

Influence des conditions aux limites acoustiques sur le bruit de combustion en configuration confinée

Ammar Lamraoui,
Franck Richecoeur,
Thierry Schuller,
Sébastien Ducruix
Laboratoire EM2C
CNRS
Ecole Centrale Paris
92295 Châtenay Malabry CEDEX
E-mail : sebastien.ducruix@ecp.fr

Résumé

Le bruit de combustion est étudié sur un brûleur de 40 kW composé de deux étages identiques alimentés avec de l'air et du propane. Le but de l'étude est de caractériser le bruit de combustion en fonction de l'impédance acoustique amont du brûleur et des conditions d'injection (la richesse, l'étagement et le débit d'air total). Dans un montage expérimental de haute puissance, le couplage entre la combustion et l'acoustique peut facilement générer une forte instabilité. L'amplitude et la fréquence de ces instabilités dépendent des points de fonctionnement, mais aussi des conditions aux limites acoustiques, ce dernier point est un problème rarement étudié. Les travaux présentés dans cet article montrent que le point de fonctionnement et les conditions aux limites en entrée de brûleur peuvent être ajustés afin de créer les meilleures conditions expérimentales pour l'étude de bruit de combustion.

Abstract

Combustion noise is experimentally investigated on a 40 kW burner composed of two identical stages fed with air and propane. The purpose of the study is to characterize combustion noise depending on the boundary impedances and injection conditions (i.e. staging ratio, equivalence ratio and air mass flow rate). Noise study can only be accurately performed if the test bench provides a broadband spectral sound emission. However in such laboratory high power experiment, combustion and acoustics may easily couple to generate strong instabilities. The amplitude and frequency of these instabilities depend on the operating points but also on the acoustic boundary conditions, an issue that is rarely investigated. Work presented in this paper shows that operating point and inlet boundary conditions can be adjusted to create the best experimental conditions for investigation of combustion noise.

Le bruit produit par les moteurs d'avions au décollage et à l'atterrissage représente une nuisance sonore extrêmement gênante pour les riverains, une question qui est devenue récemment d'une importance particulièrement cruciale. Pendant de nombreuses années, le bruit de combustion a été étudié d'un point de vue fondamental, principalement dans des situations non confinées [1-4]. Dans les situations confinées, le bruit large bande émis par les flammes stables est bien moins documenté [5]. Cela est principalement dû au fait qu'il est très difficile de construire des conditions acoustiques propres dans les brûleurs, ce qui génère un fort couplage entre la flamme et les modes acoustiques de la chambre de combustion susceptible de provoquer la destruction du moteur ou de l'installation expérimentale. Ces instabilités sont étudiées depuis une cinquantaine d'années et les mécanismes de couplage sont maintenant pour la plupart connus [6]. Il a été montré récemment par Tran et al. [7] que faire varier la condition acoustique amont du brûleur est une méthode très efficace pour amortir les instabilités de combustion et créer des conditions idéales pour l'étude du bruit de combustion. Ce système original de contrôle passif utilisé dans cette étude est décrit dans la suite du document. L'influence d'une condition acoustique amont bien adaptée sur les émissions sonores dans l'injecteur et la chambre est ensuite présentée. Le banc d'essai, les différents

diagnostics utilisés pour enregistrer les fluctuations de pression et les oscillations du taux de dégagement de chaleur sont tout d'abord décrits. Le banc est un brûleur à flamme stabilisée par *swirl* (écoulement tourbillonnaire), connecté à une chambre de combustion rectangulaire, équipé de ports à microphone pour les mesures acoustiques. Ce banc est représentatif des systèmes de combustion utilisés dans les turbines à gaz (aéronautique, génération d'électricité). Un photomultiplicateur muni d'un filtre bien choisi mesure l'émission spontanée du radical CH^* qui est fortement corrélée aux fluctuations du taux de dégagement de chaleur de la flamme. Plusieurs microphones sont utilisés pour mesurer les fluctuations de pression dans le système d'injection et la chambre de combustion. Une étude systématique des points de fonctionnement du brûleur est effectuée afin d'identifier les régimes les plus stables. Des analyses spectrales des signaux de pression et de dégagement de chaleur sont conduites pour diverses impédances amont et paramètres d'injection. Le présent article montre l'influence de paramètres essentiels comme la richesse en combustible et la répartition de celui-ci entre les différents étages (étagement) sur le comportement du banc d'essai. Ces résultats sont utilisés pour sélectionner les points de fonctionnement optimaux pour l'étude du bruit de combustion.

