

# Etude d'une flamme de diffusion laminaire méthane/air enrichie en oxygène.

M. Chahine<sup>1</sup>, P.Gillon<sup>1</sup>, B. Sarh<sup>1,2</sup>, J.N. Blanchard<sup>1,2</sup>, V. Gilard<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ICARE-CNRS, 1C, Avenue de la Recherche Scientifique, 45072 Orléans cedex2, France

<sup>2</sup>Université d'Orléans, IUT, 16 Rue d'Issoudun - BP 16729, 45067 Orléans cedex 2, France.

## Résumé

*L'effet de l'ajout d'oxygène dans le comburant d'une flamme laminaire méthane/air est étudié. Le volume d'oxygène obtenu varie entre 21% (air) et 30%. Les résultats concernent les hauteurs de décrochage de flamme en fonction des vitesses initiales de CH<sub>4</sub>, d'air et des pourcentages d'oxygène. Des diagrammes de stabilité montrant les états de la flamme et les transitions entre ces états sont construits. La réduction du décrochage constatée lors de l'ajout d'oxygène est expliquée par l'augmentation de la vitesse laminaire de flamme et l'augmentation du dégagement de chaleur dû à une température de flamme plus élevée.*

**Mots clés : Flamme de diffusion laminaire - Flamme décrochée - Air enrichi en oxygène - Stabilité de flamme.**

## 1 Introduction

L'oxygène est le composant de l'air qui entre en jeu dans les réactions de combustion. De nombreuses études ont été menées sur des flammes à l'air enrichi en oxygène et plusieurs objectifs sont visés : l'augmentation de la température de flamme et donc l'amélioration de l'efficacité énergétique et la réduction de consommation de combustible, la concentration des émissions en CO<sub>2</sub> et la réduction des émissions en oxydes d'azote.

Dans le cadre de la présente étude, c'est l'effet de l'enrichissement de l'air en oxygène sur le comportement (accrochée, décrochée ou soufflée) et la stabilité de la flamme qui est exploité. Des études antérieures ont été menées pour examiner l'effet de cet enrichissement sur des caractéristiques de la flamme : vitesse laminaire, limite d'extinction, fréquence et amplitude d'oscillations ainsi que des tourbillons d'instabilités.

L'effet sur la fréquence et l'amplitude des oscillations de sommet de flamme a été étudié par Gotoda et al. [1]. La flamme était issue d'un brûleur à jets coaxiaux de méthane et d'un mélange oxygène-azote. Ils ont constaté la diminution de l'amplitude des oscillations et l'augmentation de leur fréquence avec l'enrichissement en oxygène. Takahashi et al. [2] se sont intéressés à l'extinction des flammes méthane/air et méthane/air enrichi en oxygène en ajoutant des gaz diluants dont l'azote N<sub>2</sub>. L'objectif était de trouver la concentration minimale des diluants capable de souffler la flamme. En augmentant le pourcentage d'oxygène dans l'air, cette concentration minimale devient plus importante ce qui veut dire une stabilisation de la flamme. En effet, l'extinction par ajout de gaz diluant est le résultat d'une réduction du taux de réaction, de la vitesse laminaire de flamme et de l'intervalle d'inflammabilité. Han et al. [3] ont étudié la vitesse de flamme de prémélange méthane/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> où le pourcentage d'oxygène dans l'air variait entre 21% et 98,5% à différentes richesses. Ils ont montré que pour un pourcentage d'oxygène donné, cette vitesse admet toujours un maximum à la stoechiométrie, et que l'enrichissement en oxygène de 21% à 98,5% augmentait de 600% la vitesse laminaire de flamme à la stoechiométrie.

D'autres études consistaient à résumer le comportement de la flamme suivant les conditions d'injection en établissant des diagrammes de stabilité. Wyzgolik et al. [4] établissaient un diagramme de stabilité pour une flamme issue de jets coaxiaux turbulents de méthane et d'air et évoquaient deux mécanismes de décrochage de la flamme : la configuration de flamme triple où la flamme est formée de trois branches issue d'un même point dont la position est déterminée par l'équilibre entre la vitesse d'écoulement et la vitesse de propagation de la flamme. Dans le deuxième mécanisme, il s'agissait

d'extinction locale résultant d'un déséquilibre entre le transfert de chaleur par conduction et le flux de chaleur provenant de la réaction.

