

Etude expérimentale et numérique de la flamme de diffusion enrichie en oxygène et en hydrogène

Zouhaier RIAHI

Research and Technology Center of Energy, Laboratory of Wind Energy Master and Waste Energy Recovery (LMEEVED), B.P. 95 Hammam-Lif, 2050, Tunisia

Corresponding author: Zouhaier.Riahi@crten.rnrt.tn

Hamdi BOUNAOUARA; Mohamed Ali MERGHENI;
Sassi BEN NASRALLAH
National Engineering School of Monastir, LESTE,
Monastir, Tunisia

Jean-Charles SAUTET
CORIA UMR 6614 CNRS – University and INSA ROUEN,
Saint Etienne of Rouvray, France

Résumé

La conversion des combustibles (liquide, solide ou gaz) en énergie thermique nécessite un processus de combustion. Ce processus est l'un des principaux moyens de conversion d'énergie, utilisé dans des nombreux systèmes pratiques pour produire de la chaleur (fours et chaudières), de l'électricité (centrale thermique et turbine à gaz) et pour le transport (moteurs automobiles, moteurs fusées...). L'oxy-combustion, l'enrichissement de l'air de combustion avec l'oxygène ainsi que l'ajout de l'hydrogène au gaz naturel sont des moyens très intéressants permettant d'augmenter le rendement de combustion, de diminuer la consommation de gaz, de réduire les émissions des gaz nocifs à l'environnement, de favoriser la stabilité de flamme et une propagation de la flamme dans des régions où la vitesse de l'écoulement est plus élevée. Cela permet également au mélange de pouvoir brûler hors de la stœchiométrie, régime riche ou pauvre, tout en gardant une bonne stabilité globale. Dans cette étude, on donne quelques résultats expérimentaux et numériques de la combustion turbulente non-prémélangée d'une flamme (GN+H₂/Air+O₂) issue d'un brûleur coaxial.

Mots clés ; Oxy-combustion, Enrichissement de l'oxydant en oxygène, Enrichissement du gaz naturel en hydrogène, Brûleur coaxial.

1. INTRODUCTION

Paubel [1] a effectué des séries d'expériences sur l'oxy-combustion d'un gaz à faible pouvoir calorifique dans un brûleur quadri-coaxial pour avoir les structures de flammes générées par ces combustibles (Imagerie de Chimiluminescence et Spectroscopie d'émission) et il a fait des études sur l'aérodynamiques 2D des écoulements réactifs et non-réactifs correspondants (ADL et 2 LIF simultanées). Il a mis en évidence trois types de flammes en fonction des proportions de gaz et d'oxygène :

- Une flamme concentrique attachée aux lèvres du brûleur, entre le gaz à faible PCI et l'oxygène, stabilisée par une flamme pilote de CH₄
- Une flamme pilote de CH₄, entre toutes les proportions de gaz à faible PCI et d'oxygène.
- Une flamme annulaire externe entre le CH₄ et l'oxygène.

Lesieur [2] 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 les études expérimentales de Salentey [3]. 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 été étudiés expérimentalement et numériquement par différents auteurs. Boushaki et al. [4] 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.

Pour limiter la consommation d'oxygène liée à l'oxy-combustion, tout en améliorant l'efficacité thermique de la combustion, il est possible d'utiliser un mélange Air et oxygène pur comme comburant. Chahine [5] s'est intéressé aux effets de l'enrichissement de l'air par de l'oxygène sur les caractéristiques de la flamme (hauteur de décrochage et longueur de flamme), son comportement, sa stabilité et les instabilités d'écoulement en amont de la flamme, du front de flamme et du sommet de la flamme. Ses expériences ont été réalisées sur une flamme laminaire issue d'un brûleur coaxial et montrent que l'enrichissement en oxygène joue un rôle très important sur la stabilité de flamme et sur l'efficacité énergétique, et permet ainsi de modifier l'amplitude et la fréquence des instabilités. Beltrame et al. [6] ont étudié expérimentalement et numériquement une flamme de diffusion à contre courant de méthane utilisant un mélange air-oxygène comme comburant. Ils ont réalisé une comparaison entre une flamme de méthane/air et une flamme méthane/air enrichi à 68% d'oxygène. D'autres travaux ont été réalisés sur la combustion à l'air enrichi en oxygène et ses effets sur la stabilité, le décrochage de flamme et les extinctions (Gotoda et al. [7], Takahashi et al. [8] et Han et al. [9]).