Le banc expérimental

L'installation expérimentale (Figure 1) comprend un brûleur à combustion partiellement prémélangée, connecté à une chambre de combustion rectangulaire de 50 cm de long avec une section carrée de 10x10 cm². Le système d'injection est composé de deux étages identiques dans lequel les injections tangentielles de l'air et du propane créent un fort écoulement tournant, ou *swirl* en anglais (nombre de *swirl* supérieur à 0,6) dans un canal d'injection de diamètre $D = 30$ mm. Le brûleur fonctionne en combustion pauvre en combustible (richesse entre 0,7 et 0,95). L'injecteur est relié à la chambre de combustion par le biais d'une jonction en céramique, avec une importante variation de section ($S_2/S_1 = 14$ avec S_1 section de l'injecteur et S_2 de la chambre). La chambre est composée de deux hublots en quartz de chaque côté et des parois en béton réfractaire en haut et en bas. La plaque supérieure est équipée de trois emplacements espacés régulièrement pour les mesures acoustiques (M5, M6 et M7) à l'intérieur de la chambre.

dans la figure 1. Le flux de gaz chauds de l'installation est ensuite recueilli par un large diffuseur. Cette configuration peut présenter de fortes instabilités de combustion en fonction de l'étagement.

Un tube photomultiplicateur (TPM), équipé d'un filtre à bande étroite centrée sur $\lambda = 431$ nm détecte les émissions spontanées du radical CH^* par la flamme, afin d'estimer les fluctuations du taux de dégagement de chaleur. Les microphones sont montés sur des guides d'ondes refroidis à l'eau, et leurs signaux sont corrigés pour tenir compte du délai induit par le montage. Les microphones M1, M2 et M3 sont utilisés pour mesurer le coefficient de réflexion acoustique R en amont du brûleur [9] et le flux acoustique à l'intérieur du brûleur à travers la section S_1 [10]. Les microphones M6 et M7 placés dans la zone des gaz chauds sont utilisés pour estimer le flux acoustique à travers la sortie de la chambre S_2 selon la même méthode. Ces reconstructions nécessitent un étalonnage en gain et en phase des micros (B&K type 4938 1/4 ") et le recours à une technique de permutation des capteurs. Le microphone M5 est placé juste au-dessus

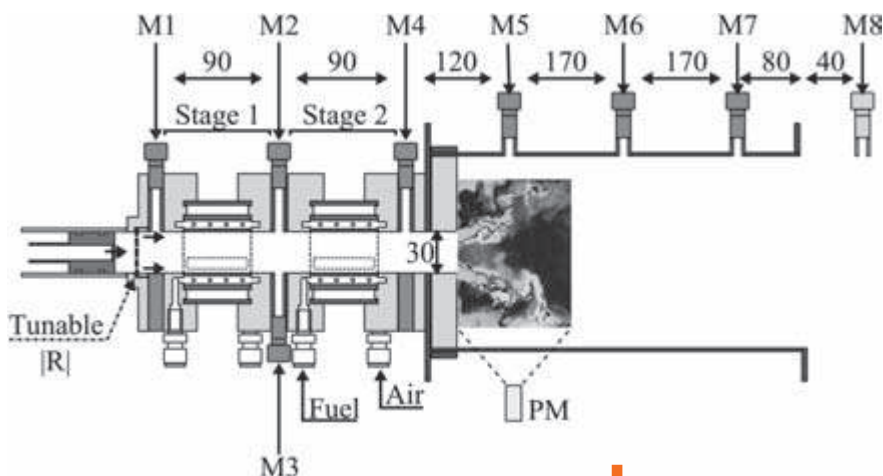


Fig. 1 : Schéma détaillé du brûleur EC2. Un piston mobile est ajusté afin de contrôler l'impédance amont. L'air et le combustible sont injectés dans les deux étages équipés de microphones
Schematic view of the EC2 burner with detailed injection head. A mobile piston is adjusted to control the input impedance. Fuel and air are injected through two successive stages equipped with microphones

