Flame*, **126**(1-2), pp. 1489 – 1505.
- [9] Jarosinski, J., and Bernard, 2008. *Combustion phenomena : selected mechanisms of flame formation, propagation, and extinction*. CRC Press, New York, pp. 68–69.
- [10] Fleifil, M., Annaswamy, A. M., Ghoneim, Z. A., and Ghoniem, A. F., 1996. "Response of a laminar premixed flame to flow oscillations : A kinematic model and thermoacoustic instability results". *Combust. Flame*, **106**(4), pp. 487 – 510.
- [11] Schuller, T., Durox, D., and Candel, S., 2003. "A unified model for the prediction of laminar flame transfer functions : comparisons between conical and v-flame dynamics". *Combust. Flame*, **134**(1-2), pp. 21 – 34.
- [12] Ducruix, S., Durox, D., and Candel, S., 2000. "Theoretical and experimental determinations of the transfer function of a laminar premixed flame". *Proc. Combust. Inst.*, **28**(1), pp. 765 – 773.
- [13] Klauder, J., Price, A. C., Darlington, S., and Albersheim, W. J., 1960. "The theory and design of chirp radars". *The bell system technical journal*, **39**(4), July, pp. 745–808.
- [14] Kizirnis, S. W., Brecha, R. J., Ganguly, B. N., Goss, L. P., and Gupta, R., 1984. "Hydroxyl (OH) distributions and temperature profiles in a premixed propane flame obtained by laser deflection techniques". *Appl. Opt.*, **23**, pp. 3873–3880.