L'enrichissement du carburant en hydrogène est une procédure de combustion basée sur l'ajout de dihydrogène aux hydrocarbures utilisés dans les moteurs à combustion interne et les brûleurs dans différentes applications industrielles. Les intérêts principaux de ce processus sont la diminution des émissions polluantes (CO₂, NO_x) et la stabilité de flamme. L'hydrogène possède de nombreux avantages en combustion en raison d'une forte inflammabilité, d'une faible énergie d'allumage, d'une très faible masse volumique ainsi qu'une haute diffusivité moléculaire.

2. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL ET MÉTHODE NUMÉRIQUE

2.1. Dispositif expérimental

Le brûleur utilisé de type coaxial est localisé en bas du four et se caractérise par deux jets coaxiaux, un jet central rond d'injection du combustible de diamètre intérieur $d_i = 6$ mm et un jet annulaire d'injection d'oxydant de diamètre $d_e = 18$ mm. Dans le tableau.1 récapitule les propriétés physique du combustible et d'oxydant. La puissance du brûleur a été fixée à 15 kW lors de cette étude. Le débit de combustible (mélange gaz naturel et hydrogène) varie en fonction du pourcentage d'hydrogène de façon à garder la puissance de brûleur constante 15 kW. Le débit de l'oxydant varie en fonction du pourcentage d'oxygène et d'air injectés et en fonction de la richesse.

Le brûleur est placé à la base d'un four de combustion de base carrée de 60*60 cm², et de hauteur de 100 cm. Au sommet du confinement est disposé un convergent d'une hauteur de 20 cm et de section finale de 12*12 cm² afin de limiter les entrées d'air par le haut. Les parois du four sont recouvertes à l'intérieur par de réfractaire d'épaisseur 10 mm et de conductivité thermique 0.1 W/m.K et refroidies par circulation d'eau à l'extérieur pour limiter la température des parois métalliques.

Tableau.1. Propriétés physiques des gaz

	GN	O ₂	Air	H ₂
Masse molaire (g.mol-1)	18.6	32	28.9	2
Masse volumique (kg.m-3)	0.83	1.35	1.2	0.089
PCI (Mj.kg-1)	45	**	**	119

2.2. Technique de mesure

Le dispositif expérimental pour la mesure de PIV (figure.1) nécessite les éléments suivants présentés sur la Figure.1 : une nappe laser qui éclaire la zone de l'écoulement étudiée, une camera CCD et un PC d'acquisition et de contrôle de la chaîne. Le laser utilisé est de type Nd-YAG bi-pulses de longueur d'onde 532 nm. L'énergie de laser est réglable. La nappe laser est formée par une première lentille cylindrique divergente qui étale le faisceau puis par une seconde lentille sphérique convergente qui affine la nappe. Le signal de diffusion émis par les particules est recueilli par une camera CCD FlowMaster3 Lavisio, possédant une dynamique de 14 bits et d'une résolution de 2048*2048 pixels². Elle est associée à un objectif de marque Nikon. Lors de mesures en combustion, un filtre interférentiel centré à 532 nm doit être placé devant l'objectif de caméra afin de couper le rayonnement propre de la flamme. L'acquisition et le traitement de 500 couples d'images sont effectués par le logiciel Dynamic-Studio.

