

Contrôle de flammes gaz naturel-oxygène par des jets actionneurs dans un brûleur à jets séparés

Toufik BOUSHAKI^{1,2,*}, Jean-Charles SAUTET¹, François MADEC¹, Bernard LABEGORRE³

¹CORIA UMR 6614 CNRS - Université et INSA de Rouen Avenue de l'Université, BP 12
76801 Saint Etienne du Rouvray

²IMFT UMR 5502 CNRS-INP-UPS, 1 Allée du Professeur Camille Soula
31400 Toulouse

³CRCD Air Liquide, Les Loges en Josas 78350 Jouy en Josas

*(auteur correspondant : Boushaki@imft.fr)

Résumé - Le présent travail concerne le contrôle des flammes par de petits jets actionneurs dans un oxy-brûleur à jets séparés. L'idée principale est de dévier une partie du débit total vers les actionneurs afin d'influencer la trajectoire de l'écoulement et donc l'inclinaison de la flamme dans le four. Les mesures réalisées par chimiluminescence de OH, tomographie laser et PIV montrent que le contrôle par les petits jets actionneurs a un effet très important sur le comportement dynamique des jets et sur la topologie de la flamme notamment son inclinaison.

1. Introduction

Les objectifs du contrôle d'un écoulement diffèrent suivant l'application industrielle envisagée. On peut ainsi contrôler un jet pour améliorer le mélange en sortie d'un injecteur [1,2], mais aussi pour le diriger et modifier son orientation (lorsqu'il est question de transferts de chaleur importants, pour l'éloigner des zones critiques), moduler les instabilités de combustion [3,4], diminuer l'émission d'oxydes d'azote [5] ou bien encore la pollution sonore. Il existe deux grands axes dans le contrôle de l'écoulement en général : le contrôle passif et le contrôle actif. Le contrôle passif consiste à modifier la géométrie de brûleur ou/et la chambre de combustion pour affecter la dynamique de l'écoulement. Le contrôle actif consiste en apport d'énergie externe à travers des actionneurs tout en conservant la géométrie du foyer. Dans cette étude, nous nous intéressons au contrôle actif via des petits jets actionneurs placés transversalement en sortie des jets principaux constituant l'oxy-brûleur.

Dans une étude préalable sur un oxy-brûleur à triples jets, il a été montré que le contrôle passif par l'inclinaison des jets de comburant permet d'améliorer considérablement la stabilité de la flamme et réduire les émissions des NOx [6]. Dans le cas du contrôle actif, les modulations portent sur l'écoulement et prennent généralement la forme d'une injection instationnaire d'oxydant ou de combustible [2]. Une excitation acoustique peut être également utilisée [7]. Dans le présent travail, la méthode retenue pour le contrôle est basée sur l'utilisation des petits tubes actionneurs. Cette technique est très efficace, car il a été testé avec succès depuis plusieurs années, notamment en situation non réactive.

L'utilisation de l'oxy-combustion dans des brûleurs à jets séparés offre des perspectives intéressantes dans la réduction des NOx et dans la modularité des propriétés des flammes (accrochage, topologie du front de flamme, longueur de flammes) [8]. L'idée de base de ce type de brûleur consiste en la séparation des réactifs permettant leur dilution par les produits de combustion avant le mélange combustible-comburant. Notons que cette géométrie est tridimensionnelle et ne possède pas d'axe de symétrie. L'intérêt de la substitution de l'oxygène pur à l'air de combustion permet de diminuer la consommation énergétique en

augmentant le rendement thermique et de diminuer la formation d'oxyde d'azote en diminuant la quantité d'azote introduite [9].

L'étude des brûleurs à jets multiples en non réactif a été largement abordée dans la littérature mais peu de travaux ont été réalisés en situation réactive. Menon et Gollahalli (1988) [10] ont par exemple étudié une flamme de propane issue de 2, 3 et 5 jets soumise à un écoulement croisé. Leite et al. (1996) [11] dans une configuration similaire se sont intéressés à l'étude de l'influence du nombre d'injecteurs, l'écartement des jets et leurs diamètres sur la longueur d'une flamme d'acétylène. Récemment, Lee et al. (2004) [12] se sont intéressés à l'étude des limites de soufflage par l'interaction des flammes jets multiples non prémélangées. En fonction de la distance séparant les jets, le nombre de jets et leur disposition, plusieurs configurations ont été utilisées.

