

Analyse expérimentale de l'interaction flamme paroi

Badri TAYEBI, Cédric GALIZZI, Jean-François LEONE et Dany ESCUDIE *

CETHIL - Centre de Thermique de Lyon, UMR 5008 (CNRS – INSA – UCBL)

INSA de Lyon – 9, rue de la physique – 69621 villeurbanne Cedex

*(auteur correspondant : dany.escudie@insa-lyon.fr)

Résumé – Une configuration expérimentale académique a été mise en place afin d'étudier les mécanismes d'interaction flamme paroi. Des visualisations par tomographie laser associées à des mesures par Anémométrie Doppler Laser ont permis d'analyser la topologie du front de flamme et l'aérodynamique des gaz frais en proche paroi. Les premiers résultats montrent que la présence de la plaque provoque une déviation globale de la flamme en V qui augmente avec l'intensité de turbulence de l'écoulement. Ce comportement est associé à une diminution sensible de la longueur du front de flamme dans la zone d'interaction.

Nomenclatures

c	<i>variable d'avancement</i>	<i>Symboles grecs</i>	
d	<i>distance barreau paroi, mm</i>	η	<i>variable de similitude, $\eta = y\sqrt{\frac{U}{\nu x}}$</i>
d'	<i>distance flamme paroi, mm</i>	ν	<i>viscosité cinématique, $m^2.s^{-1}$</i>
L	<i>longueur du front de flamme, mm</i>	δ_T	<i>épaisseur apparente du front turbulent</i>
It	<i>intensité de turbulence, %</i>	<i>Indices</i>	
x	<i>axe longitudinal</i>	p	<i>paroi</i>
y	<i>axe transversal</i>	0	<i>flamme libre</i>
U	<i>vitesse longitudinale</i>		

1. Introduction

Dans la plupart des dispositifs de combustion industriels, les phénomènes liés à l'interaction flamme-paroi, qui étaient encore récemment négligés, font aujourd'hui l'objet d'une attention particulière. En effet, la présence d'une paroi modifie de manière importante les couplages aérothermochimiques et peut être notamment responsable d'extinctions locales de la flamme. Une analyse fine des mécanismes mis en jeu est donc indispensable, tant pour la compréhension fondamentale des mécanismes réactifs que pour l'amélioration des dispositifs industriels, en termes de rendement énergétique et d'impact environnemental [1-3].

Un nombre croissant d'études, aussi bien expérimentales que numériques, sont consacrées à cette configuration flamme-paroi. Poinot et al. [4] ont ainsi étudié numériquement l'interaction entre une flamme turbulente et une paroi frontale dans une configuration bidimensionnelle. Il apparaît que le processus d'interaction est caractérisé par trois effets : un effet thermique local, un effet géométrique qui provoque une réduction de l'extension du brush (épaisseur apparente du front de flamme turbulent) et un effet de laminarisation très proche de la paroi. En utilisant la simulation numérique directe (DNS), Al-Shaalan et Rutland [3] ont étudié l'interaction entre une flamme turbulente stabilisée sur un barreau et une paroi latérale dans un écoulement de Couette tridimensionnelle. Ils montrent que le dégagement de chaleur provoque une diminution des échelles de la turbulence, par augmentation de la viscosité et une modification du profil des vitesses moyennes dans la partie externe de la couche limite turbulente. Néanmoins, dans ce type d'études, le faible nombre de champs instantanés rend l'analyse statistique de la turbulence délicate, particulièrement lorsque le dégagement de chaleur est pris en compte [5]. Dans une configuration expérimentale similaire

à celle utilisée dans notre étude, Richard et Escudié [6] ont analysé l'influence de la structure de la couche limite sur l'interaction entre une flamme prémélangée air-hydrogène et une paroi verticale. Ils définissent un paramètre d'interaction (I), qui représente le rapport entre le brush de la flamme turbulente et l'épaisseur de la couche limite. Pour des valeurs de ce paramètre de l'ordre de 1, ils mettent en évidence une augmentation de la longueur du front de flamme d'autant plus grande que la couche limite est turbulente.

