

# Modélisation de la Combustion Partiellement Prémélangée du Biogaz

Benarous A.<sup>1,2</sup>, Karmed D.<sup>3</sup>, Liaïd A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Département de Mécanique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, UHBC, Chlef, Algérie

<sup>2</sup> Laboratoire de Recherche en Technologie de l'Environnement (LTE), ENSET, Oran, Algérie

<sup>3</sup> Institut Pprime, Département Fluides-Thermique-Combustion, ENSMA, Poitiers, France

*Mots clés : brûleur ; modèle LW-P ; flamme partiellement prémélangée ; Code\_Saturne*

## Introduction

La dernière décennie a vu le prix des combustibles considérablement augmenter, au point de rendre rentable l'utilisation des biogaz ou des gaz de réforme industrielle.

Le projet européen intitulé Alternative Fuels for industrial gas Turbines (AFTUR), avait pour objectif d'étudier la combustion turbulente de tels gaz [1]. Plusieurs combustibles ont été choisis pour ce projet et l'un d'entre eux, issu de la méthanisation des déchets, est composé principalement de méthane dilué avec du CO<sub>2</sub> et du N<sub>2</sub>.

Comparé avec le gaz naturel, le biogaz dispose d'un pouvoir calorifique sensiblement inférieur (233 MJ/m<sup>3</sup>) à celui du gaz naturel (39.2 MJ/m<sup>3</sup>), ce qui impose un débit supplémentaire (de 68%) pour toute utilisation devant délivrer la même puissance thermique que celle du gaz naturel. En l'occurrence, la stabilité de la flamme du biogaz peut être altérée en raison des forts débits imposés, laissant place à des risques de décrochage « liftoff » ou d'extinction « blowout » [2]. Les instabilités peuvent être atténuées en utilisant des co-courants (coflow) d'air ou de gaz brûlés issus de flammes pilotes, dans le but d'élever la valeur de la vitesse fondamentale des flammes de prémélange pauvres, assurant entre autre, un accrochage de la flamme aux lèvres du brûleur [3].

En ce cas de figure, le prémélange principal brûle alors que le co-courant diffuse vers la zone réactionnelle où la richesse devient variable; le régime de combustion en régime partiellement prémélangé, est ainsi établi.

Dans cette étude, on présente un modèle de combustion turbulente, nommé LW-P (comme Libby-Williams-Poitiers) [4] permettant de décrire la structure d'une flamme de prémélange lors d'une combustion à richesse variable.

Le modèle est utilisé dans le cas d'une flamme turbulente de biogaz issue d'un brûleur Bunsen, débouchant sur une chambre de combustion dans le cas du montage expérimental du laboratoire ICARE-Orléans, France.

## Le dispositif expérimental

Nous disposons d'une chambre de combustion de 300 mm de diamètre interne, d'un volume de 80 litres permettant de travailler avec une pression maximale de 0.7 MPa.

Le combustible est prémélangé en amont de la chambre de combustion. La flamme étudiée est issue d'un brûleur de type Bunsen, dont le diamètre de sortie mesure 25 mm. Elle est stabilisée par une flamme pilote annulaire de 30 mm de diamètre (Fig.1).

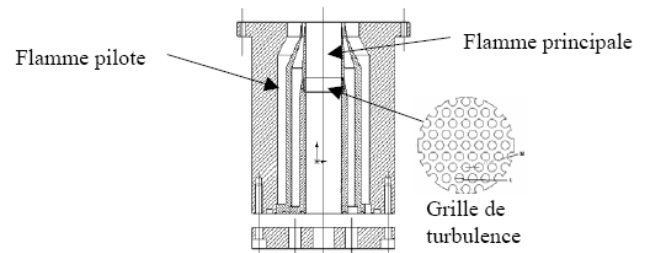
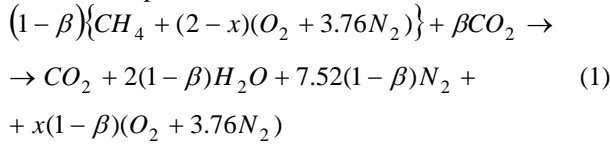


Figure .1 Brûleur Bunsen et grille de turbulence [13 ].

Une richesse à l'injection de 0.6 est utilisée dans ce cas de figure, cette valeur est couramment rencontrée dans les turbines à gaz et diverses études similaires [3]. La flamme pilote est un mélange de méthane et d'air à un dosage stœchiométrique. Le débit de cette flamme est suffisamment faible pour ne pas perturber la flamme principale.