Un intérêt est aussi accordé à l'évolution de la longueur de flamme en enrichissant l'air en oxygène. Ainsi, la longueur de flamme théorique selon Roper [5] dépendait de la température adiabatique de flamme. Cette température est fortement augmentée de 2200 K pour une flamme méthane/air à 3100 K pour une flamme méthane/oxygène.

## 2 Dispositif et conditions expérimentales

Le brûleur utilisé consiste en deux tubes concentriques en acier inoxydable non magnétique d'épaisseur 1 mm. Le tube central de diamètre intérieur 4 mm est placé au centre d'un tube dont le diamètre intérieur est de 10 mm. Ces tubes ont une longueur de 200 mm, ceci afin d'assurer une laminarisation de l'écoulement en sortie. L'entrée du tube central est connectée à une alimentation directe en méthane G20. Celle du tube extérieur est connectée à une alimentation en air enrichi en oxygène. Cet enrichissement est assuré par deux circuits de contrôle de débit : l'un pour l'air, l'autre pour l'oxygène. Ces deux écoulements arrivent sur l'entrée d'un mélangeur dont la sortie en air enrichi en oxygène est reliée au tube extérieur. L'oxygène ALPHAGAZ, issu de bouteille de gaz B50 est d'une pureté de 99,5%. Une électrovanne est placée dans le circuit oxygène entre la bouteille et le débitmètre. Elle permet la coupure instantanée de l'arrivée d'oxygène en cas de besoin. L'air comprimé est de composition ( $20,5 \pm 0,5\%$  d' $O_2$  et  $78 \pm 0,5$  de  $N_2$ ), et le méthane est du G20 d'une pureté supérieure à 98%.

Les expériences sont menées en fixant le débit de méthane,  $Q_{CH_4}$ . Pour chaque débit de méthane, nous choisissons de fixer les débits d'air supérieurs à ceux correspondant au décrochage de la flamme et inférieurs à ceux correspondant à l'extinction de la flamme. Lorsque le débit d'air,  $Q_{air}$ , est fixé, nous procédons à l'enrichissement en oxygène, en augmentant le taux d'oxygène par palier. La flamme est filmée pendant deux minutes (le temps estimé nécessaire pour avoir la répartition de la hauteur de décrochage pour chacun des cas) à l'aide d'un caméscope numérique HDD SONY HDR-XR105E (50 Hz, 25 images par seconde). Pour repérer les points d'extinction (ou de soufflage de la flamme), nous fixons le débit d'oxygène, et augmentons le débit d'air en continu. Les conditions expérimentales sont données sur le tableau 1 ci-dessous.  $Q_{tot}$  est le débit total de comburant (air enrichi en oxygène) qui est égal à la somme  $Q_{air}$  et  $Q_{O_2}$ . Le pourcentage d'oxygène est égal à :  $\% O_2 = (0,21 * Q_{air} + Q_{O_2}) / Q_{tot}$ . A partir des images numériques, la hauteur de décrochage ( $H$ ) est déterminée par la mesure de la distance entre le brûleur et la position du point le plus lumineux correspondant au point triple.

$Q_{CH_4}$ ( $10^{-6} m^3/s$ )	$Q_{air}$ ( $10^{-6} m^3/s$ )	$Q_{O_2}$ ( $10^{-6} m^3/s$ )	$Q_{total}$ ( $10^{-6} m^3/s$ )	$\% O_2$ volumique
3,14	25,75-55,36	0-4,86	25,75-60,22	21%-27,8%
15	25,75-70,81	0-6,16	25,75-76,97	21%-30,6%
20	32,19-77,24	0-6,16	32,19-83,4	21%-28,9%
25	32,19-90,12	0-6,8	32,19-96,92	21%-28,9%

Tableau 1 : Conditions expérimentales.

## 3 Résultats et Discussions

L'évolution du comportement de la flamme pour le cas d'un débit de méthane de  $20 cm^3/s$  et d'un débit d'air initial de  $77,24 cm^3/s$  est montrée sur la figure 1. La flamme, décrochée instable à 21% en oxygène (a), se stabilise à 22,2% d'oxygène (c) et commence à avoir une hauteur de décrochage  $H$  (distance entre la sortie du brûleur et la position du point triple) de moins en moins importante jusqu'à son accrochage complet au brûleur pour un pourcentage d'oxygène de 26,8% (g). En plus, la flamme décrochée étant entièrement de couleur bleue, se transforme en une flamme accrochée de couleur jaune en majorité grâce à la formation des suies rayonnantes.

