5ème Conférence Internationale des Energies Renouvelables (CIER– 2017)
Proceeding of Engineering and Technology –PET
Vol.30 pp.67-71

Etude numérique de la flamme d'oxy-combustion issue d'un brûleur à jets séparés

Zouhaier RIAHI[1], Jean-Charles SAUTET[2]

[1]*Centre de Recherches et des Technologies de l'Energie, Laboratoire de Maîtrise de l'Energie Eolienne et de Valorisation Energétique des Déchets, Borj-Cedria, Tunisie*

[2]*COmplexe de Recherche Interprofessionnel en Aérothermochimie, CORIA, France*

Zouhaier.Riahi@crten.rnrt.tn

***Résumé*— La combustion est une réaction chimique exothermique rapide entre un réactif appelé combustible et un oxydant appelé comburant, déclenchée par une énergie d'activation donnant des produits de combustion gazeux portés à haute température. Elle est nécessaire pour le transport (moteurs automobile, moteurs fusées…), la génération d'énergie électrique (centrale thermique et turbine à gaz), les procédés de fabrication, les moyens de chauffage (fours et chaudières). En plus de la chaleur, la combustion produit des émissions nocives pour l'environnement. Cette pollution résulte principalement des gaz et particules jetés dans l'air par les véhicules à moteur, les installations de chauffage, les centrales thermiques et les installations industrielles. Les émissions polluantes sont principalement les oxydes de carbone, de soufre et d'azote, les gaz à effet de serre, poussières, particules radioactives, produits chimiques, dioxygène.... L'étude de la combustion d'une façon générale est un phénomène complexe, combinant les processus physiques et chimiques, tels que la stabilité de la flamme, la turbulence de l'écoulement et la présence des réactions chimiques, etc. ainsi, Les expérimentations étant extrêmement couteuses dans ce domaine. Nous avons opté pour la simulation numérique qui présente l'avantage de prévoir l'effet de plusieurs paramètres (Physiques et géométriques) sur la flamme de diffusion. Dans la présente étude, l'oxy-combustion et le type de brûleur sont deux paramètres importants influant directement sur la dynamique d'écoulement, sur la structure de flamme et sur les émissions des polluants.**

***Keywords*— combustion, émissions polluantes, biogaz**

I. INTRODUCTION

Durant les dernières années, l'oxy-combustion a été liée à de nombreuses applications touchant essentiellement le domaine de la métallurgie, la verrerie, la cimenterie, les productions de chaux et d'émaux et l'incinération sont d'autres procédés de combustion concernés par l'oxy-combustion. La combustion à l'oxygène représente l'une des solutions possibles pour réduire les émissions de polluants des installations industrielles. Cette solution présente d'autres avantages:

- Augmenter la température de combustion. En effet, la température de flamme stœchiométrique augmente avec la diminution de la quantité d'azote pour atteindre environ 3050 °K pour une flamme CH_4-O_2 pur contre 2200 °K pour une flamme CH_4-air.
- Favoriser les transferts thermiques, telle que, pour un transfert thermique donné, induit une diminution de la quantité de combustible brûlé, qui peut atteindre jusqu'à 50% pour le gaz naturel.
- Réduire la quantité d'azote dans le comburant, et donc diminution de l'émission d'oxydes d'azote issus des produits de la combustion, et simultanément l'augmentation de la concentration en CO2. De ce fait, on pourra augmenter l'efficacité du processus de capture du CO2.

Plusieurs travaux ont porté sur la combustion des flammes de diffusion, Burke et Schumann [1] se sont intéressés aux propriétés d'une flamme de diffusion, comme la longueur de décrochage, la distribution de température, les fractions massiques de différentes espèces ainsi que la longueur de flamme. Plusieurs chercheurs ont rapporté l'effet du rapport des vitesses $V_{air}/V_{carburant}$ sur les caractéristiques de flamme de diffusion Normale et Inverse. Mahesh et Mishra [2,3] ont étudié expérimentalement les caractéristiques d'une flamme de diffusion inverse turbulente pour un gaz de pétrole liquéfié GPL issue d'un brûleur nommé « backstep » en termes de longueur de flamme, de structure de la flamme double, de répartition de la température ainsi que de la distribution de la concentration d'oxygène dans la flamme. Baukal et al. [4] montrent que le flux de chaleur reçu par un disque refroidi à l'eau, augmente de 54% pour un enrichissement en oxygène de 30% à 100% (cas d'oxy-combustion) et que l'efficacité énergétique augmente avec l'augmentation de la fraction massique d'oxygène dans le comburant. Santos et al. [5] ont étudié expérimentalement l'effet de l'enrichissement de l'air en oxygène sur la production de suies et ont montré que la suie renforce le transfert de chaleur des gaz de combustion par rayonnement thermique. Lesieur [6] a étudié numériquement le problème de stabilisation de l'oxy-flamme dans un brûleur à trois jets séparés : deux jets d'oxygène entourés par un jet de gaz. Il a réalisé des calculs RANS bi et tridimensionnels sur différentes configurations de brûleur à trois jets séparés et validé ces résultats par