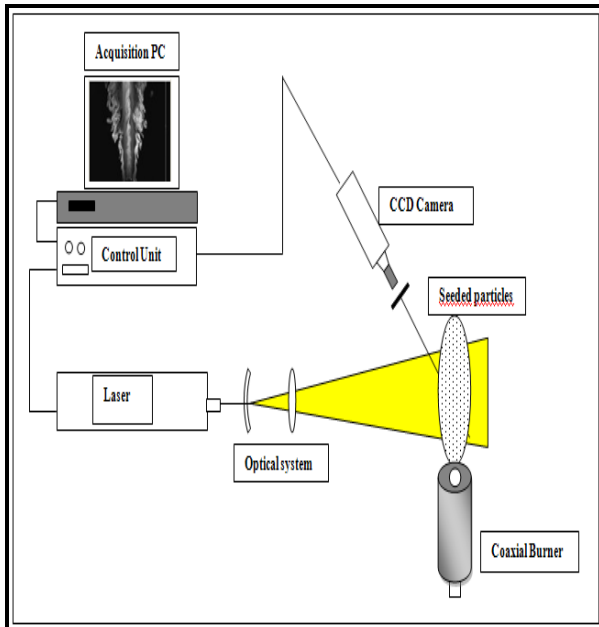


Figure.1. Dispositif expérimental de PIV

2.3. Modélisation numérique de la combustion du (gaz naturel+H2/Air+O2)

A. Modèle de turbulence $k-\omega$ (SST : Shear Stress Transport)

Dans les modèles à deux équations, le choix des variables turbulentes k et ε n'est pas le seul possible. Ainsi, Wilcox [10] utilise à la place les variables k et ω , avec $\omega = \varepsilon/\beta^*k$ et $\beta^*=0.09$. L'avantage majeur est qu'avec ce choix de variables, le comportement en proche paroi est décrit bien plus naturellement qu'avec le modèle $k-\varepsilon$. Le modèle résultant présente cependant, par rapport au modèle $k-\varepsilon$, certains inconvénients loin des parois. Pour cette raison, Menter [11] a imaginé un modèle permettant de basculer progressivement de l'utilisation du $k-\omega$ en proche paroi à l'utilisation du $k-\varepsilon$ loin des parois. La dernière version de ce modèle composite, dite $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport) s'écrit :

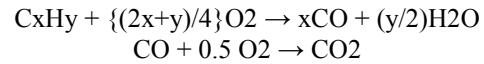
$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k - Y_k + S_k$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega$$

B. 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 . La combustion est modélisée à l'aide d'un mécanisme de réaction en deux étapes comme décrit dans les équations suivantes.



3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Domaine de calcul et conditions aux limites

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 de forme coaxial 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 axiale (sens d'écoulement) et de 300 mm dans la direction radiale. Un brûleur coaxial dont le rayon du jet central égal à 3 mm et le rayon du jet annulaire égal à 9 mm est utilisé. (figure.2).

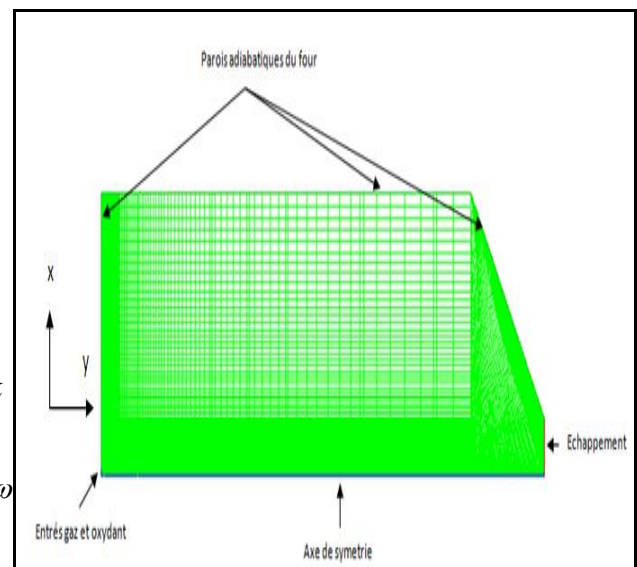


Figure.2. Maillage de la géométrie étudiée

Les profils paraboliques de vitesse dépendent de la configuration étudiée (les profils sont déduits de mesures expérimentales).

La température des réactifs à l'injection est constante et égale à 25°C pour la configuration BC1 || 100 || 0 || 0 et la configuration BC1 || 20 || 80 || 15.

A l'entrée du brûleur, les fractions massiques en fonction de l'enrichissement en oxygène et hydrogène.

3.2. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux

Dans cette étude, nous effectuons des comparaisons entre les résultats de simulation numérique et les résultats trouvés expérimentalement. Ces comparaisons sont réalisées sur les profils de vitesse longitudinale (figure.3), les profils de l'intensité de turbulence (figure.4) et les profils de l'énergie cinétique turbulente (figure.5) pour les configurations BC1 || 100 || 0 || 0 et BC1 || 20 || 80 || 15 à différentes hauteurs le long de l'axe de symétrie de la chambre de combustion ($y = 20$ mm, 50 mm et 100 mm).