Pour les débits de méthane de 3,14 ; 15 ; 20 et  $25 cm^3/s$ , la variation de hauteur de décrochage pour différents débits d'air, avec le pourcentage en oxygène est montrée sur la figure 2.

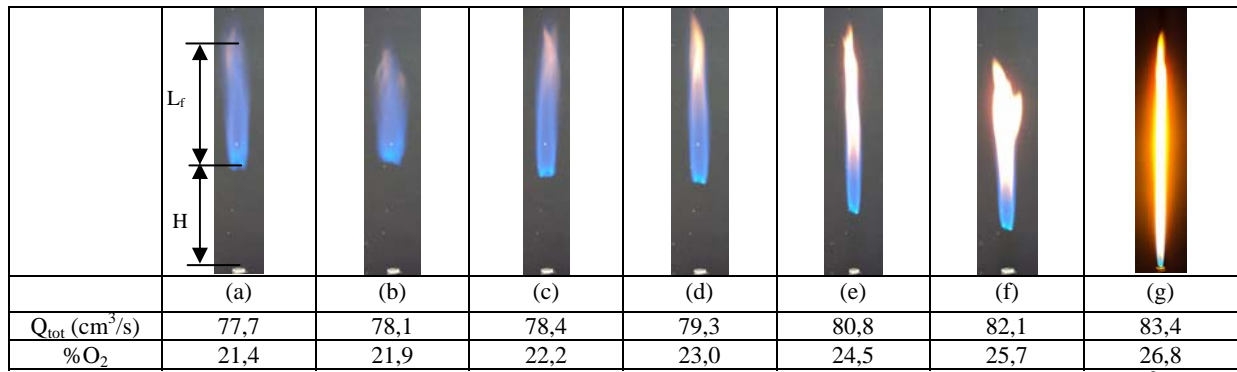


FIG.1: Photos montrant l'évolution du comportement de la flamme pour  $Q_{CH_4}=20$  cm<sup>3</sup>/s et  $Q_{air}=77,24$  cm<sup>3</sup>/s en fonction du débit d'oxygène ajouté à l'air.