Comme esquissé dans la figure 1, l'injecteur est également équipé de ports à microphone sur chaque étage (M1, M2 et M4) afin de caractériser la propagation acoustique. L'étagement est défini comme le ratio du débit masse de carburant alimentant le premier étage (le plus éloigné de la chambre) à la masse totale de carburant injecté [8]. En pratique, ce paramètre varie entre 10% et 55%, car on risque au-delà de cette valeur un retour de flamme et une destruction de l'injecteur. Pour éviter cette situation, une petite quantité d'air est injectée axialement de la partie arrière du brûleur, cette injection correspond à une petite fraction de la masse totale injectée tangentiellement (??2,5%). La flamme a une forme de cône inversé autour d'une forte recirculation centrale, un aspect typique des configurations stabilisées par *swirl* (Figure 2). La flamme est compacte (environ 15 cm de long) et ses dimensions sont données à l'échelle avec la géométrie du brûleur

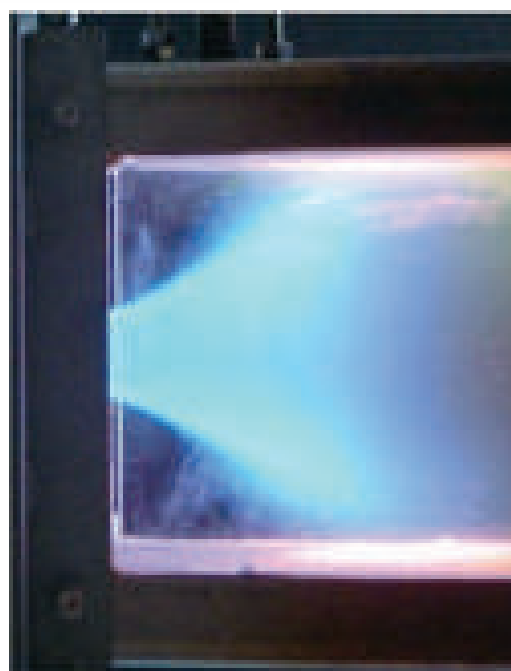


Fig. 2 : Typical swirl-stabilized flame shape
Forme typique d'une flamme stabilisée par swirl

de la zone de combustion afin de corrélérer le signal de pression avec le signal recueilli par le photomultiplicateur. Dans cette région les oscillations de la pression peuvent être considérées comme étant presque uniformes, car la flamme est petite comparée à la longueur d'onde des ondes acoustiques étudiées (hypothèse de compacité). Les acquisitions sont réalisées pendant 16 s, à une fréquence d'échantillonnage $f_s = 16\,384$ Hz afin d'assurer la convergence statistique des opérateurs d'analyse spectrale. La condition amont est une plaque perforée de 1 mm d'épaisseur, munie d'une cavité amont dont la profondeur L est contrôlée par un piston et peut être modifiée de 0 à 50 cm. L'air pénètre dans cette cavité par la tête du piston et passe à travers les trous de diamètre a de la plaque avec une vitesse d'écoulement U . Ces ouvertures sont espacées d'une distance d (Figure 1), induisant une porosité de 5%. Ce système complet permet le contrôle de la condition acoustique en entrée du brûleur dans la gamme des basses fréquences (100 à 1 000 Hz) [7]. Des précisions sont apportées dans la suite, sur la conception de ce système de contrôle d'impédance et ses performances.

Sélection des points de fonctionnement

La combustion est essentiellement contrôlée par trois paramètres : la richesse ϕ , l'étagement α et le débit d'air total $Q_{a,t}$. L'étude systématique des points de fonctionnement a prouvé que la richesse peut varier entre 0,7 et 0,95 tandis que l'étagement peut varier entre 10 et 55%. L'influence de la richesse et de l'étagement a été étudiée par Dioc dans sa thèse [8]. Les fluctuations de pression sont enregistrées dans la chambre (M5) et la densité spectrale de puissance (PSD) est tracée pour chaque condition expérimentale (i.e. pour chaque couple de valeurs de la richesse et de l'étagement). L'intérêt de cette démarche dans l'étude de bruit, est de déterminer les points de fonctionnement où l'instabilité est la moins