Le système étudié dans ce travail est constitué d'un brûleur de 25 kW fonctionnant au gaz naturel et à l'oxygène pur, placé dans une enceinte de confinement étanche refroidie à l'eau. La configuration de base de brûleur est constituée d'un injecteur central de gaz naturel entouré de deux injecteurs latéraux d'oxygène pur. Chaque injecteur a été équipé de deux petits jets actionneurs placés près de la sortie du jet à contrôler (figure 1). Le but de ce travail est d'étudier l'effet des jets actionneurs sur l'écoulement et le comportement de la flamme. Dans un premier temps, l'observation des jets est envisagée par l'utilisation de la tomographie laser. Ensuite, la structure de flamme est étudiée par la chimiluminescence du radical OH. L'accent est porté sur les hauteurs de stabilisation, les longueurs de flamme et l'inclinaison de flamme par rapport à la verticale. Enfin, l'étude du champ dynamique est effectuée à l'aide de la Vélocimétrie par Image de Particules (PIV).

2. Dispositif expérimental et techniques de mesures

2.1. Brûleur, système de contrôle, four

La configuration de brûleur à jets séparés est schématisée sur la figure 1. Elle est constituée de trois tubes cylindriques coplanaires, un tube central amène le gaz naturel et deux tubes latéraux apportent l'oxygène. Le système de contrôle utilisé est basé sur la mise en place des jets actionneurs transverses permettant d'agir sur les réactifs et de modifier l'orientation de la flamme. On définit par r le rapport des débits dans les actionneurs (\dot{m}_{act}) et total (\dot{m}_{tot}) :

$$r = \frac{\dot{m}_{act}}{\dot{m}_{tot}} \quad (1)$$

Les actionneurs sont positionnés à 1 mm de la sortie du jet principal (de l'axe, $z = -1\text{mm}$) et ont un diamètre intérieur de 1mm. La puissance du brûleur a été fixée à 25 kW, ce qui conduit à des débits constants pour le gaz naturel et l'oxygène, $\dot{m}_{gn} = 0,67\text{l.s}^{-1}$ et $\dot{m}_{ox} = 1,453\text{l.s}^{-1}$. Les diamètres des jets de gaz naturel et d'oxygène sont $d_{gn}=6\text{mm}$ et $d_{ox}=8\text{mm}$. La distance S entre les injecteurs est fixée à 16 mm. Deux configurations ont été étudiées, une à 3 jets (conf i) et l'autre à 2 jets (conf ii) (voir tableau 1). Sans les actionneurs ($r = 0$), les vitesses d'injection de combustible et de comburant sont respectivement 23,7 et 14,45 m/s pour la configuration (i) et 23,7 et 28,91 m/s pour la configuration (ii). Dans la configuration de deux jets, la totalité du débit d'oxygène est injectée dans un seul tube. Il est intéressant de noter qu'en présence des jets actionneurs, la vitesse d'injection dans le jet principal diminue lorsque r augmente, puisqu'une partie de débit total est injectée dans les tubes actionneurs.

Afin d'étudier le contrôle d'oxy-flammes issues des brûleurs à jets séparés, un confinement modélisant le four a été réalisé pour entourer le brûleur. Le confinement de base carrée de

60×60 cm, centré sur le brûleur, a une hauteur de 100 cm. Les parois de la chambre sont recouvertes de réfractaire à l'intérieur et refroidies par circulation d'eau à l'extérieur afin de limiter la température des parois métalliques. Six ouvertures ont été pratiquées dans chaque face afin d'offrir des accès optiques à toutes les hauteurs.

Configurations étudiées		d_{gn} (mm)	d_{ox} (mm)	S (mm)
Conf (i)	3 jets (1 jet GN, 2 jets O ₂)	6	8	16
Conf (ii)	2 jets (1 jet GN, 1 jet O ₂)	6	8	16