Ce travail constitue une première étape de l'analyse des mécanismes physiques intervenant lors de l'interaction d'un front de flamme prémélangé et d'une paroi. Seule l'influence du niveau de turbulence de l'écoulement principal sur les phénomènes mis en jeu est ici étudiée, la couche limite se développant sur la paroi est laminaire et les transferts thermiques pariétaux sont minimisés.

Dans un premier temps, les caractéristiques de la couche limite laminaire et de la flamme libre (non perturbée par la paroi) sont détaillées. Des mesures de vitesse réalisées en proche paroi, en présence de la flamme, sont ensuite analysées afin de comprendre l'évolution de la couche limite. Enfin, la topologie du front de flamme est présentée afin de mettre en évidence l'influence de la paroi sur la flamme oblique.

2. Dispositif expérimental et techniques de mesures

2.1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé est constitué d'une soufflerie qui permet de générer un écoulement de prémélange air-méthane pauvre orienté verticalement (vitesse de l'écoulement égale à 5 m/s et richesse de 0,63). La flamme en V est stabilisée sur un barreau de 2 mm de diamètre disposé sur le plan de sortie d'un brûleur bidimensionnel de section carrée (115x115 mm²). Alors que le front gauche de la flamme se développe librement, le front droit vient interagir avec une paroi verticale. Celle-ci a été usinée dans une céramique de faible conductibilité thermique afin de minimiser les transferts thermiques pariétaux. Le bord d'attaque de la paroi a été dimensionné de manière à générer une couche limite laminaire. La distance (d) entre le barreau de stabilisation de la flamme et la paroi peut être ajustée de même que la hauteur du bord d'attaque de la paroi. Deux référentiels permettent de décrire indépendamment la flamme de la couche limite (fig 1 a). Le premier (x,y) est associé au barreau de stabilisation alors que le second (x_p,y_p) est lié au bord de la paroi, qui est disposé à 50 mm du plan de sortie du brûleur ($x = 50$ mm). Deux grilles de turbulence peuvent être disposées en amont de zone de stabilisation pour générer une turbulence homogène et isotrope d'intensité 4 ou 8%.