prononcée (i.e. où le maximum de la PSD est au minimum). Les valeurs maximales de la PSD pour différentes valeurs de la richesse et de l'étagement sont indiquées Figure 3. Trois points de fonctionnement intéressants ont été identifiés. Le premier point est obtenu pour une richesse de 0,75 et un étagement de 30% (Point A). Ce point correspond à un minimum local où l'amplitude de la PSD varie lentement quand l'étagement augmente. Le deuxième point est obtenu pour un étagement de 50% et une richesse égale à 0,9 (Point B). Un troisième point intermédiaire, correspondant à un point de fonctionnement exploité par Dioc [8], a également été sélectionné afin de permettre la comparaison. Il correspond à une richesse égale à 0,8 et un étagement de 40% (point C).

Influence du débit d'air total

Les conditions de fonctionnement précédentes (points A, B et C) sont obtenues pour un débit d'air total constant de $40\text{ Nm}^3\text{h}^{-1}$, les deux étages sont identiquement alimentés en air. Pour analyser l'influence de ce paramètre sur le

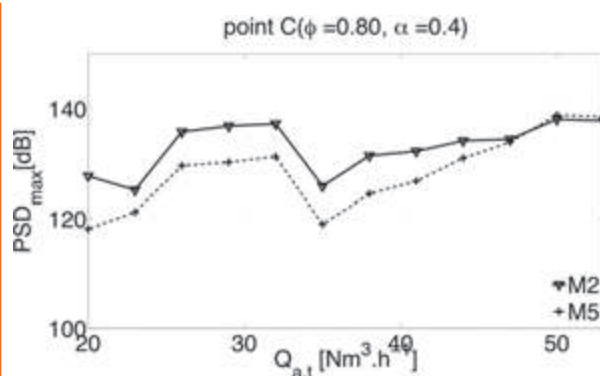


Fig. 4 : Evolution de la PSD en fonction du débit d'air total, pour le point de fonctionnement C (richesse $\phi=0,8$ et étagement $\alpha=0,4$)
Evolution of the PSD with total air flow rate for point C ($\phi=0,8$ and $\alpha=0,4$)

maximum de la PSD, le débit d'air total a été varié de 20 à 53 Nm^3h^{-1} . Pour les différents points de fonctionnement A, B et C, le maximum de la PSD est minimal, pour un débit d'air total égal à 35 Nm^3h^{-1} . La figure 4 montre l'évolution du maximum de la PSD pour le point de fonctionnement C pour les microphones M2 et M5 (richesse $\phi = 0.8$ et étagement $\alpha = 0,4$). Finalement les régimes appropriés pour l'étude du bruit de combustion correspondent à une injection d'air de $17,5\text{ Nm}^3\text{h}^{-1}$ sur chaque étage (soit $35\text{ Nm}^3\text{h}^{-1}$ au total) et $1,15\text{ Nm}^3\text{h}^{-1}$ injecté axialement. Cette injection axiale a deux objectifs : elle permet tout d'abord de prévenir un retour de flamme dans l'injecteur [8]. Cette très faible injection axiale ($\approx 2,5\%$ du débit total) a pour second objectif d'augmenter le pouvoir absorbant du système de contrôle, comme démontré dans [7]. L'injection de propane dans chaque étage dépend de la richesse et de l'étagement. Les points de fonctionnement sont résumés dans le tableau 1. Par la suite,

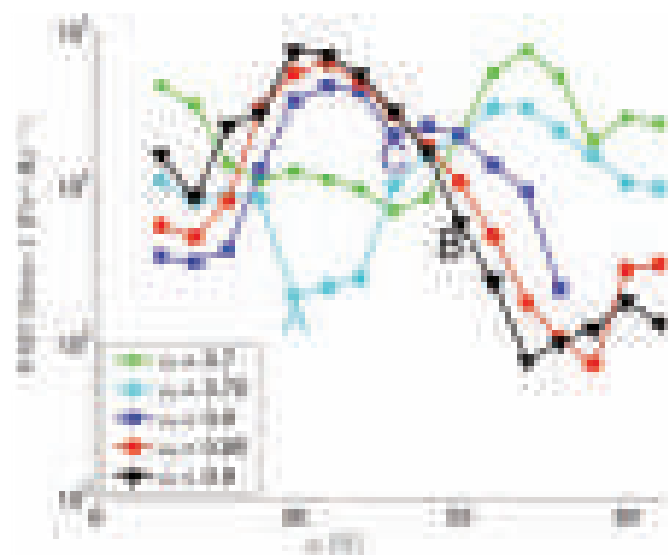


Fig. 3 : Evolution de la densité spectrale de puissance (PSD) en fonction de la richesse et de l'étagement
Evolution of the Power Spectral Density (PSD) with fuel equivalence ratio and staging ratio