Pour ces trois grandeurs, on note un bon accord avec les mesures sur l'allure des profils et sur les valeurs. Les principaux résultats obtenus sont :

- La vitesse longitudinale est maximale sur l'axe de symétrie, elle diminue pour s'annuler aux parois solides.
- L'augmentation de la vitesse du jet annulaire (jet d'oxydant) favorise l'évasement de l'écoulement. En effet, la vitesse longitudinale pour la configuration BC1 || 20 || 80 || 15 est plus importante que celle de la configuration BC1 || 100 || 0 || 0 dans la région lointaine de l'axe de symétrie (à partir de $x = 3$ mm).
- Dans les zones de mélange interne et externe, l'intensité de turbulence est importante.
- Une augmentation importante du débit d'oxydant avec légère augmentation du débit de combustible entraîne l'augmentation de l'intensité de turbulence au niveau de l'axe de symétrie.
- Les maximums des fluctuations de vitesse sont situés aux frontières de l'écoulement où se localisent les couches de mélange interne et externe.
- L'énergie cinétique turbulente, au niveau de la zone de mélange interne, croît le long de l'écoulement.

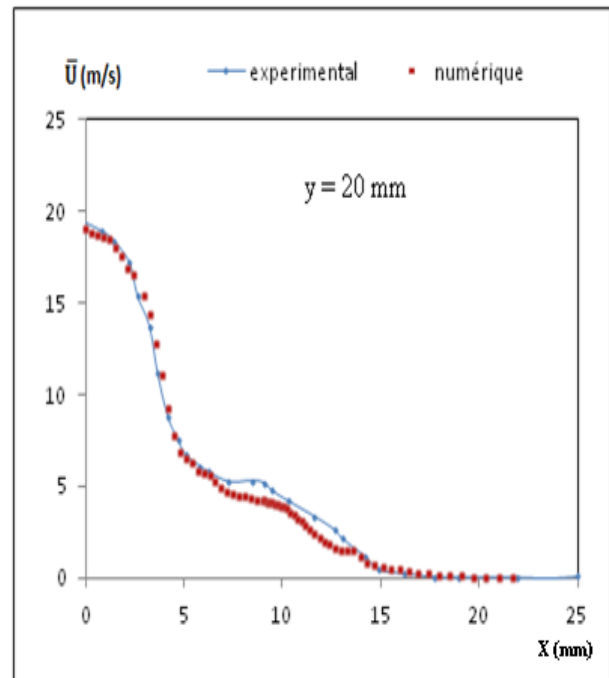


Figure.3.a. Configuration BC1 || 100 || 0 || 0

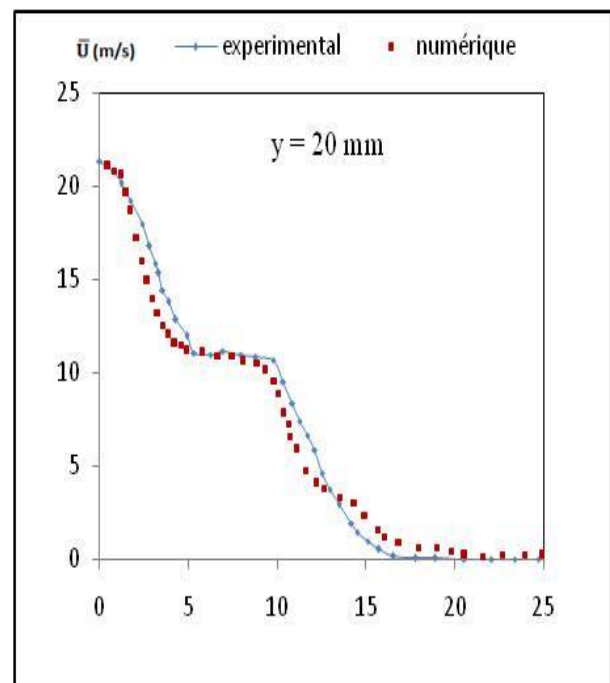


Figure.3.b. Configuration BC1 || 20 || 80 || 15

Figure.3. Profils de la vitesse longitudinale pour les configurations BC1 || 100 || 0 || 0 et BC1 || 20 || 80 || 15