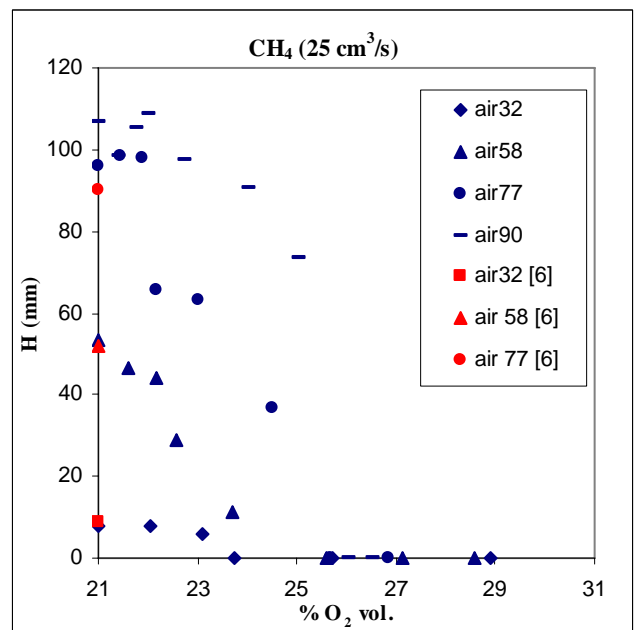
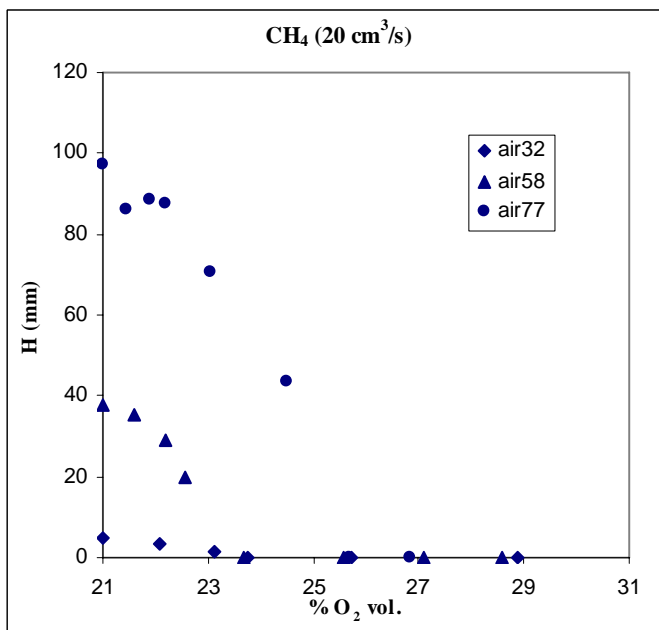
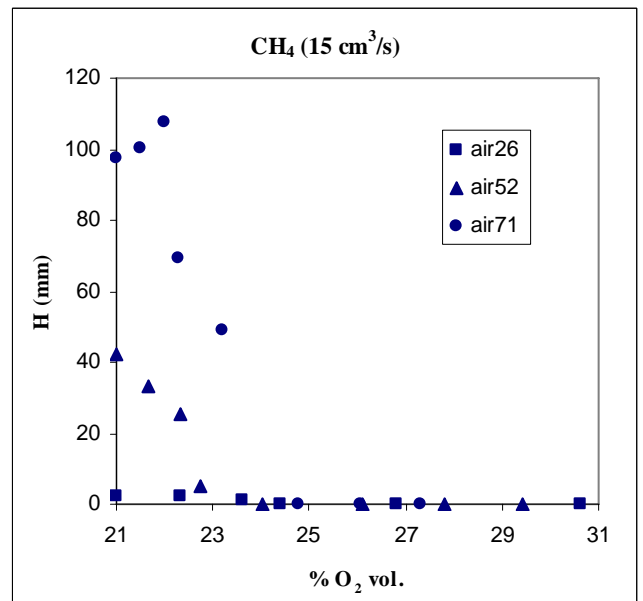
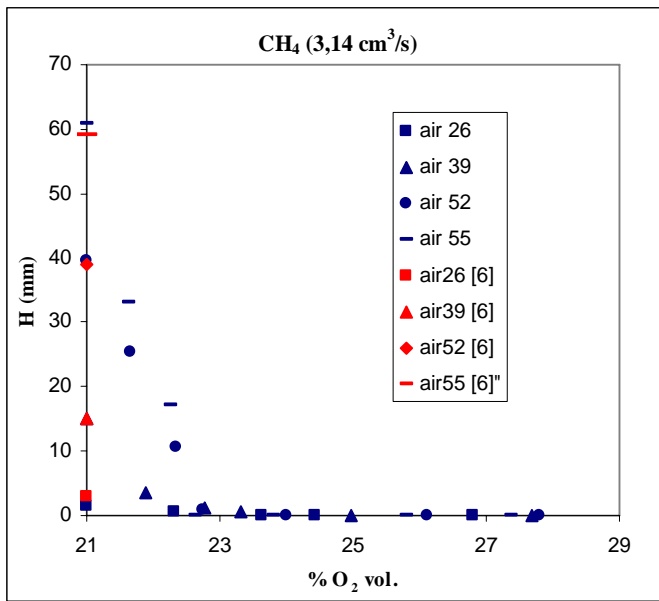


FIG.2: Evolution de la hauteur de lift avec le pourcentage d'oxygène dans l'air.

Nous notons, conformément aux résultats de Gilard et al. [6], que la hauteur de décrochage à 21% en oxygène, est plus importante pour un débit d'air initial plus important. Ceci est validé pour les quatre cas de méthane étudiés. Ceci est aussi vrai pour tous les cas où la flamme est décrochée. L'enrichissement en oxygène contribue à la diminution de cette hauteur de lift, jusqu'à la stabilisation de la flamme à la sortie du brûleur (hauteur de décrochage=0).

Le pourcentage d'oxygène correspondant au rattachement de la flamme dépend du débit de méthane et du débit d'air. Pour 3,14 cm<sup>3</sup>/s de méthane, la flamme est rattachée au brûleur pour des pourcentages d'oxygène compris entre 22,5 et 25 %. La borne inférieure de cet intervalle est augmentée à 24% pour 15 cm<sup>3</sup>/s de méthane. Pour 25 cm<sup>3</sup>/s de méthane et en fonction du débit d'air initial injecté, la flamme est rattachée au brûleur entre 23,7 et 25,7% d'oxygène. Cet intervalle s'étend de 23,8 à 26,1% pour un débit de méthane de 25 cm<sup>3</sup>/s.