pour rendre l'étude plus facile à lire, nous allons nous concentrer uniquement sur le point A. La même analyse a été effectuée pour les points B et C.

	Point A	Point B	Point C
Etagement α	0,3	0,5	0,4
Richesse ϕ	0,75	0,90	0,80
Puissance	29 KW	34 KW	31 KW

Tabl. 1 : Régimes de fonctionnement identifiés pour l'étude du bruit de combustion, débit d'air total $Q_{a,t} = 35 \text{ Nm}^3\text{h}^{-1}$
Operating conditions chosen for combustion noise investigation $Q_{a,t} = 35 \text{ Nm}^3\text{h}^{-1}$

Plaque perforée munie d'une cavité

Le système de contrôle passif est composé d'une plaque perforée et d'une cavité à profondeur réglable, avec un écoulement moyen à travers la plaque. Une fois optimisé, ce système peut contrôler efficacement le module du coefficient de réflexion amont du brûleur pour des oscillations de pression incidente de grande amplitude [11]. Ce système de contrôle a été adapté sur le banc expérimental de combustion et ses effets sont présentés dans la section suivante. Le coefficient de réflexion R d'une plaque perforée munie d'une cavité avec un écoulement moyen a été modélisé et les données expérimentales ont été comparées avec les prédictions théoriques pour des plaques à faible porosité ($\sigma < 10\%$), compactes par rapport à la longueur d'onde incidente ($a \ll d \ll \lambda$) et sans interactions entre les perforations ($a \ll d$) [12, 13]. Ces modèles sont basés sur une évaluation du gradient de pression au travers de la plaque perforée qui peut être liée au saut de pression par la conductivité de Rayleigh K_R des ouvertures. Cette conductivité est une fonction du nombre Strouhal ($St = \omega a/U$) basé sur la vitesse d'écoulement et le rayon du trou, comme démontré par Howe [12] : $K_R = \gamma - i\delta$, où les parties réelle et imaginaire sont entièrement déterminées par les fonctions de Bessel du nombre de Strouhal St . Grâce à ces éléments, une expression pour le coefficient de réflexion complexe R de la face avant de la plaque perforée peut être obtenue en fonction des paramètres géométriques a et d , de la profondeur de la cavité L , de la vitesse de l'écoulement moyen par l'intermédiaire du nombre de Strouhal et de la fréquence par l'intermédiaire du nombre d'onde $k = 2\pi f/c_0$ [13]. Un paramètre intermédiaire $\eta = 2a/d^2 K_R$ est introduit, de sorte que :

$$R = \frac{(ik/\eta) + 1 - (i/\tan(kL))}{(ik/\eta) - 1 - (i/\tan(kL))}$$

Cinq paramètres (a , d , L , f , U) peuvent être utilisés pour contrôler le coefficient de réflexion. Ce nombre peut être facilement réduit en raison de contraintes géométriques et des conditions de fonctionnement envisagées. Le banc expérimental de combustion présente une forte

instabilité aux basses fréquences, correspondant aux modes acoustiques longitudinaux. Les premiers modes instables sont généralement observés entre 100 et 1 000 Hz, fréquences pour lesquelles le système de contrôle de l'impédance est donc optimisé. Ce système peut néanmoins être adapté pour des fréquences plus élevées. La validité du modèle est limitée à des plaques de faible porosité ($\sigma < 10\%$), sans aucune restriction sur la taille des perforations a ou de l'espacement d . Ces deux paramètres ont donc été optimisés et fixés, pour des raisons pratiques : $a = 0,5 \text{ mm}$ et $d = 4 \text{ mm}$. Enfin, il a été montré qu'une vitesse d'écoulement $U = 9 \text{ m/s}$ peut être utilisée pour maximiser les propriétés d'atténuation du système dans la gamme de fréquences voulues, une fois que les paramètres géométriques sont définis [7, 11]. Le dernier paramètre de contrôle, la profondeur de la cavité L , a été choisi pour piloter les propriétés du système. Sa valeur maximale $L = 50 \text{ cm}$ est imposée par la fréquence la plus basse à laquelle le contrôle doit agir efficacement.