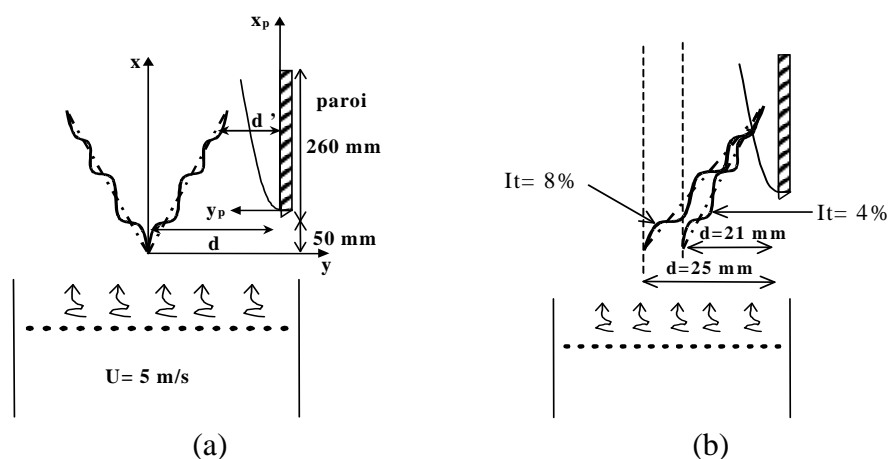


Figure 1 : Schéma de l'interaction flamme paroi

2.2. Techniques de mesures

La topologie du front de flamme est analysée par tomographie laser. L'écoulement estensemencé avec des particules d'encens dont l'isotherme de vaporisation est de 600 K [7]. La nappe laser est générée par un jeu de trois lentilles illuminées par un laser pulsé Nd :YAG (120 mJ). Les visualisations sont enregistrées par une caméra Lavision Imager Intense (1376 x 1040 pixels²). Un algorithme de traitement d'images écrit sous l'environnement Matlab permet une analyse quantitative des caractéristiques du front de flamme. Chaque image est codée sur 256 niveaux de gris et, à partir de l'histogramme de ces niveaux, le calcul du seuil matérialisant l'interface gaz frais gaz brûlés permet de détecter le contour de flamme et de passer en image binaire. Pour chacune des configurations, 400 images instantanées sont enregistrées et le traitement associé permet de définir une cartographie de la variable d'avancement c .

Le champ aérodynamique est caractérisé grâce à un système d'Anémométrie Doppler Laser (ADL) bicomposantes. Ce système est composé principalement d'un laser argon 4W, d'optiques d'émission et de réception et de deux analyseurs de spectres Dantec 57N20. Les mesures sont effectuées uniquement dans les gaz frais et l'écoulement estensemencé avec des particules d'encens.

3. Résultats et discussion

3.1. Caractéristiques de la couche limite et des flammes libres

3.1.1. Couche limite laminaire isotherme

Les flammes de prémélange étudiées sont stabilisées dans un écoulement turbulent dans les caractéristiques sont contrôlées. La forme du bord d'attaque de la paroi permet le développement d'une couche limite laminaire. Néanmoins, les fluctuations de vitesse de l'écoulement principal peuvent perturber la stabilité de la couche limite et accélérer la transition. Afin de s'assurer que la couche limite de l'écoulement isotherme est bien laminaire, des mesures ADL ont été effectuées à différentes positions à l'aval du bord d'attaque, le long de la zone d'étude comprise entre ($x_p=0$) et ($x_p=220$ mm). La figure (2) montre que les profils de vitesses longitudinales suivent le profil adimensionnel de Blasius [8], ce qui signifie que les structures de l'écoulement ne perturbent pas la zone de cisaillement pariétal.

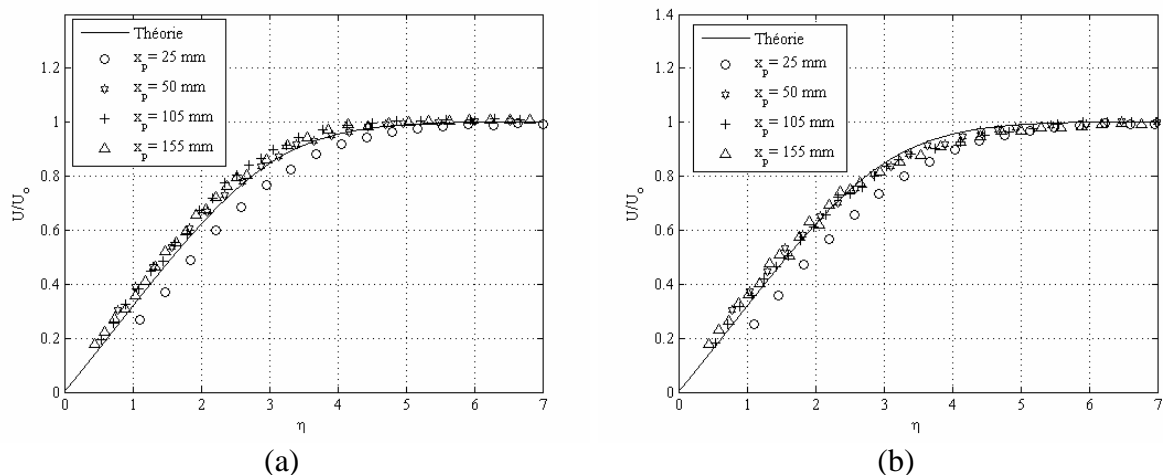


Figure 2 : Vitesses moyennes axiales de la couche limite isotherme. (a) : $It = 4\%$. (b) : $It = 8\%$.