Le mélange principal est à la base de méthane (CH<sub>4</sub>), dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et d'air, et la réaction de combustion complète s'écrit :



$x$  représente l'excès d'air et  $\beta$  est la fraction molaire du CO<sub>2</sub> dans le carburant méthane/air. Une vitesse débitante du prémélange principal est maintenue constante et égale à 2.3 m/s en sortie du brûleur. La turbulence est créée par une grille régulièrement perforée (Fig.1), placée perpendiculairement à l'écoulement. L'hypothèse de turbulence homogène et isotrope est valable.

### Présentation du modèle

Dans le modèle LW-P, l'état thermo-chimique du mélange est déterminé par deux variables, la fraction massique du combustible  $Y$ , caractérisant l'avancement des réactions chimiques et la fraction de mélange  $\xi$ , considérée comme un scalaire passif lorsque les parois du système sont adiabatiques et imperméables aux espèces [5]. Les couples  $(\xi, Y)$  qui caractérisent l'état thermo-chimique local sont définis dans un domaine limité par trois droites (Fig.2), la droite de mélange qui représente les états frais et les deux droites de combustion, qui représentent les états entièrement brûlés. Les points à l'intérieur du domaine représentent les gaz entraînés de brûler.

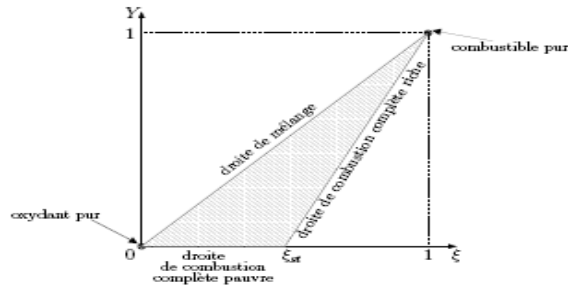


Figure.2 Domaine d'existence des couples  $(\xi, Y)$

Le taux de consommation du combustible est donné par une loi de type Arrhenius modifiée aux cas de la combustion à richesse variable [6] ; qui dans le cas d'un mélange pauvre s'exprime comme :

$$\omega = \rho\Omega = \rho K(\xi)[Y]e^{-T_a/T}$$
(2)

$K(\xi)$  est une tabulation préétablie du facteur pré exponentiel créée par un logiciel de calcul de flammes laminaires monodimensionnelles [7].

En plus des équations de continuité, de quantité de mouvement et de l'énergie, moyennées au sens de Favre, le transport des quantités moyennes  $\tilde{Y}, \tilde{\xi}$  n'est pas suffisant pour représenter correctement les phénomènes associés à la turbulence. Dans le modèle LW-P, on introduit en sus, les

équations de bilan pour les variances  $\overline{\rho Y''^2}, \overline{\rho \xi''^2}$  et une équation pour la co-variance  $\overline{\rho Y'' \xi''}$ . Le système d'équations se résume en :

Equation pour la fraction de mélange,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho \tilde{\xi}}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{\rho \tilde{u}_k \tilde{\xi}})$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \overline{\rho D \frac{\partial \xi}{\partial x_k}} - \overline{\rho u_k'' \xi''} \right)$$
(3)

Equation pour la variance de la fraction de mélange,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho \xi''^2}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{\tilde{u}_k \rho \xi''^2})$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \overline{\rho D \frac{\partial \xi''^2}{\partial x_k}} - \overline{\rho u_k'' \xi''^2} \right)$$

$$- 2\rho D \frac{\partial \xi''}{\partial x_k} \frac{\partial \xi''}{\partial x_k} - 2\overline{\rho u_k'' \xi''} \frac{\partial \tilde{\xi}}{\partial x_k}$$
(4)

Equation pour la fraction massique du combustible

$$\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho \tilde{Y}}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{\rho \tilde{u}_k \tilde{Y}})$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \overline{\rho D \frac{\partial Y}{\partial x_k}} - \overline{\rho u_k'' Y''} \right) + \overline{\omega}$$
(5)

Equation pour la variance de fraction massique du combustible,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho Y''^2}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{\tilde{u}_k \rho Y''^2})$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \overline{\rho D \frac{\partial Y''^2}{\partial x_k}} - \overline{\rho u_k'' Y''^2} \right)$$

$$- 2\rho D \frac{\partial Y''}{\partial x_k} \frac{\partial Y''}{\partial x_k} - 2\overline{\rho u_k'' Y''} \frac{\partial \tilde{Y}}{\partial x_k} + 2\overline{Y'' \omega}$$
(6)