Copyright IPCO-2017
ISSN 2356-5608

les études expérimentales de Salentey [7]. Il a montré que les simulations bidimensionnelles sont uniquement capables de reproduire les zones proches du brûleur et pour les configurations à jets très peu séparés. Par contre les simulations tridimensionnelles reproduisent les grandes lignes de l'écoulement dans toutes les régions. Les procédés de l'oxy-combustion ont étudié expérimentalement et numériquement par différents auteurs. Boushaki et al. [8] ont étudié expérimentalement les problèmes de décrochage de flamme, les émissions des polluants et la dynamique de l'écoulement sans et avec réaction de combustion. Ces études ont été réalisées sur différentes configurations de brûleurs à trois jets séparés et alignés: un jet de gaz naturel entre deux jets d'oxygène.

II. DISCRÉTISATION ET MODULATION DU PROBLÈME

Dans cette étude, le combustible utilisé est le méthane et l'oxydant c'est l'oxygène pur dont :

$$Q_{CH4} = 0.735 \text{ l/s}$$
$$V_{CH4} = 26 \text{ m/s}$$
$$Q_{O2} = 1.47 \text{ l/s}$$
$$V_{O2} = 26 \text{ m/s}$$

A. Domaine de calcul

La géométrie (domaine de calcul) et son maillage utilisé pendant la simulation par Fluent 6.3.26 sont réalisés par le mailleur Gambit 2.3.16. Nous avons utilisé un domaine de calcul bidimensionnel ayant les mêmes dimensions que le domaine expérimental. Une chambre de combustion de forme parallélépipède ayant un convergent au niveau d'échappement et un brûleur à jets séparés dans sa base. L'étude numérique est effectuée sur la moitié de la géométrie (géométrie axisymétrique) pour gagner le temps de calcul.
Le domaine de calcul est étendu à 1200 mm suivant la direction axial (sens d'écoulement) et de 300 mm dans la direction radiale, figure.1.
Un brûleur à trois jets séparés est utilisé, dont le diamètre de jet central égal à 6 mm, le diamètre de jet annulaire égal à 6 mm et les écartements entre les jets varient entre 12 mm et 20 mm.

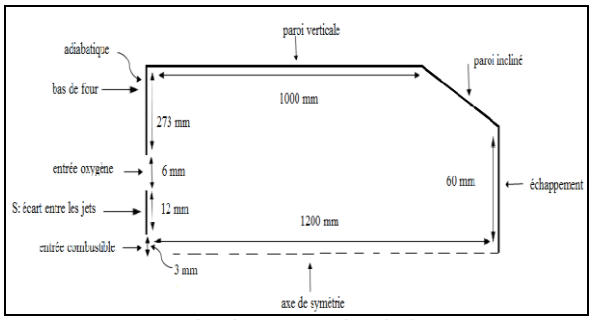

Fig.1 Géométrie du problème à résoudre

Le domaine est subdivisé à 27500 volumes de contrôle quadrilatères non uniformes. Le domaine de calcul est limité par l'axe de symétrie, l'entrée de gaz, l'entrée d'oxydant, la paroi inferieure de la chambre, la paroi verticale de la chambre et l'échappement (figure.2).