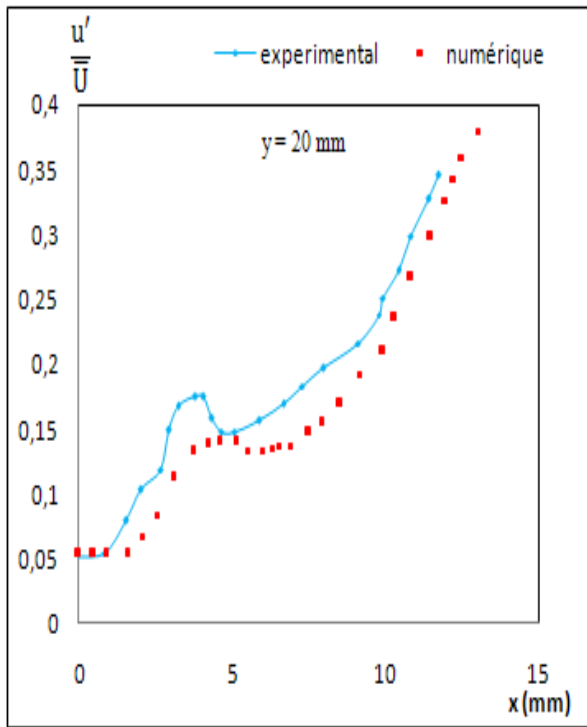


Figure.4.a. Configuration BC1 || 100 || 0 || 0

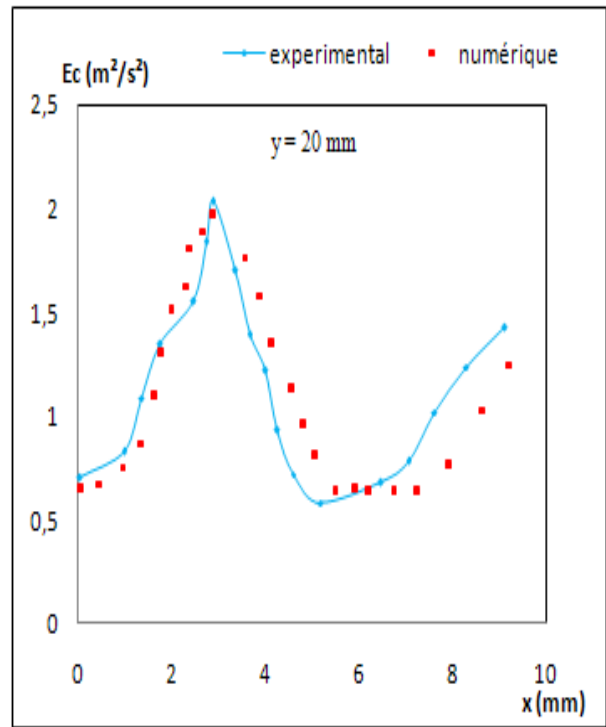


Figure.5.a. Configuration BC1 || 100 || 0 || 0

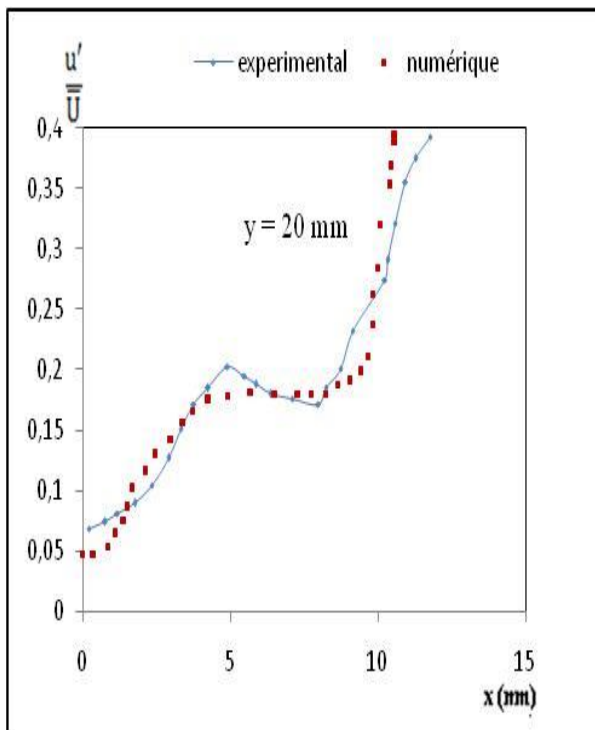


Figure.4.b. Configuration BC1 || 100 || 0 || 0

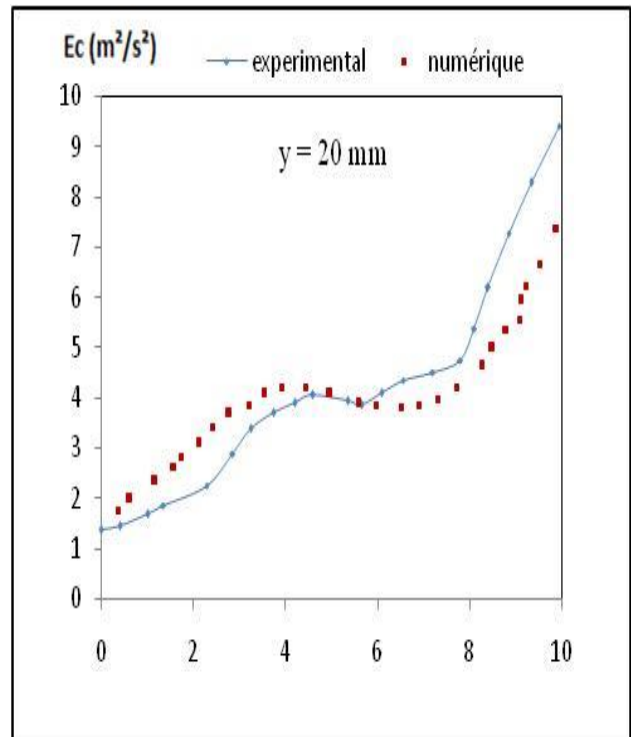


Figure.5.b. Configuration BC1 || 100 || 0 || 0

Figure.4. Profils de l'intensité de turbulence pour les configurations BC1 || 100 || 0 || 0 et BC1 || 20 || 80 || 15

Figure.5. Profils de l'énergie cinétique turbulente pour les configurations BC1 || 100 || 0 || 0 et BC1 || 20 || 80 || 15

4. CONCLUSION

Dans cette étude, nous avons validé le modèle de simulation avec mes résultats expérimentaux, en montrant que ce modèle permet de simuler des flammes turbulentes issues d'un brûleur coaxial. Ce modèle a ensuite été utilisé pour comparer la dynamique d'écoulement des flammes de diffusion à différents enrichissements d'oxydant en oxygène et enrichissement du combustible en hydrogène à la stœchiométrie et en régime stationnaire.

RÉFÉRENCES

- [1] X. PAUBEL, Analyse expérimentale des oxy-flammes turbulentes non prémélangées de gaz à faible pouvoir calorifique, Thèse, Institut National des Sciences Appliquées de Rouen, 2007.
- [2] C. Lesieur, Modélisation de la combustion turbulente non-prémélangée dans un brûleur à jets séparés, application à la stabilisation d'une oxy-flamme. Thèse, Institut National des Sciences Appliquées de Rouen, 2003.