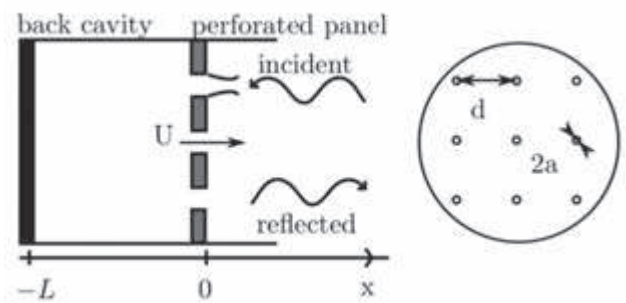


Fig. 5 : Plaque perforée munie d'une cavité, en présence d'un écoulement moyen
Perforated plate backed by a cavity, in presence of a mean bias flow

Influence de la plaque perforée sur les instabilités de combustion

La profondeur optimale de la cavité (L_{opt}) dépend de la fréquence de l'instabilité à amortir. Cette longueur a été identifiée pour les différents points de fonctionnement. Des tests sont effectués pour mettre en évidence l'effet de la plaque perforée sur le spectre du bruit émis. Comme décrit précédemment, le système de contrôle est utilisé pour adapter l'impédance d'entrée et atténuer le couplage entre la combustion et les modes acoustiques de la chambre de combustion. Les densités spectrales de puissance (PSD) des microphones M2 et M5 sont tracées pour évaluer l'effet du système sur l'amplitude du pic de résonance. Le coefficient de réflexion R à l'entrée du brûleur est mesuré à l'aide des trois microphones situés dans l'injecteur (M1, M2 et M4). Sans le système de contrôle, le module du coefficient de réflexion amont est légèrement inférieur à l'unité ($|R| = 0,8$), une valeur prévisible pour une paroi rigide.

Ce léger écart par rapport à l'unité est peut être dû à l'écoulement de l'air à travers les perforations qui atténue les ondes acoustiques ou par les cavités créées par les perforations dans la plaque qui peuvent également créer une atténuation. Dans cette situation, une fort pic d'oscillation correspondant à un régime

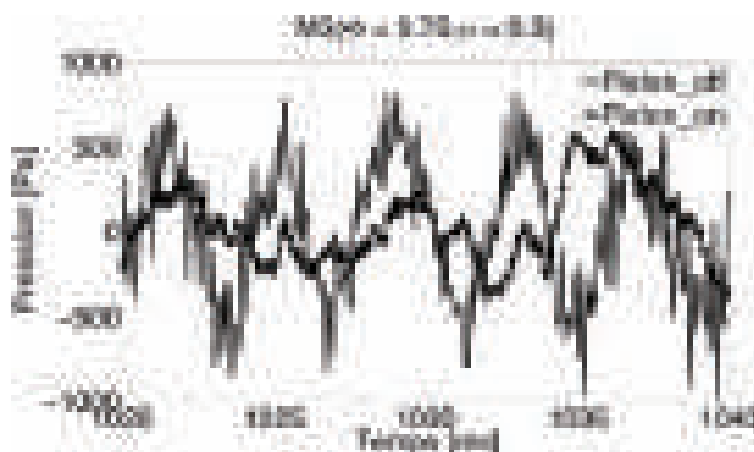


Fig. 6 : Fluctuations de la pression dans l'injecteur (microphone M3), lorsque la profondeur de la cavité est fixée à zéro puis à sa valeur optimale
Pressure fluctuations in the injector (microphone M3), with the cavity depth set at zero and at its optimum value