Equation pour la co-variance,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho Y'' \xi''}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{\tilde{u}_k \rho Y'' \xi''})$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \overline{\rho D \frac{\partial Y'' \xi''}{\partial x_k}} - \overline{\rho u_k'' Y'' \xi''} \right)$$

$$- 2\rho D \frac{\partial Y''}{\partial x_k} \frac{\partial \xi''}{\partial x_k} - \overline{\rho u_k'' Y''} \frac{\partial \tilde{\xi}}{\partial x_k}$$

$$- \overline{\rho u_k'' \xi''} \frac{\partial \tilde{Y}}{\partial x_k} + \overline{Y'' \xi'' \omega}$$
(7)

Une fonction densité de probabilité (pdf) jointe à neuf paramètres [4] pour la fraction de mélange et de la fraction massique, est utilisée pour le calcul des termes moyens et des variances. Les termes de diffusion turbulente sont modélisés par de simples lois de type gradient, qui pour le cas du modèle de turbulence  $k - \varepsilon$  s'expriment comme :

$$\overline{\rho u_k \Phi''} = -\bar{\rho} \frac{C_\mu \tilde{k}^2}{\sigma_\phi \tilde{\varepsilon}} \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial x_k} \quad (8)$$

Dans les équations (4),(6) et (7), les termes de dissipation

scalaire de type  $\epsilon_{\phi_i \phi_j} = -2\rho D \frac{\partial \Phi_i''}{\partial x_k} \frac{\partial \Phi_j''}{\partial x_k}$  sont exprimés par

des modèles propres aux prémélanges partiels [8]. Le modèle LW-P a été implémenté dans le solveur volumes finis Code\_Saturne [9].

### Stabilité de la flamme

Le co-courant utilisé est formé de gaz brûlés issus d'une flamme pilote quasi-laminaire à dosage stœchiométrique.

Les gaz brûlés permettent d'une part, de préchauffer les réactifs du prémélange et d'élever la valeur de la vitesse fondamentale de propagation de la flamme, d'autre part. Les analyses paramétriques [10] ont montré que la flamme pilote ne pouvait perturber la flamme principale que lors d'un faible débit du co-courant, correspondant à une vitesse ne dépassant pas 5% de la valeur débitante (2.3 m/s).

Le diagramme de stabilité pour une flamme de méthane ainsi que pour une flamme de biogaz sont représentés dans la figure 3. Trois types de flammes apparaissent dans ces diagrammes, l'un est stable à forte richesse, le deuxième est instable, enfin une restabilisation juste avant l'extinction, est observée (droite en bas de figure).

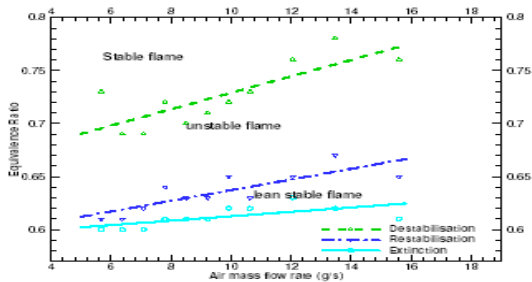


Figure 3.a. Diagramme de stabilité pour une flamme méthane-air [11].

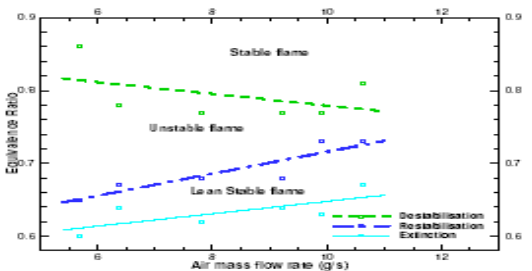


Figure 3.b. Diagramme de stabilité pour une flamme de biogaz [11].

En effet, pour un débit massique opératoire avoisinant les 8g/s, la richesse nécessaire au fonctionnement stable passe du domaine [0.61, 0.63] pour une flamme méthane-air à [0.62, 0.68] pour le cas d'une flamme de biogaz.

### Domaine de calcul et conditions aux limites

L'écoulement en sortie du brûleur ne débouche pas sur une atmosphère totalement calme et infinie, la chambre de combustion est le siège de zones de recirculation. Si nous considérons que la totalité du débit à l'intérieur de la chambre recircule, la conservation de la masse permet d'avoir une estimation de la vitesse de recirculation qui est de l'ordre de 0.7% de la vitesse débitante [10]. Ceci permet de modéliser le jet comme étant turbulent, libre et axisymétrique.