3.1.2. *Flammes libres*

Les figures (3 a-b) présentent des tomographies de flammes en V turbulentes libres. On constate que l'amplitude des plissements du front de flamme augmente avec la distance au barreau de stabilisation. De même, l'angle au sommet croît lorsque le niveau de turbulence augmente ($9,4^\circ$ pour $It= 4\%$ et $13,4^\circ$ pour $It= 8\%$).

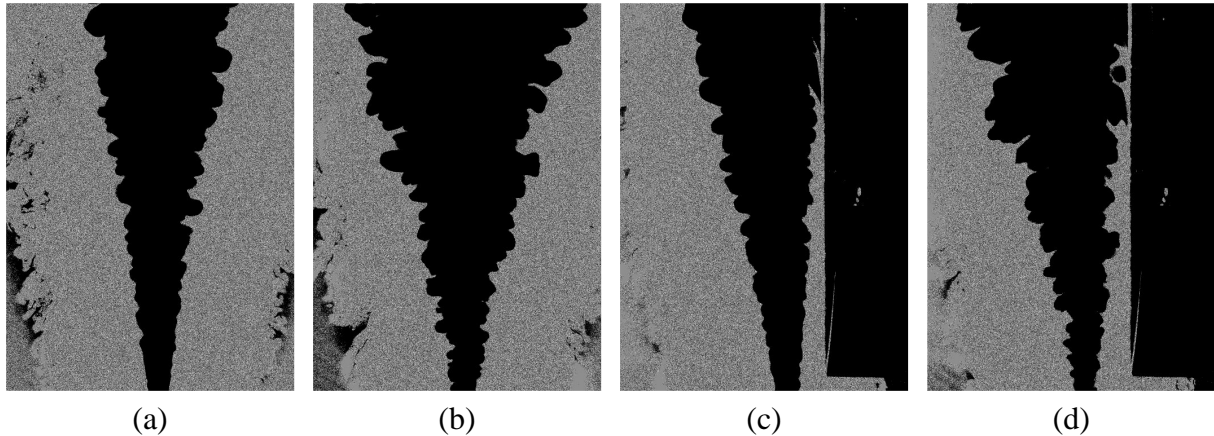


Figure 3 : Visualisations tomographiques. (a) : $It= 4\%$. (b) : $It= 8\%$. (c) : $It= 4\%$, $d= 21$. (d) : $It= 8\%$, $d= 25$.

L'évolution de la variable c , qui représente l'avancement de la réaction tel que $c=0$ dans les gaz frais et $c=1$ dans les gaz brûlés, est représenté sur la figure (4). Ces profils, extraits à différentes stations à l'aval du barreau de stabilisation, confirment la différence entre les angles des deux flammes et montrent également leur parfaite symétrie.