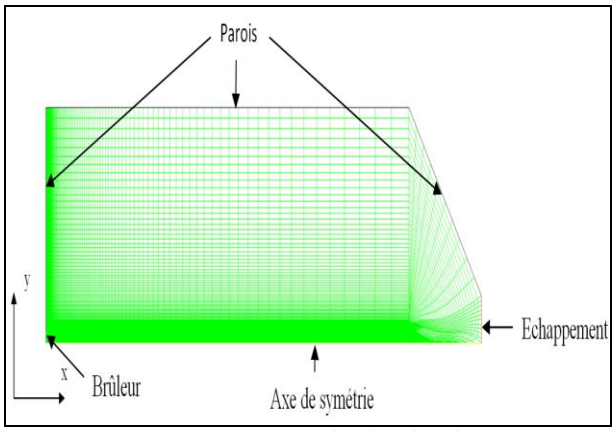

Fig. 2 Maillage de la géométrie étudiée

B. Modulation du problème

La modélisation numérique, basée sur les principes de la thermodynamique, de la mécanique des fluides et des transferts de chaleur, est devenue un outil très utile dans le procédé de conception des divers systèmes thermiques. Avec la simulation numérique, il est possible de concevoir et de calculer les paramètres intervenant dans la conception d'un système de combustion comme les champs dynamiques de l'écoulement, les quantités de chaleur dégagées et les gaz produits, d'une façon rapide et peu couteuse. L'écriture des équations de conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie, ainsi que des équations liées aux espèces chimiques permet de construire des modèles couplés et de les résoudre suivant une approche désignée par CFD (Computational Fluid Dynamics).

- **Modèle de turbulence k-ω-SST**

Le modèle SST (Shear Stress Transport) ou transport des contraintes de cisaillement turbulentes. Ce modèle est dérivé du modèle k-ε-standard. Il propose une combinaison de la formulation k-ω dans la région la plus proche de la paroi avec le modèle k-ε dans la région loin de la paroi.

- **Modèle de combustion**

La modélisation de la combustion est effectuée par le modèle EDM (Eddy dissipation Model). Ce modèle est basé sur l'hypothèse que la réaction chimique est rapide par rapport au procédé de transport dans l'écoulement. Quand les réactifs se mélangent à l'échelle moléculaire, ils forment instantanément les produits. Ce modèle suppose qu'on peut relier directement le taux de réaction au temps nécessaire pour mélanger les réactifs à l'échelle moléculaire. En écoulement turbulent, ce temps est donné par les propriétés des tourbillons, il est proportionnel au temps de mélange défini par l'énergie cinétique de turbulence K et le taux de dissipation ε.

III. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

A. Distribution de la température dans le four : Espacement entre les jets S = 12 mm

Le champ de température trouvé numériquement lors de l'oxy-combustion de méthane dans la zone de

réaction et de même ordre de celui de la littérature [9] de l'ordre de 3000°C. A l'injection du brûleur la température est égale à 25 °C correspondant à la température initiale, alors que le maximum de température est atteint dans la zone de réaction (ligne stœchiométrique) est de l'ordre de 3100 °C. La figure.3 montre que la variation de la température dépond de la zone de mélange interne (zone de mélange entre combustible et comburant). Elle augmente quand le mélange entre le réactifs devient très important et atteint son maximum dans la zone de mélange complète à x = 400 mm. Après la consommation complète des réactifs (CH4, O2), la température commence à diminuer et sa variation au sein du four est due au transfert par rayonnement.

La figure.4 illustre la variation radiale de la température au sein du four. Elle montre que sur l'axe de brûleur la température croit le long de l'écoulement jusqu'à la position x=400 mm, en effet, pour la valeur de x=20 mm prés de la sortie de l'injecteur la température est de l'ordre de 300°K correspondant à la température d'injection initiale, alors qu'on s'éloignant sur l'axe de brûleur, pour les valeurs de x=100 mm, x=400 la température subit une augmentation rapide pour atteindre une valeur maximale de l'ordre de 3300°K. Après cette valeur maximale la température va subir une diminution pour qu'elle atteindre une valeur critique à l'échappement de l'ordre de 1000°K. Prés de l'injecteur à x=20 mm le profil de la température contient trois minimums correspondent aux trois jets des réactifs et deux maximums dans la zone de mélange interne. Ces pics augmentent tout le long de la flamme puisque le mélange se favorise le long de l'écoulement. A x=400 mm le profil de la température est presque parabolique ayant un seul maximum dans la zone de mélange complète.