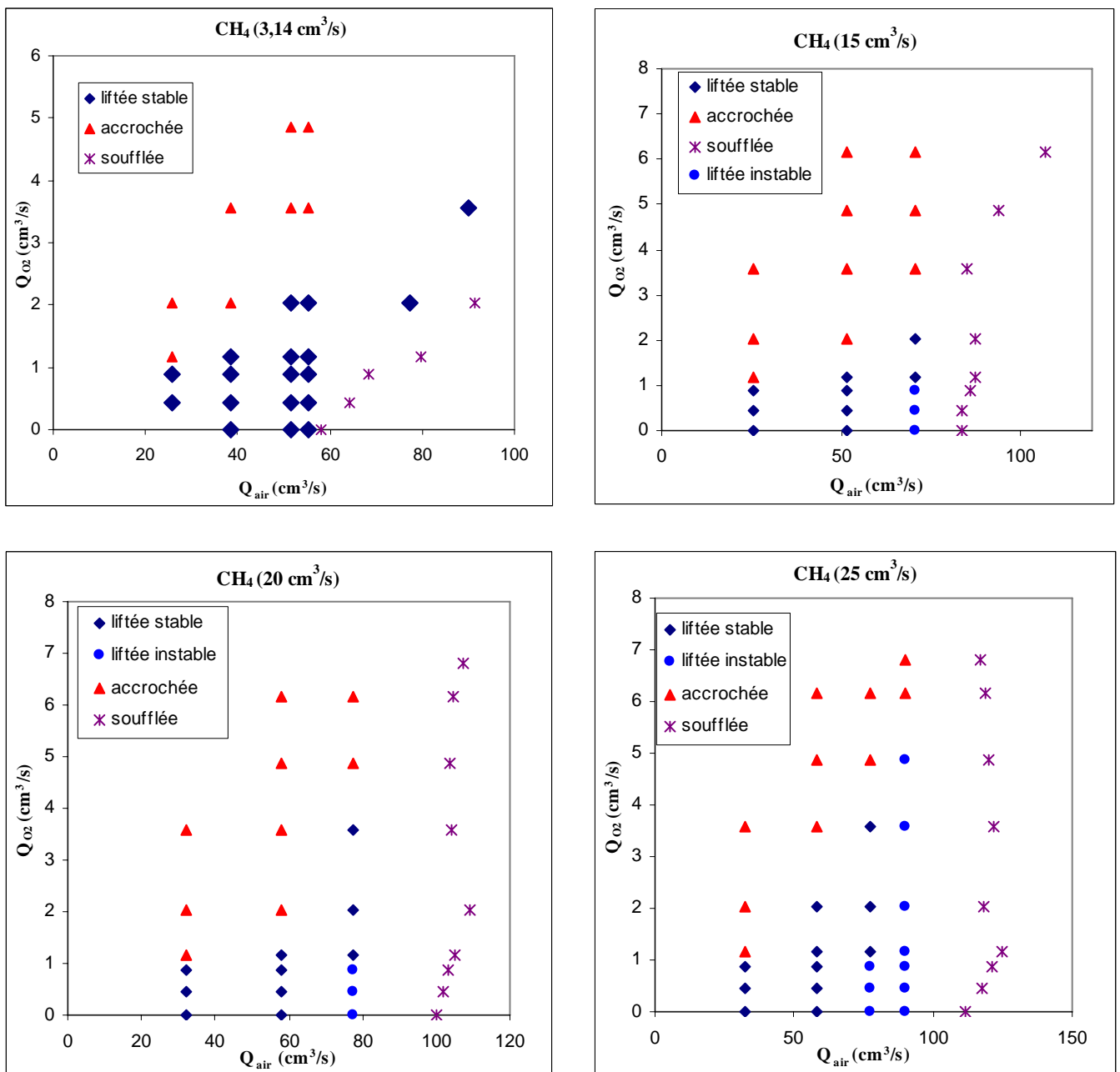


FIG.3: Diagramme de stabilité de la flamme en fonction de Q<sub>air</sub> et Q<sub>O<sub>2</sub></sub>.