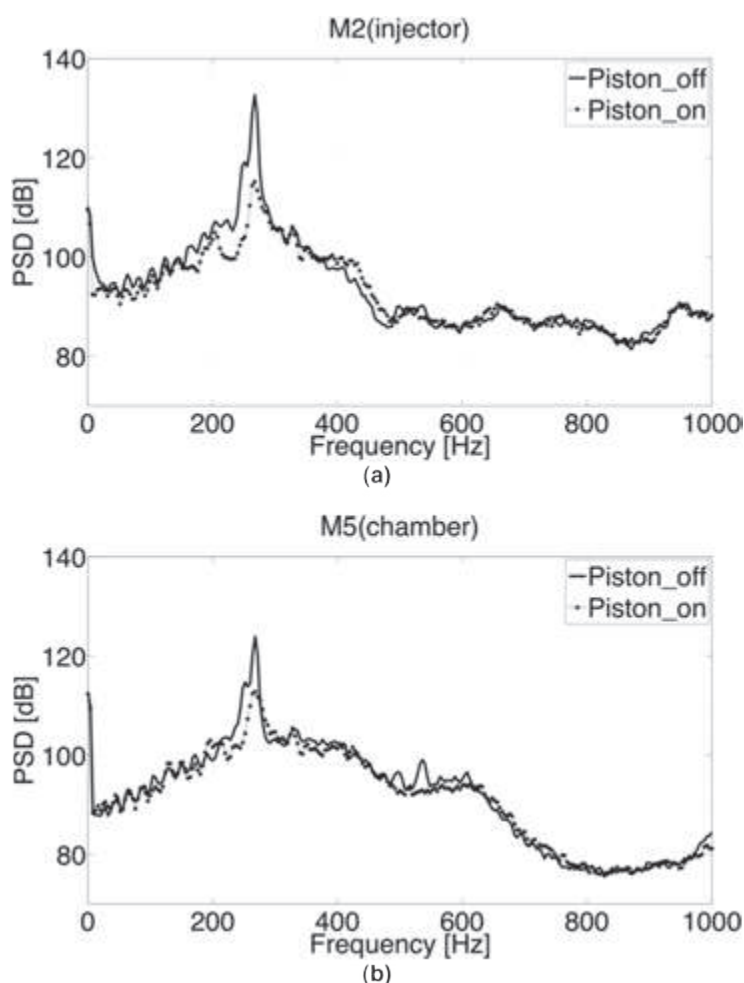


Fig. 7 : Densité spectrale de puissance (PSD) dans l'injecteur et dans la chambre. Un pic à forte amplitude est observé à 272 Hz, correspondant à un fort couplage entre la combustion et l'acoustique. Quand la profondeur de la cavité est fixée à sa valeur optimale, le pic est considérablement atténué
Power Spectral Density (PSD) in the injector and the chamber. A large amplitude peak is observed at 272 Hz corresponding to a strong coupling between acoustics and combustion. With the perforated plate set at its optimum value, the peak is significantly damped

instable est obtenue à la fréquence $f = 272$ Hz, en dépit du fait que le point A est associé à un couplage de faible amplitude (Figure 4).

La figure 6 montre l'évolution temporelle du microphone M3 (placé dans l'injecteur) pendant quelques cycles d'oscillation. Des fluctuations de pression périodiques peuvent être clairement observées quand la profondeur de la cavité est mise à zéro. La PSD des fluctuations de pression est tracée en figure 7 pour les microphones M2 dans l'injecteur, et M5 dans la chambre. Durant ces tests la PSD atteint 135 dB dans l'injecteur et 128 dB à l'intérieur de la chambre de combustion. Une fluctuation cyclique de l'intensité lumineuse émise par la flamme est également observée à la même fréquence par le PM. Ce pic de fréquence est présent dans les signaux mesurés par tous les microphones, confirmant un couplage entre la combustion et l'acoustique. Lorsque la plaque perforée est utilisée (profondeur de la cavité $L = L_{opt}$), le module du coefficient de réflexion diminue de $|R| = 0,8$ à $|R| = 0,15$ à $f = 272$ Hz. L'amplitude du pic est considérablement réduite (environ 20 dB) dans l'injecteur et un peu moins dans la chambre (Figure 7).