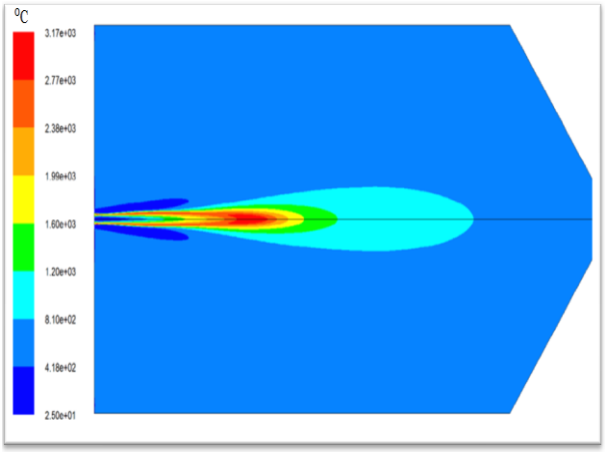

Fig.3 Champs du température

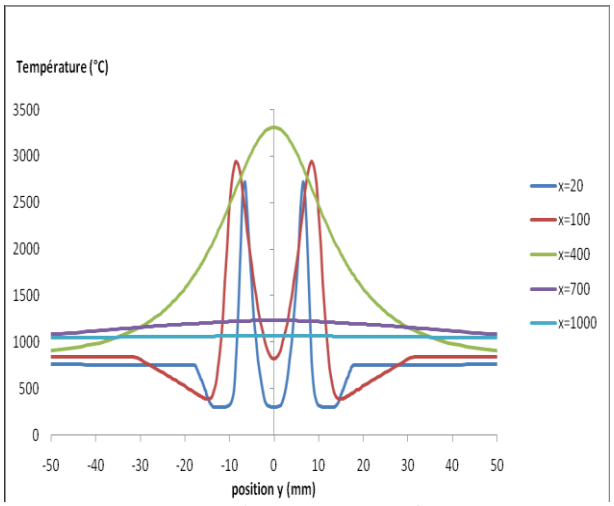

Fig.4 Profils radiaux du température

B. *Etude dynamique de l'écoulement à l'oxy-combustion : Espacement entre les jets S = 12 mm*

La variation radiale de la vitesse longitudinale dans cette configuration est observée à différentes positions le long de la flamme (figure.5). Les positions choisis sont : x= 20 mm ; x=100 mm ; x=400 mm et x=700 mm.

Prés des injecteurs (x=20 mm) le profil de la vitesse ayant trois maximums correspondent au jet centrale du combustible et aux deux jets annulaires de l'oxydant et deux minimums qui sont situés au niveau de l'espacement «S» entre les jets (correspond à la zone de recirculation). Radialement la vitesse s'annule à partir de y = 20 mm.

En s'éloignant de l'injecteur à x=100 mm les deux minimums disparus et il reste que deux maximums correspondent au début de mélange du combustible (méthane) et de l'oxydant (oxygène pur). A partir de x=100 mm la zone de recirculation disparus et l'écoulement devient similaire d'un écoulement issue d'un jet simple comme le montre le profil à x=400 et 700 mm.

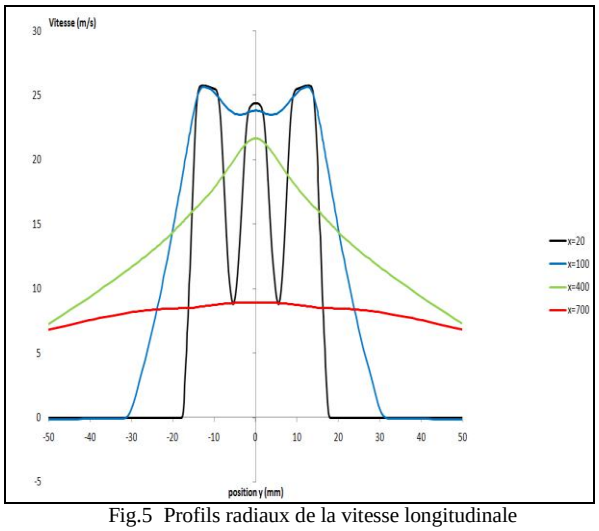

Fig.5 Profils radiaux de la vitesse longitudinale

C. *Effet de l'espacement « S » Sur la distribution de température*

L'augmentation de l'espacement entre les injecteurs du brûleur entraine une amélioration importante de la qualité du mélange entre les réactifs prés de l'injection. Ce qui favorise la réaction de la combustion dans la zone de recirculation et par suite l'augmentation de la température dans cette zone comme le montre la figure.6. En effet, La figure.6.a montre que la température maximale prés de l'injecteur à x=20 mm est de l'ordre de 3000 °K pour S= 12 mm et de l'ordre de 4000 °K pour S = 20 mm et la température minimale située dans le jet du combustible où le mélange entre les réactifs n'est pas important.