Les différents comportements de la flamme suivant les conditions d'injection de méthane et du mélange air/oxygène sont résumés dans des diagrammes de stabilité montrés figure 3. Quatre états de la flamme sont montrés : accrochée, décrochée stable avec une position de front de flamme variant légèrement avec le temps, l'état de flamme décrochée instable de couleur entièrement bleue et dont la position du front de flamme est fortement oscillante et le cas de flamme soufflée où les conditions d'équilibre entre vitesse de propagation de flamme et vitesse d'écoulement ne peuvent pas coexister. Pour un débit de méthane de 3,14 cm<sup>3</sup>/s, les états de la flamme sont montrés en fonction du débit d'air et du débit d'oxygène. Pour des débits d'oxygène inférieurs à 2 cm<sup>3</sup>/s, et en augmentant le débit d'air, la flamme passe de l'état décrochée stable à l'état soufflée. Le débit d'air capable de souffler la flamme est croissant avec le débit d'oxygène. La flamme est stabilisée en ajoutant de l'oxygène. De même, pour un débit d'air initial plus grand, le débit d'oxygène nécessaire pour raccrocher la flamme augmente. Pour 15 cm<sup>3</sup>/s de méthane et un débit d'air initial de 71 cm<sup>3</sup>/s, la flamme initialement instable se stabilise en ajoutant 1 cm<sup>3</sup>/s d'oxygène avant de s'accrocher en ajoutant 3,5 cm<sup>3</sup>/s d'oxygène. Ce même comportement est observé pour un débit de méthane de 20 cm<sup>3</sup>/s et un débit d'air de 77 cm<sup>3</sup>/s, ainsi que pour 25 cm<sup>3</sup>/s de méthane et 77 cm<sup>3</sup>/s d'air. Par contre, pour 25 cm<sup>3</sup>/s de méthane et 90 cm<sup>3</sup>/s d'air, la flamme subit une transition directe entre l'état décrochée instable et accrochée en ajoutant 6,2 cm<sup>3</sup>/s d'oxygène. La courbe limite de soufflage est repoussée vers des débits d'air plus importants en augmentant le débit de méthane. Les transitions, décrochée – soufflée, sont notées par une ligne presque droite. La flamme étant stabilisée à la sortie du brûleur, il devient plus difficile de la souffler.

La longueur de flamme théorique, calculée selon la formule donnée par Roper [5]

$$L_f = \frac{Q_F (T_\infty / T_f)^{0,67}}{4\pi D_\infty \ln(1 + 1/s)}$$

où  $Q_F$  est le débit du combustible,  $T_f$  est la température de flamme,  $D_\infty$  est le

coefficient de diffusion de O<sub>2</sub> dans N<sub>2</sub> et  $s$  est le rapport stœchiométrique entre carburant et comburant.  $L_f$  est représentée sur la figure 4. Cette longueur dépend du débit de méthane et du pourcentage d'oxygène. Elle croît avec le débit de méthane. En revanche, pour un même débit de méthane, lorsqu'on ajoute de l'oxygène dans l'air, cette longueur décroît. La pente de décroissance en fonction du pourcentage d'oxygène croît avec le débit de méthane.

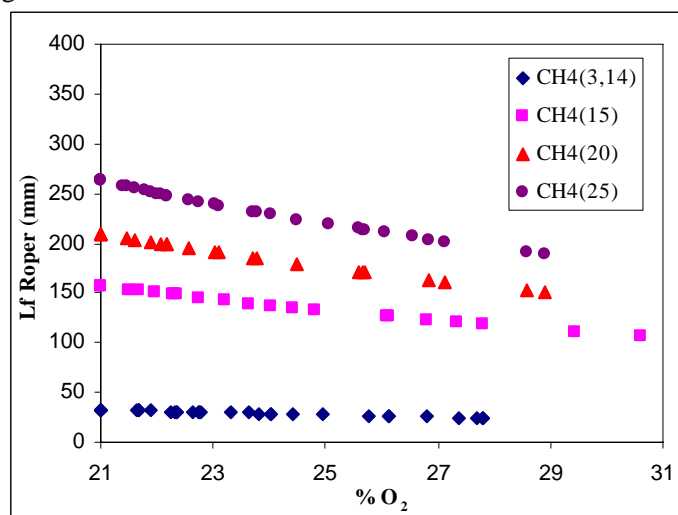


FIG.4 : Longueurs de flamme théoriques calculées selon la formule de Roper pour différents débits de méthane et en fonction du pourcentage d'oxygène.