- [3] L. Salentey, Etude expérimentale du comportement de brûleurs à jets séparés, application à la combustion gaz naturel-oxygène pur. Thèse, Faculté des Sciences et Techniques de l'Université de Rouen, 2002.
- [4] 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.
- [5] M. Chahine, Etude des effets magnétiques et des effets de l'enrichissement en oxygène sur la combustion d'une flamme de diffusion laminaire CH₄-Air. Optimisation de l'efficacité énergétique. Thèse, Université d'Orléans, 2012.
- [6] A. Beltrame, P. Porshnev, W. Merchan, A. Saveliev, A. Fridman, L.A. Kennedy, O. Petrova, S. Zhdanok, F. Amouri, O. Charon, Soot and NO formation in methane-oxygen enriched diffusion flames, *Combustion and Flame*, 2001. 124 : p. 295-310.
- [7] H. Gotoda, S. Kawaguchi, Y. Saso, Experiments on dynamical motion of buoyancy induced flame instability under different oxygen concentration in ambient gas, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2008. 32: p.1759-1765.
- [8] F. Takahashi, G.L. Linteris, V.R. Katta, Extinguishment of methane diffusion flames by inert gases in coflow air and oxygen-enriched microgravity environments, *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011. 33,2: p. 2531-2538.
- [9] J.W. Han, C.E. Lee, S.M. Kum, Y.S. Hwang, Study on the improvement of chemical reaction mechanism of methane based on the laminar burning velocities in OEC, *Energy & Fuels*, 2007. 21: p. 3202-3207.
- [10] D.C. Wilcox, *Turbulence modeling for CFD*, DCW Industries, Inc., 1998
- [11] F.R. Menter, Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, vol. 32, No 8. pp. 1598-1605, 1994