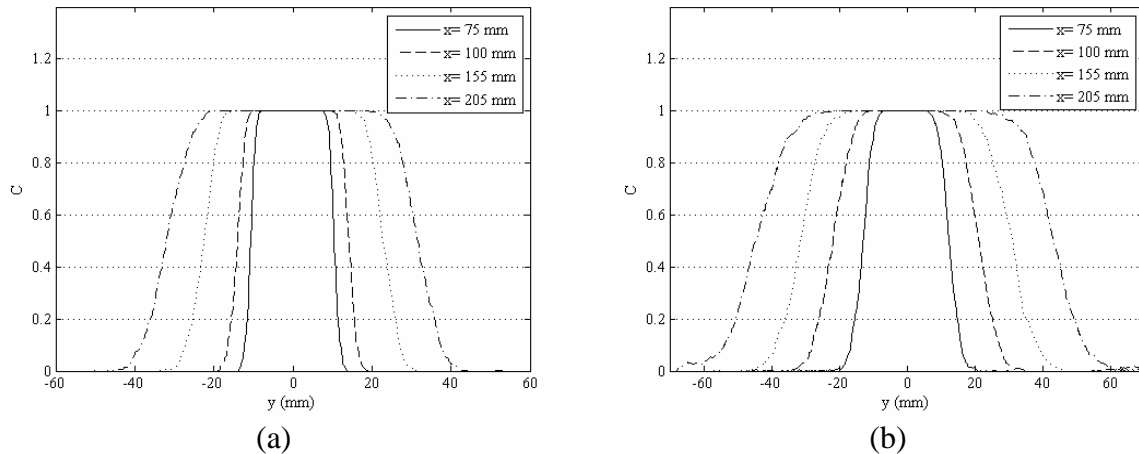


Figure 4 : Profils de la variable d'avancement. (a) : $It= 4\%$. (b) : $It= 8\%$.

3.2. Interaction flamme paroi

Lorsque la zone de brush interagit avec la couche limite, les plissements du front de flamme sont soumis à un cisaillement qui conduit à la formation de langues de gaz brûlés qui tendent à remonter l'écoulement le long de la paroi [5] (fig. 3 c-d). Afin d'analyser l'influence de ces structures sur le champ aérodynamique pariétal, la distance (d) entre le barreau de stabilisation et la paroi a été ajustée à $d= 21$ mm et $d= 25$ mm respectivement pour les flammes de 4% et 8%. L'objectif est d'avoir une distance (d') comparable, entre la paroi et la position

moyenne du front de flamme (fig. 1 b). Dans ces conditions, les profils de vitesses axiales (fig. 5) sont similaires à ceux obtenus dans le cas isotherme (fig. 2), ce qui signifie que la couche limite reste laminaire lorsqu'elle se trouve à proximité du front de flamme turbulent.

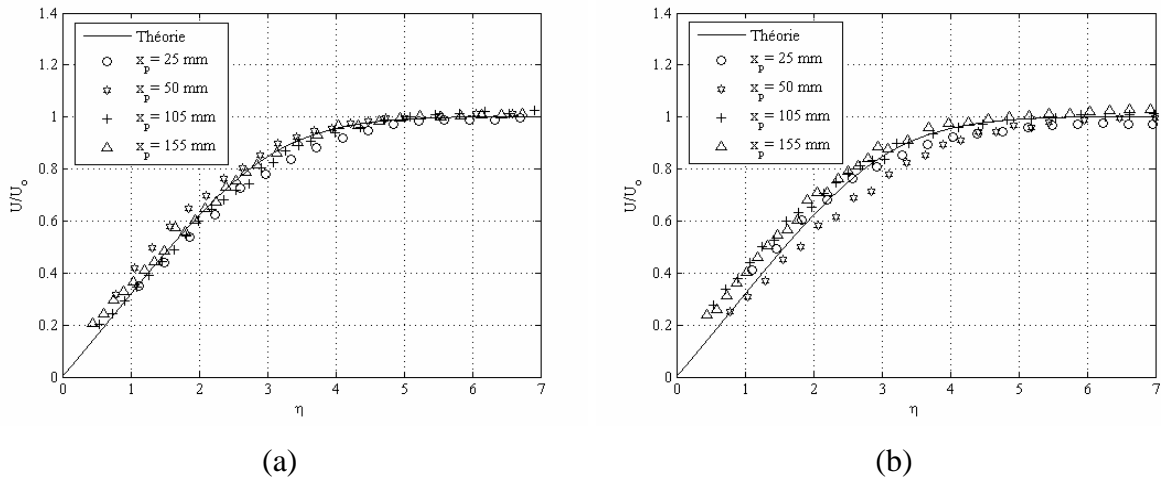


Figure 5 : Vitesses moyennes axiales dans la couche limite confinée par la flamme. (a) : $It = 4\%$. (b) : $It = 8\%$.