La figure 6 montre que le signal de pression dans l'injecteur n'est plus périodique. Pour des profondeurs plus grandes, le module du coefficient de réflexion augmente à nouveau. Il est également clairement visible sur la figure 7 que le reste du spectre est peu modifié lorsque le module du coefficient de réflexion varie. Cela signifie que si le système de contrôle passif agit sur couplage entre la flamme et l'acoustique, il modifie peu le bruit naturel de la flamme. Cette méthode de contrôle passive est donc d'un grand intérêt pour l'étude du bruit de combustion. Lorsque la profondeur de la cavité est à sa valeur optimale, les instabilités sont considérablement atténuées et le bruit de combustion est plus perceptible.

Conclusion et perspectives

Le but de ce projet est d'étudier le bruit de combustion dans une configuration proche de celle des turbines à gaz et un environnement parfaitement contrôlé. L'identification des points de fonctionnement optimaux a été effectuée sur la base d'études précédentes réalisées sur des brûleurs

similaires. Des études systématiques ont été menées avec différentes valeurs de la richesse en combustible, de l'étagement et du débit d'air total. Les points de fonctionnement permettant l'atténuation des instabilités de combustion ont été retenus, correspondant à trois couples de valeurs de richesse et d'étagement. L'impédance acoustique amont a été ajustée afin de diminuer le module du coefficient de réflexion dans l'injecteur, permettant ainsi une atténuation des instabilités.

Ce premier travail a permis d'obtenir des conditions expérimentales favorables pour l'étude du bruit de combustion. L'objectif est de comprendre les mécanismes fondamentaux générateurs de bruit dans la chambre de combustion. Dans un futur proche, l'impact du système de contrôle amont sur l'aérodynamique du brûleur sera mis en évidence au cours d'une campagne PIV (Vélocimétrie par Image de Particules). Puis la condition acoustique en sortie du brûleur sera modifiée afin d'évaluer l'influence de l'aval sur le bruit de combustion. Le système complet sera ensuite utilisé pour étudier le bruit de combustion dans des conditions acoustiques soigneusement fixées.

Remerciements

Cette étude et la bourse de thèse de A. Lamraoui sont financés par la Fondation de Recherche pour l'Aéronautique et l'Espace (FNRAE).

Références bibliographiques

- [1] S.L. Bragg. Combustion noise. *Journal of the Institute of Fuel*, 36:12-16, 1963.
- [2] T.J.B. Smith and J.K. Kilham. Noise generation by open turbulent flames. *J. Acoust. Soc. Am.*, 35(5):715-724, 1963.
- [3] I.R. Hurler, R.B. Price, T.M. Sugden, F.R.S. Thomas, and A. Thomas. Sound emission from open turbulent premixed flames. *Proceedings of the Royal Society*, 303:409-427, 1968.
- [4] S.A. Klein and J.B.W. Kok. Sound génération by turbulent non-premixed flames. *Combust. Sci. Tech.*, 149:267-295, 1999.
- [5] K. K. Singh, C. Zhang, J. P. Gore, L. Mongeau, and S. H. Frankel. An experimental study of partially premixed flame sound. *Proceedings of the Combustion Institute*, 30(2):1707-1715, 2005.
- [6] S. Candel. Combustion dynamics and control: Progress and challenges. *Proceedings of the Combustion Institute*, 29:1-28, 2002.
- [7] N. Tran, S. Ducruix, and T. Schuller. Analysis and control of combustion instabilities by adaptive reflection coefficients. In 13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, number AIAA-2007-3716, Roma, Italy, May 21 - 23 2007.
- [8] N. Dioc. Etude expérimentale des mécanismes d'instabilité dans un brûleur à injection étagée. Application aux turbines à gaz. PhD thesis, Ecole Centrale Paris, 2005.
- [9] J. Y. Chung and D. A. Blaser. Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. i. theory. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 68:907-913, 1980.
- [10] J. Y. Chung. Cross-spectral method of measuring acoustic intensity without error caused by instrument phase mismatch. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 64(6):1613-1616, 1978.
- [11] N. Tran, S. Ducruix, and T. Schuller. Passive control of the inlet acoustic boundary of a swirled turbulent burner. In ASME Turbo Expo 2008, GT.2008-50425, Berlin, Germany, June 2008.
- [12] M. S. Howe. On the theory of unsteady High Reynolds number flow through a circular aperture. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 366(1725):205-223, 1979.
- [13] I. J. Hughes and A. P. Dowling. The absorption of sound by perforated linings. *Journal of Fluid Mechanics*, 218:299-335, September 1990.