Tableau 1 : Configurations étudiées du brûleur

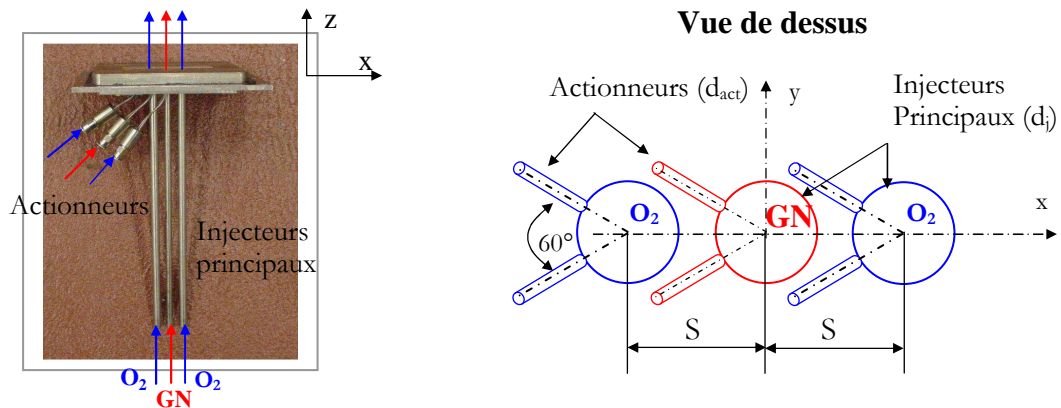


Figure 1 : Photographie (à gauche) et schéma (à droite) de brûleur équipé d'actionneurs

2.2. Techniques de mesures

La technique de mesure choisie pour décrire la zone de stabilisation (les hauteurs de suspensions par exemple) et la longueur de flamme est la chimiluminescence du radical OH* sur la bande principale (0-0) à 306,4 nm. L'émission du radical OH* est caractéristique de la zone de réaction où le radical a été créé, celui-ci n'est pas trop sensible à la convection turbulente, comme il a une courte durée de vie dans son état électronique excité. Le dispositif d'acquisition est composé d'une caméra CCD intensifiée Princeton Instrument munie d'un objectif UV (Nikkor de 105 mm de focale), d'un filtre SCHOTT UG 11 (Milles Griot) et d'un PC d'acquisition et stockage des images. Les images ont une taille de 512×512 pixels² avec une résolution en intensité de 16 bits. 400 images ont été collectées pour chaque cas.

Le dispositif expérimental pour la mesure de PIV nécessite les éléments de base utilisés de la technique de tomographie laser, c'est-à-dire une nappe laser qui éclaire la zone de l'écoulement étudié, une caméra CCD et un PC d'acquisition et de contrôle de la chaîne. Le laser utilisé est de type Nd-YAG bi-pulses (Big Sky CFR200 Quantel) de longueur d'onde 532 nm et de fréquence de 10 Hz. Le signal de diffusion de Mie émis par les particules est recueilli par un camera CCD FlowMaster de Lavisson, possédant une dynamique de 12 bits et d'une résolution de 1280×1024 pixels². Le temps entre deux pulses laser varié de 5 à 20 μs, selon le rapport de débits r et la configuration utilisée. L'ensemencement des jets est réalisé avec des gouttelettes d'huile d'olive pour les mesures à froid et avec des particules d'oxyde de zirconium pour les mesures en combustion. Le calcul d'intercorrélacion des images est effectué par le logiciel Davis de Lavisson. On a utilisé des mailles d'analyse de 32×32 pixels² avec un recouvrement de 50% de mailles, c'est à dire un pas de maillage de 16 pixels. Il est nécessaire d'effectuer un post-traitement pour détecter et corriger les vecteurs aberrants apparus après le calcul d'intercorrélacion.

3. Comportement des oxy-flammes

La figure 2 montre un exemple d'images instantanées de tomographie laser des jets pour la configuration à 3 jets (i). On peut bien remarquer que la mise en fonction des jets actionneurs ($r = \dot{m}_{act} / \dot{m}_{tot} > 0$) entraîne une déviation des jets. Au fur et à mesure que le débit dans les actionneurs augmente, les jets s'ouvrent d'avantage à l'injection et se mélangent de plus en plus en amont de l'écoulement. On peut aussi observer des modifications dans la structure des jets induites a priori par les grandes structures de turbulence. Ces modifications dans le comportement de l'écoulement entraînent logiquement des changements dans la structure de la flamme. La figure 3 présente des images instantanées de OH de la zone d'accrochage dans la configuration (i) (à gauche) et (ii) (à droite) pour les cas $r = 0$ et $r = 0,2$. Dans les deux configurations, on note que lorsque r augmente, l'inclinaison de la flamme par rapport à la verticale augmente (35° entre $r=0$ et $r=0,2$), la flamme se rapproche du brûleur et devient de plus en plus stable. Avec cette configuration de brûleur, on remarque que pour de très forts débits d'actionneurs ($\dot{m}_{act} / \dot{m}_{tot} \geq 0,2$), la flamme s'accroche très près du nez du brûleur et la turbulence générée devient très importante due aux vitesses élevées des jets actionneurs. On remarque que la zone d'accrochage dans la configuration à deux jets (ii) est formée d'une branche se localisant dans la zone de mélange des réactifs ; en revanche dans la configuration à 3 jets (i) on observe deux branches de part et d'autre du jet central qui se rejoignent sous l'effet des actionneurs. Notons que la flamme issue de la configuration 3 jets est moins fluctuante au niveau de la base que celle issue de la configuration 2 jets. Ceci est relié à la faible vitesse de jet d'oxygène et au meilleur mélange dans la présence de 2 jets d'oxygène. Pour déterminer les positions d'accrochage des oxy-flammes, il est nécessaire d'effectuer une binarisation puis une détection de contour. Le point d'accrochage est ensuite déterminé comme étant le point le plus proche de l'injecteur où le signal apparaît.