Alors que la couche limite n'est pas influencée par la présence de la flamme, la figure (6) montre que la flamme est quant à elle sensiblement modifiée par la couche limite. Les profils de la variable d'avancement montrent une déviation globale des deux flammes turbulentes qui se traduit par un déplacement de leur axe de symétrie vers le côté opposé à la plaque.

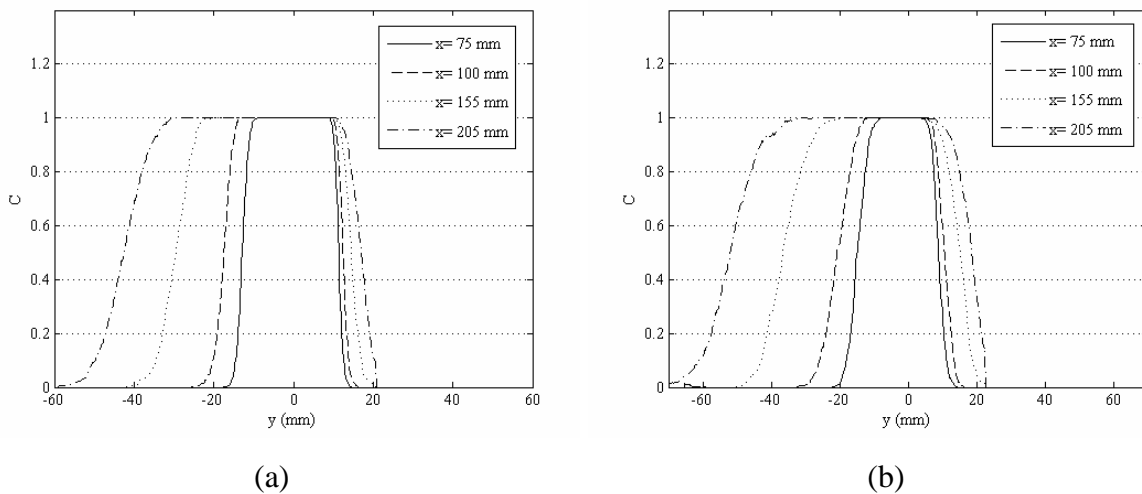


Figure 6 : Profils de la variable d'avancement. (a) : $It = 4\%$, $d = 21$. (b) : $It = 8\%$, $d = 25$.

Cette déviation globale de la flamme est associée à une diminution de la longueur du front de flamme, particulièrement sensible dans la zone d'interaction directe. La figure (7) rappelle la configuration analysée (fig 1 b) et la figure (8) montre l'évolution de la longueur du front de flamme. Cette longueur est le résultat d'un calcul réalisé à partir de 400 tomographies pour dix tronçons de la zone étudiée, de 22 mm de hauteur. En amont de la zone d'interaction, il apparaît que la longueur du front de flamme côté paroi est déjà inférieure à celle du front libre de référence. Ce comportement semble d'autant plus marqué que le niveau de turbulence est élevé. Ce phénomène s'explique principalement par la variation brusque des amplitudes de plissement dans la zone d'interaction qui modifie en retour le front de flamme plus en amont, en dépit des caractéristiques locales de la turbulence.

Dans une configuration géométrique similaire, mais avec des conditions différentes (nature du mélange, nombre de Lewis, paramètre d'interaction), Richard et Escudié [6] avaient

montré l'existence de zones dans lesquelles la longueur du front de flamme augmentait. Afin de détailler l'analyse de ces différents comportements, une étude complémentaire est actuellement menée afin de comprendre le rôle des transferts thermiques dans la zone de proche paroi.