A x = 100 mm, figure.6.b, la courbe de variation radiale de la température ayant deux maximums situés au niveau de la zone de mélange entre le combustible et l'oxydant. Ces maximums dépends l'écartement entres les injecteurs de brûleur, ces maximums augmentes quand l'écartement « S » augmente. Sur l'axe de brûleur la courbe de variation de température ayant un minimum. Ce minimum dépend aussi de l'écartement entre les injecteurs et montre que, le mélange devient plus important quand l'écartement « S » augmente.

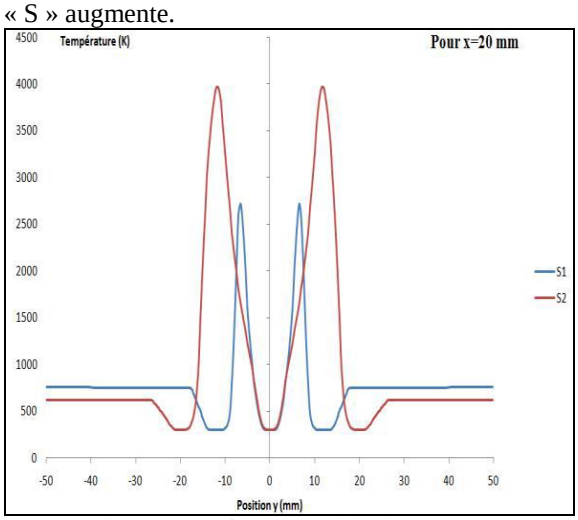

Fig.6.a Profils de la température prés de l'injection (x= 20 mm)

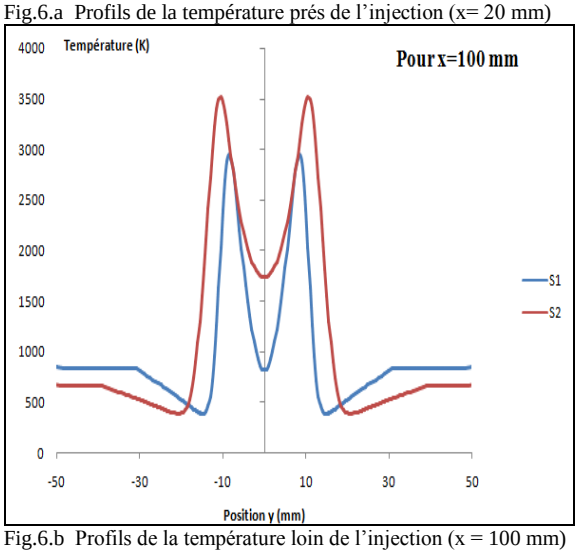

Fig.6.b Profils de la température loin de l'injection (x = 100 mm)

D. *Effet de l'espacement « S » Sur les profils de vitesses*

Les profils de la vitesse longitudinale U présentés dans la figure.7 montre que, près de l'injection x = 20 mm et au niveau de l'espacement « S », la vitesse U décroit avec l'augmentation de l'espacement «S». On remarque, une chute de vitesse même elle est négative pour S2 = 20 mm de l'ordre de -7 m/s. Cette zone de recirculation est caractérisée par l'apparition des tourbillons ou on a de recirculation des gaz frais dans cette zone qui favorise le mélange entre les réactifs prés des injecteurs et améliore la qualité de la combustion.

Loin de l'injection x = 100 mm, les deux minimums situés dans la zone de recirculation sont disparus, et il reste qu'un seul minimum situé au niveau de jet de combustible. Ce minimum décroit si l'espacement entre les injecteurs de brûleur augmente. Ce qui montre que la zone de recirculation entre les réactifs augmente avec l'augmentation de l'espacement « s ».