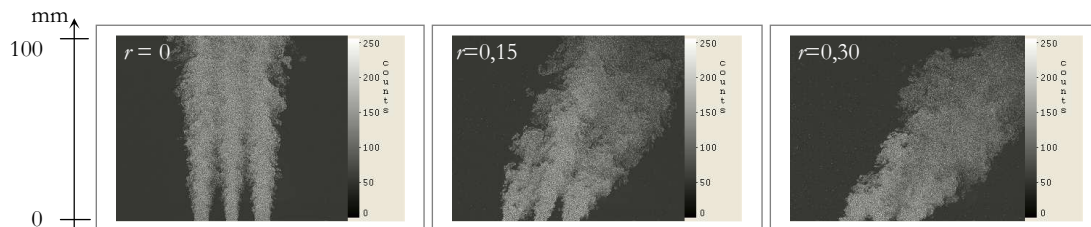


Figure 2 : Exemple d'images instantanées de tomographie laser pour la configuration (i)

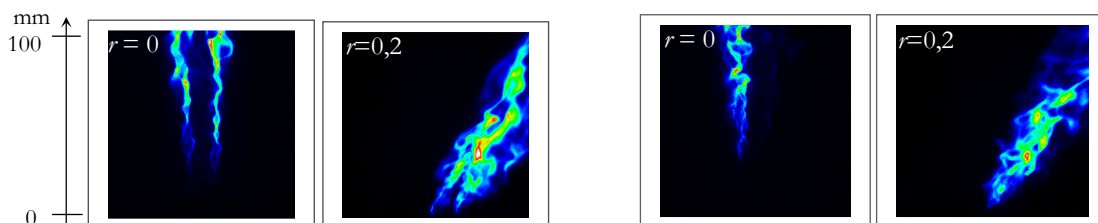


Figure 3 : Images de OH en bas de flamme, conf (i) (à gauche), conf (ii) (à droite)

La figure 4 montre pour la configuration à 2 jets (ii) que la hauteur d'accrochage décroît lorsque le rapport des débits augmente. Cette décroissance est plus importante entre $r=0$ et $0,2$ et faible entre $0,2$ et $0,4$. En effet, entre 0 et $0,2$ la hauteur d'accrochage diminue d'un facteur de 10, puisqu'elle passe de $31,5$ mm à $3,07$ mm ; en revanche, au-delà de $r=0,2$ la variation de la hauteur d'accrochage moyenne est faible. Les petits jets actionneurs agissent sur les jets principaux, augmentent l'efficacité du mélange entre le gaz naturel et de l'oxygène, et permettent l'accrochage de la flamme plus en amont de l'écoulement. D'autre part, dévier une partie du débit total vers les actionneurs, induit une réduction de la vitesse longitudinale de

l'écoulement, et donc permet un accrochage de la flamme plus en amont. Les fluctuations de l'accrochage sont importantes pour $r=0$ et diminuent avec la diminution de H_{ac} .

Les jets actionneurs influent également sur la longueur de la flamme puisqu'on peut observer que lorsque le débit dans les actionneurs croît, L_f décroît (figure 5). Cette décroissance est forte entre 0 et 0.2 car L_f passe de 523 mm à 315 mm et faible entre 0.2 et 0.4 où L_f passe de 315 mm à 265 mm. Les jets actionneurs agissent sur les jets principaux en favorisant le mélange des réactifs et donc diminuent la longueur de flamme. Nous constatons que le rapport des débits influe sur la longueur de flamme surtout dans la gamme 0 à 20%. Ces observations confirment les résultats trouvés pour la hauteur d'accrochage et l'inclinaison de la flamme concernant la forte influence des actionneurs dans la gamme de 0-0.2 de r .