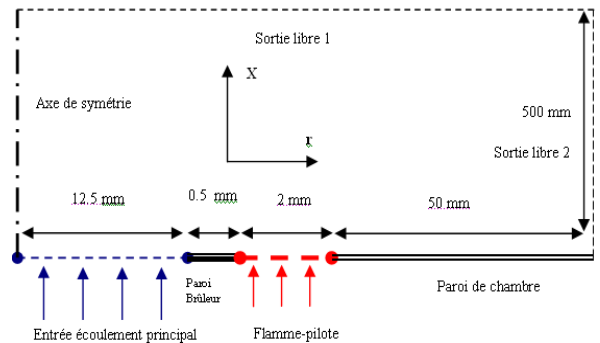


Figure 4. Domaine de calcul et conditions aux limites

Pour conserver une vitesse débitante constante, le profil de vitesse pour l'écoulement à l'entrée principal est de type [12] :

$$u = u_0 (1 - r/r_b)^n \quad (9)$$

L'énergie cinétique turbulente  $k$  pour l'entrée principale est exprimée en profil polynomiale (de degré deux) en fonction de la distance radiale  $r$ . Cependant, la longueur intégrale de turbulence est constante pour une dilution donnée mais varie d'une composition à l'autre en accord avec les mesures de Cohé et al. [13] (Fig.5). En l'occurrence, le taux de dissipation  $\varepsilon$  en entrée du domaine, suit une loi en  $r^3$  [10].

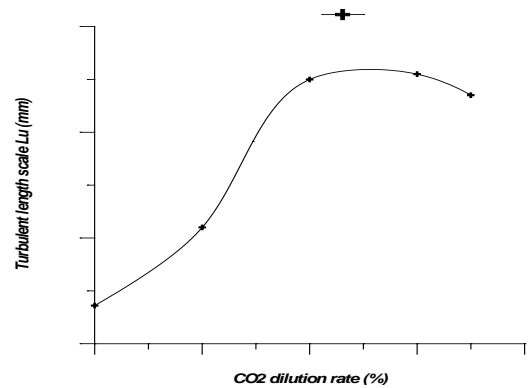


Figure 5. Echelle intégrale de turbulence pour divers compositions du biogaz.

L'analyse thermochimique du mélange CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub>-air montre que l'augmentation du taux de dilution en dioxyde de carbone a pour effet de diminuer la vitesse fondamentale de propagation laminaire de la flamme (Fig.6). Le taux de dilution est limité par la valeur de 35% en teneur massique de CO<sub>2</sub> et ce, pour assurer une stabilité de la flamme et rester dans le domaine d'inflammabilité du méthane.

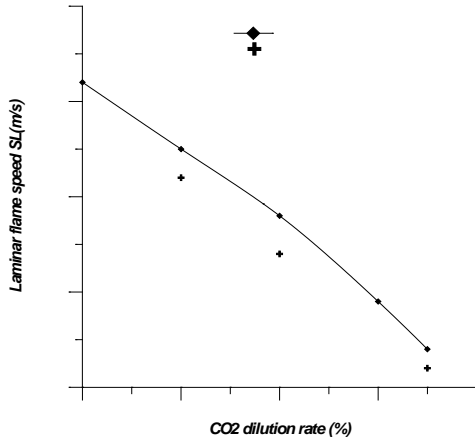


Figure.6. Vitesse de propagation laminaire de la flamme.

D'autres part, l'augmentation du taux de dilution en CO<sub>2</sub> ne paraît pas influencer considérablement le niveau de température (Fig.7) de la flamme. Cependant, le point stœchiométrique est sérieusement affecté vers les valeurs les plus basses, ce qui impose de fonctionner, pour un même niveau thermique, avec des débits de combustible plus importants.