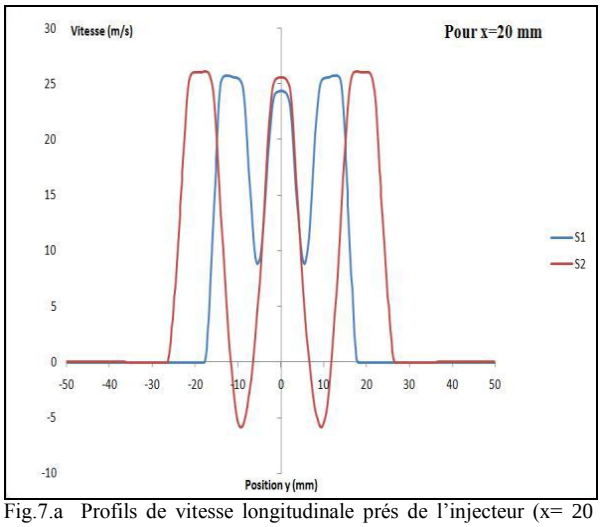

Fig.7.a Profils de vitesse longitudinale prés de l'injecteur (x= 20 mm)

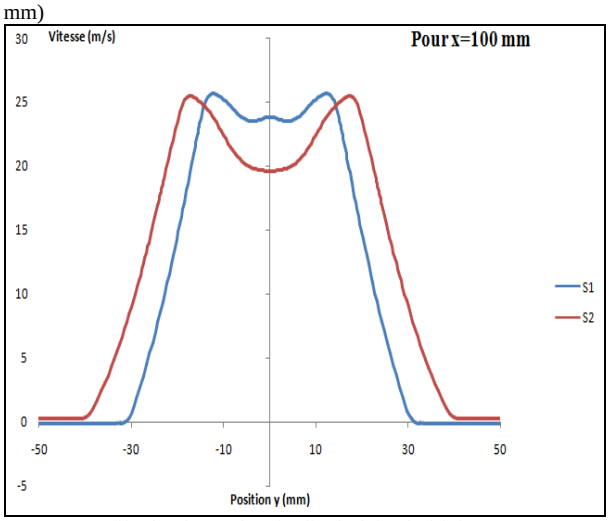

Fig.7.b Profils de vitesse longitudinale loin de l'injecteur (x= 100 mm)

III. CONCLUSION

Dans les flammes de diffusion, le mélange du carburant avec le comburant est un facteur essentiel sur la qualité de la combustion. Ce facteur dépend essentiellement de type de brûleur. Dans cette étude, nous effectuons des comparaisons entres les résultats de simulation numérique entre deux brûleurs à jets séparés, l'un ayant un écartement entre les jets égal à 12 mm et l'autre ayant un écartement égal à 20 mm. Ces comparaisons sont réalisées sur les profils de vitesse longitudinale, les profils de température à différentes hauteurs le long de la flamme.

References

[1] S.P. Burke, T.E. Schumann, Diffusion Flames, Ind. And Eng. Chemistry, 1928. 20 : p. 998-1004.

[2] S. Mahesh, D.P. Mishra, Flame stability and emission characteristics of turbulent LPG IDF in a backstep burner, Fuel, 2008. 87: p. 2614–2619.

[3] S. Mahesh, D.P. Mishra, Flame structure of LPG-air Inverse Diffusion Flame in a backstep burner, Fuel, 2010. 89: p. 2145-2148.

[4] C.E. Baukal, B. Gebhart, Heat transfer from oxygen-enhanced/natural gas flames impinging normal to a plane surface, Experimental Thermal and Fluid Science, 1998. 16: p. 247-259.

[5] A.A.B. Santos, L.G. Jr., C.A. Ferrari, An experiment on the effect of oxygen content and air velocity on soot formation in acetylene laminar diffusion flame produced in a burner with a parallel annular coaxial oxidizer flow, International Communications in Heat and Mass Transfer, 2009. 36: p. 445-450.

[6] C. Lesieur, Modélisation de la combustion turbulente non-prémélangée dans un bruleur à jets séparés, application à la stabilisation d'une oxy-flamme. Thèse, Institut National des Sciences Appliquées de Rouen, 2003.

[7] L. Salentey, Etude expérimentale du comportement de bruleurs à jets séparés, application à la combustion gaz naturel-oxygène pur. Thèse, Faculte des Sciences et Techniques de l'Universite de Rouen, 2002.

[8] T. Boushaki, J. C. Sautet, L. Salentey, and B. Labegorre, The behaviour of lifted oxy-fuel flames in burners with separated jets, Int. Commun. Heat Mass Transf., 2007. 34,1, p. 8–18.

[9] G.E.F.G.N., Utilisation de l'oxygene dans les flammes de diffusion de gaz naturel, Revue Générale deThermique., N° 214, pp.643-649, 1979.