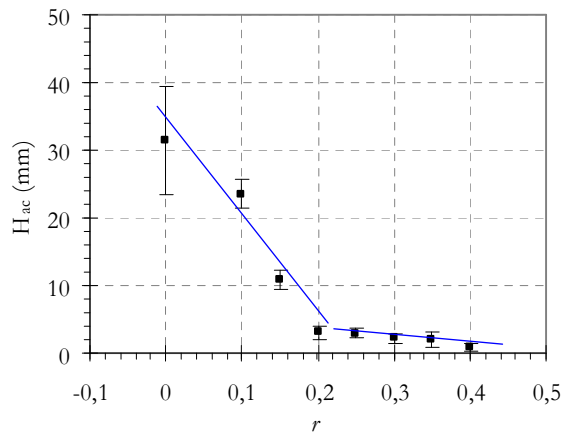


Figure 4 : Hauteur d'accrochage en fonction de rapport des débits ($r = \dot{m}_{act} / \dot{m}_{tot}$) pour la configuration à 2 jets (ii)

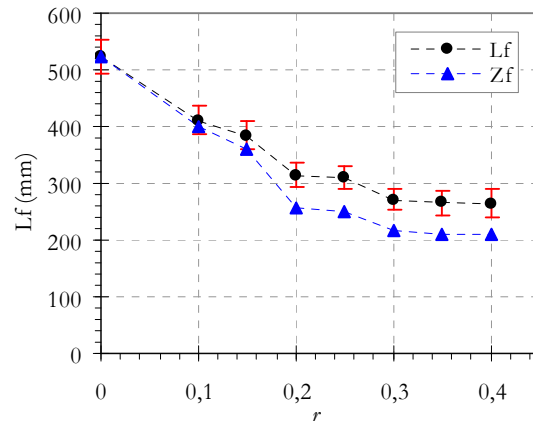


Figure 5 : Longueur de flamme en fonction r ($r = \dot{m}_{act} / \dot{m}_{tot}$) pour la configuration (ii). [Entre Z_f "hauteur verticale" et L_f il y a l'angle d'inclinaison de flamme].

4. Champs de vitesses

A l'aide de la PIV nous avons déterminé les champs de vitesse dans le plan des injecteurs (x, z) pour toutes les configurations. Sur la figure 6 nous présentons seulement les champs de vitesse moyenne de l'écoulement non réactif pour la configuration à 2 jets (ii) dans les cas $r = 0$ (sans contrôle) et $r = 0,2$ (avec contrôle). La vitesse de l'écoulement change profondément avec l'impact des jets de contrôle sur les jets contrôlés. Sans les actionneurs ($r = 0$), dans le champ proche, l'écoulement présente deux maxima bien distincts correspondant aux deux jets, alors que pour $r = 0,2$, l'écoulement possède plus de deux maxima qui se fusionnent plus près du brûleur pour former qu'un seul à partir de $z = 20$ mm. Ceci est la conséquence des jets de contrôle puisque ce doublement de maxima de vitesses correspond aux jets formés par les jets actionneurs. On note qu'avec la présence de jets actionneurs, l'écoulement devient fortement tridimensionnel dès la sortie des injecteurs et que la vitesse longitudinale diminue alors que la vitesse transversale augmente. Plus en aval du brûleur, on note que l'actionnement des jets entraîne une décroissance importante de la vitesse. Les modifications observées dans la direction, la valeur et la répartition spatiale des vecteurs vitesses influent directement sur la localisation de l'accrochage de flamme comme il a été montré dans la section précédente. Il ressort de cette partie que l'utilisation des jets actionneurs centraux a une influence importante sur le mélange et la dynamique de l'écoulement notamment dans la zone proche des injecteurs. La mise en fonction des actionneurs favorise le mélange et ouvre d'avantage les jets, ceci permet à la flamme de se stabiliser de plus en plus en amont.