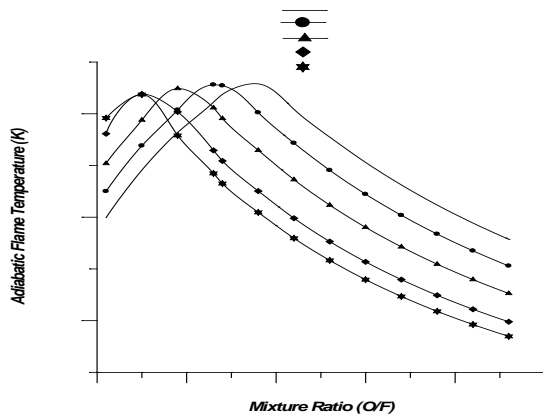
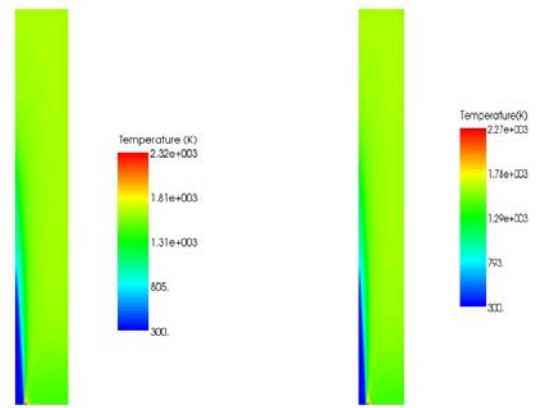


Figure.7. Effet de la dilution sur la température de flamme adiabatique.

Le contour spatial de la température statique montre que la flamme pilote, bien que se trouvant à un niveau thermique important (proche de 2300 K), n'affecte pas la flamme principale (Fig.8.a) et ce, en raison du faible débit imposé aux gaz brûlés dans des conditions de stœchiométrie.



a. 100 %CH<sub>4</sub>

b. 65% CH<sub>4</sub> -35% CO<sub>2</sub>

Figure.8. Contour spatial de la température statique

Le comportement thermochimique quant à l'ajout du CO<sub>2</sub> dans le combustible, est confirmé par l'utilisation du modèle LW-P (Fig.8.b), où l'on note une légère diminution de la température de la flamme pilote en raison de la forte diffusion thermique au niveau du plan de sortie du brûleur, malgré que le niveau thermique global des gaz brûlés dans la chambre de combustion, reste relativement inchangé (proche de 1300 K).

Par analogie avec les flammes de prémélange total, on pourrait définir une variable adimensionnelle basée sur la fraction massique du combustible et définie comme :

$$\tilde{c} = 1 - \tilde{Y} / \tilde{\xi} \quad (10)$$

Cette variable prend une valeur unitaire dans les gaz brûlés et s'annule dans les gaz frais, son contour spatial (Fig.9) est identique à celui de la variable d'avancement utilisée dans les configurations de prémélange parfait.

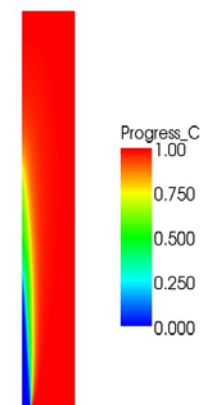


Figure.9. Contour spatial de la variable d'avancement.

La (pseudo) variable d'avancement est généralement utilisée pour quantifier la hauteur de la flamme [5]. Cette dernière étant définie comme la position axiale du point qui sépare les gaz frais des gaz brûlés,  $h_f = X_{\tilde{c}=0.9}$ .

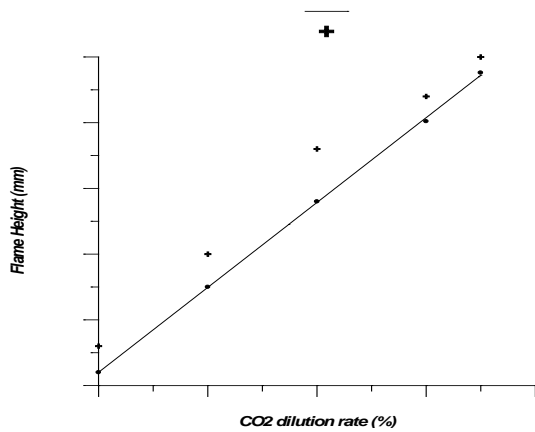


Figure. 10. Effet de la dilution sur la hauteur de la flamme.

L'ajout du dioxyde de carbone a pour effet de contribuer à l'augmentation de la hauteur de la flamme turbulente en raison de la baisse de réactivité du mélange due à la dilution. Les résultats (Fig.10) paraissent assez fidèlement reproduits par rapport aux mesures de tomographie plane par laser [13].