La position du front de flamme au niveau du point triple est déterminée par l'équilibre entre la vitesse de l'écoulement et la vitesse de propagation de flamme [. Cette position localise la hauteur de décrochage de la flamme. La diminution de cette hauteur de décrochage peut être le résultat d'une augmentation de la vitesse de propagation de la flamme. Pour étayer ce point, nous avons calculé la vitesse de propagation laminaire et la température adiabatique de la flamme à l'aide de Premix (pack chemkin) en utilisant le mécanisme GRI-Mech 3.0. Pour chacun des cas de méthane et d'air,

l'enrichissement en oxygène montre une augmentation de cette vitesse. On peut voir cette évolution pour le cas CH<sub>4</sub>(3,14)Air(26) sur la figure 5a. Ceci peut être une première explication de la diminution de la hauteur de décrochage lorsque l'air est enrichi en oxygène.

On peut aussi observer que la température adiabatique de la flamme croît lorsque le pourcentage d'oxygène augmente (voir figure 5b). Comme la longueur théorique de la flamme est inversement proportionnelle à la température adiabatique de la flamme, d'après Roper [5], ceci conduit à une longueur théorique de la flamme qui décroît avec l'enrichissement en oxygène (voir figure 4).

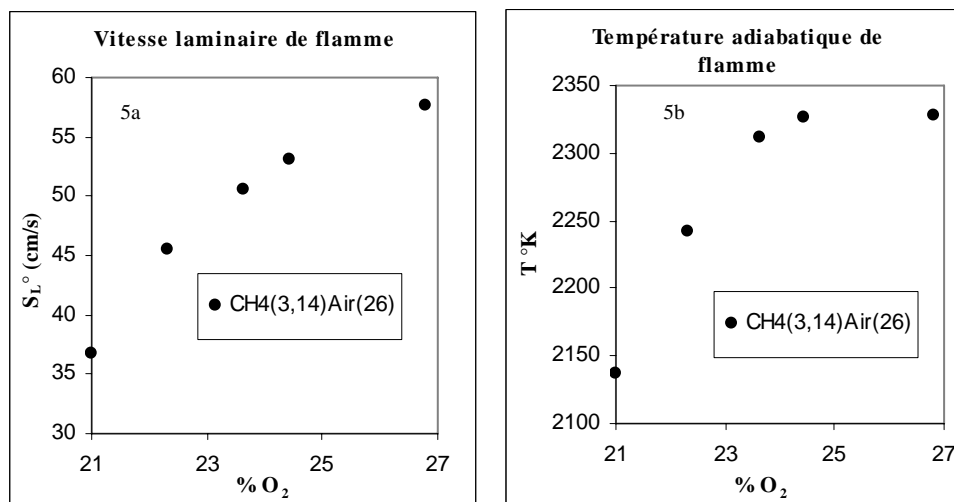


FIG.5 : Vitesse laminaire et température adiabatique de flamme calculée suivant le débit de méthane, d'air et le pourcentage d'oxygène.

## 4 Conclusions

Une étude expérimentale sur l'effet d'enrichissement de l'air en oxygène sur le comportement d'une flamme laminaire issue d'un jet central circulaire de méthane et d'un jet coaxial d'air est réalisée. La stabilisation d'une flamme décrochée instable et l'accrochage d'une flamme décrochée sont notés. La longueur théorique de flamme est réduite. Ces résultats peuvent être expliqués par l'augmentation simultanée de la vitesse laminaire et de la température adiabatique de flamme en enrichissant en oxygène.

## Références

- [1] 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*, vol.32,1759-1765, 2008.
- [2] 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*, Volume 33, Issue 2, 2531-2538, 2011.
- [3] 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*, vol.21, p.3202-3207, 2007.
- [4] A. Wyzgolik, F. Baillot, "Response of the non-premixed lifted flame to coaxial jet mixing layers", *Proceedings of the Combustion Institute*, vol.31, p. 1583-1590, 2007.
- [5] F.G. Roper, "The prediction of laminar jet diffusion flame sizes: part I. Theoretical Model.", *Combustion and Flame*, vol.29, 219-226, 1977.
- [6] V. Gilard, P. Gillon, J.N. Blanchard, B. Sarh, "Influence of a horizontal magnetic field on a coflow methane/air diffusion flame", *Combustion Science and Technology*, vol.180, p.1920-1935, 2008.
- [7] Y.S. Ko, S.H. Chung, "Propagation of unsteady tribrachial flames in laminar non-premixed jets", *Combustion and Flame*, vol.118, p.151-163, 1999.