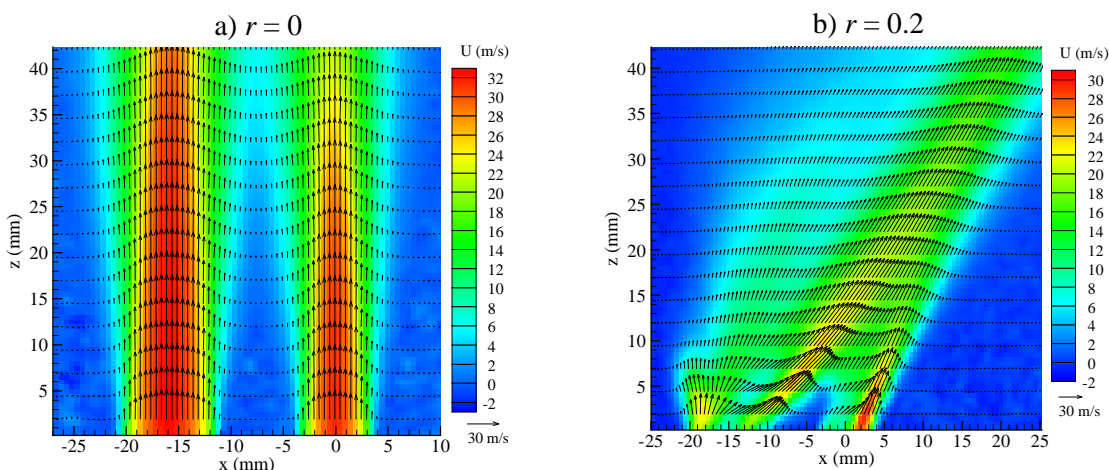


Figure 6 : Champs de vitesse moyenne de l'écoulement non réactif pour $r=0$ et $0,2$, conf (ii)

5. Conclusion

L'étude du contrôle d'oxy-flammes par des jets actionneurs transverses a été effectuée dans un brûleur à jets séparés. On s'est intéressé à l'effet de rapport des débits ($r = \text{débit actionneurs/débit total}$) sur le comportement des jets et de la flamme. L'utilisation des jets actionneurs modifie la structure et la vitesse de l'écoulement et induit une inclinaison de la flamme dans le four. Ceci permet de moduler le transfert thermique vers la charge dans le four en fonction du débit des jets actionneurs. Les résultats ont montré que l'effet de ces actionneurs est très fort entre $r = 0$ et $0,2$ mais faible au-delà de $r = 0,2$. A travers ce type de contrôle nous avons montré que nous sommes capables d'agir sur l'écoulement pour orienter la flamme et moduler le transfert thermique d'une manière continue. Il ne s'agit aucunement d'un système de contrôle type TOR (Tout Ou Rien) mais bien d'un système de régulation.

Références

- [1] M.R. Davis, Variable control of jet decay, *AIAA Journal*, 20 (1982), 606-609.
- [2] V. Faivre and T. Poinso, Experimental and numerical investigations of jet active control for combustion applications, *Journal of Turbulence* 5 (2004), 025.
- [3] S. Candel, Combustion Instabilities Coupled by Pressure Waves and Their Active Control. *Proceedings of the Combustion Institute* 24 (1992), 1277-1296.
- [4] S. Barbosa et al., Control of combustion instabilities by local injection of hydrogen, *Proceedings of the Combustion Institute* 31 (2007) 3207-3214.
- [5] O. Delabroy, E. Haile, F. Lacas, S. Candel, A. Pollard, A. Sobiesiak, H.A. Becker, Passive and active control of NOx in industrial burners, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 16 (1998), 64-75.
- [6] T. Boushaki, M.A. Mergheni, J.C. Sautet, B. Labegorre, Effects of inclined jets on turbulent oxy-flame characteristics in a triple jet burner, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 32(2008), 1363-1370.
- [7] K.R. McManus, T. Poinso, S. Candel, A Review of Active Control of Combustion Instabilities, *Progress in Energy and Combustion Science* 19(1993), 1-29.
- [8] J.C. Sautet, T. Boushaki, L. Salentey, B. Labegorre, Oxy-combustion properties of interacting separated jets, *Combustion Science and Technology*, 178 (2006) 2075-2096.
- [9] C.E. Baukal, *Industrial burners handbook*, CRC Press (2003).
- [10] R. Menon, S.R. Gollahali, Combustion characteristics of interacting multiple jets in crossflow, *Combustion Science and Technology*, vol. 60 (1998), 375-389.
- [11] A.O.P Leite, M.A. Ferreira, J.A. Carvalho, An investigation of multiple jet acetylene flames, *International communications in Heat & Mass Transfer* 23 (7) (1996), 959-970.
- [12] B.J. Lee, J.S. Kim, S. Lee, Enhancement of blow-out limit by the interaction of multiple nonpremixed jet flames, *Combustion Science and Technology*, (2004) 176:481-497.