### Conclusion

Le modèle de combustion turbulente LW-P a été utilisé pour les cas, d'une flamme de méthane pur et d'une flamme de biogaz. Les calculs montrent que la structure de la flamme est partiellement modifiée par l'ajout du CO<sub>2</sub> sans que le niveau thermique global soit affecté. L'utilisation du biogaz comme carburant est intéressante dans le cas où les instabilités de combustion sont atténuées par utilisation des co-courants.

### Nomenclature

| Symbole                  | Désignation   |
|--------------------------|---|
| $c$                      | Variable d'avancement                                       |
| $C_\mu = 0.09$           | Constante de Von-Karman                                     |
| $D$                      | Coefficient de diffusion                                    |
| $h_f$                    | Hauteur de flamme   |
| $k$                      | Energie cinétique de turbulence                             |
| $K$                      | Facteur pré-exponentiel                                     |
| $r, r_b$                 | Distance radiale, rayon du brûleur                          |
| $T, T_a$                 | Température d'activation                                    |
| $u_k, u_0$               | Composante du vecteur vitesse, vitesse sur l'axe du brûleur |
| $x$                      | Coefficient stœchiométrique de l'excès d'air                |
| $x_k, X$                 | Composante du vecteur position, distance axiale             |
| $Y$                      | Fraction massique du combustible                            |
| <i>Symboles grecques</i> |   |
| $\beta$                  | Fraction molaire du CO <sub>2</sub> dans le fuel            |
| $\varepsilon$            | Taux de dissipation de $k$                                  |
| $\xi$                    | Fraction de mélange   |
| $\omega$                 | Taux de consommation du carburant                           |
| $\rho$                   | Masse volumique   |
| $\sigma_\phi = 0.7$      | Constante de Schmidt  |
| $\bar{g}$                | Moyenne de Reynolds de $g$                                  |
| $\tilde{g}$              | Moyenne de Favre de $g$                                     |
| $\overline{g''^2}$       | Variance de $g$   |

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Golakp I., Lebas E., (2004), " Alternative Fuels for Industrial Gas Turbine (AFTUR), *Applied Thermal Engineering*, Vol.24, No.11-12, pp.1655-1663.
- [2] Terry S.D., Lyons K.M., (2006), " Turbulent lifted flames in the hysteresis regime and the effects of coflow, *Journal of Energy Resources Technology, Trans.ASME*, Vol.128, No.4, pp.319-324.
- [3] Taupin B., (2003), "Etude de la combustion turbulente à faible richesse, haute température et haute pression", *Thèse de Doctorat en Energétique*, Rouen, France.
- [4] Robin V., Mura A., Champion M, Plion P., (2006), "A multi Dirac presumed PDF model for turbulent reactive flows with variable equivalence ratio", *Combustion Science and Technology.*, Vol.118 (10-11), pp.1843-1870.
- [5] Karmed D., (2009), "Transport et turbulence en combustion " , Polycopié du cours, ENSMA, Poitiers, France.
- [6] Fernandez-Tarrazo E., Sanchez A.L., Linan A., Williams F.A., (2006), "A simple one-step chemistry model for partially premixed hydrocarbon combustion", *Combustion and Flame*, Vol.147, pp.32-38.
- [7] R.J. Kee, F.M. Rupley, J.A. Miller (1989), SANDIA REPORT SAN89-8009 UC-401.
- [8] Mura A., Robin V., Champion M.,(2007), "Modeling of scalar dissipation in partially premixed turbulent flames", *Combustion and Flame*, Vol.149, pp.217-224.
- [9] Archambeau F., Nehitoua N., Sakiz M., (2004) "Code Saturne : A Finite Volume Code for Turbulent Flows", *International Journal of Finite Volumes*, Vol.1, No.1.
- [10] Benarous A., Liazid A., Mokhtardidouche A., Karmed D., (2010), *Journal of Scientific Research (JSR)*, Vol.1, No.1, pp.290-295.
- [11] Lafay Y., Cabot G., Boukhalfa, A., (2007), "Etude expérimentale de la combustion de biogaz dans une chambre de turbine à gaz", *18<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique*, Grenoble, France.
- [12] Lachaux T. (2004) "Etude des effets de la haute pression sur la structure et la dynamique des flammes turbulentes de prémélange pauvre de méthane-air", *Thèse de Doctorat en Mécanique des Fluides*, Orléans, France.
- [13] Cohé C., Halter F., Chauveau C., Gokalp I. (2005), "Etude des flammes turbulentes de prémélange pauvre CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub>-air : effets de la teneur en CO<sub>2</sub> et de la pression", *Journées thématique GDR-CNRS*, Orléans, France.