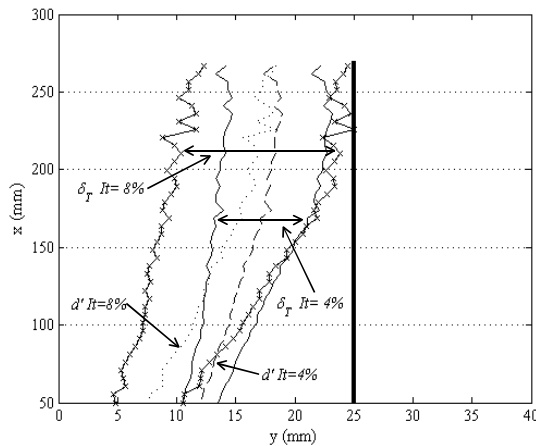


Figure 7 : Configuration étudiée

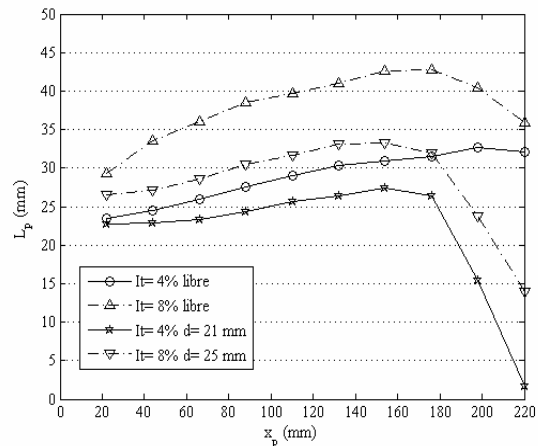


Figure 8 : Evolution de la longueur du front de flamme

4. Conclusion

Une configuration expérimentale académique a été mise en place afin d'analyser les mécanismes intervenant lors de l'interaction d'un front de flamme prémélangé et d'une paroi. Dans cette étude, qui correspond à une première étape, seule l'influence de la turbulence de l'écoulement principal est analysée, la couche limite qui se développe sur la paroi est laminaire et le flux de chaleur pariétal est minimisé. Dans ces conditions expérimentales, il apparaît que l'ensemble de la flamme est influencé par la présence de la paroi. Une déviation globale de la flamme oblique est observée, d'autant plus grande que le niveau de turbulence est élevé. Cette déviation s'accompagne d'une diminution sensible de la longueur du front, particulièrement dans la zone d'interaction directe.

Références

- [1] M. Bellenoue, T. Kageyama, S. A. Labuda et J. Sotton., Direct measurement of laminar flame quenching distance in a closed vessel, *Exp. Therm. Fluid. Sci.*, Vol. 27 (2003), 323-331.
- [2] D. Escudié and G. Richard, Experimental study of a premixed flame interacting with a wall, *Proce of 2nd symp (Inter) on turb, heat and mass transf.*, 1997, 651-663.
- [3] T. M. Alshaaalan and C. J. Rutland, Turbulence, scalar transport, and reaction rates in flame-wall interaction, *27th Symp (Inter) on Comb (1998)*, *The Combustion Institute*, 793-799.
- [4] T, J, Poinso, D, C, Haworth and G, Bruneaux, Direct simulation and modeling of flame-wall interaction for premixed turbulent combustion., *Combust. Flame*, Vol. 95 (1993), 118-132.
- [5] G. Bruneaux, K. Akselvoll, T. Poinso, and J. H. Ferziger, Flame wall interaction simulation in a turbulent channel flow, *Combust. Flame*, Vol. 107 (1996), 27-44.
- [6] G. Richard and D. Escudié, Turbulence effect on the flame-wall interaction, *1st Symp (Inter) Turb. Shear. Flow. Phen.*, Santa Barbara, Sept. 1999, 12-15.
- [7] I, François, D. Larrauri and D. Escudié, Interaction between two premixed laminar V-shaped flame fronts at low lewis number, *Combust. Flame*, Vol. 110 (1997), 14-24.
- [8] H. Schlichting and K. Gersten, Boundary layer theory, *8th Edition*, Springer Edition, 801p.