

Contribution à l'Etude du Régime de Combustion Diluée

Yuying LIU², Jean-Michel MOST^{1*}, Philippe BAUER¹

¹Laboratoire de Combustion et de Détonique
UPR 9028 au CNRS, ENSMA, 1, rue Clément Ader
86961 FUTUROCOPE Cedex

²School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics & Astronautics
Beijing 100083, China,

*(auteur correspondant : jean-michel.most@lcd.ensma.fr)

Résumé - Le comportement d'une flamme non-premélangée est caractérisé au moyen d'un brûleur à contre-courant dans des conditions thermo-chimiques voisines de celles rencontrées dans les fours fonctionnant dans le régime de combustion « sans flamme » ou « diluée ». Les limites d'extinction de la combustion sont déterminées, le comportement physique et la structure de la flamme sont étudiés à partir du traitement d'images de Fluorescence Induite par Laser du radical OH. L'épaisseur de la zone réactive est mesurée et utilisée comme critère pour caractériser ce nouveau mode de combustion.

1. Introduction

L'augmentation de l'utilisation des combustibles fossiles pour la production d'énergie entraîne un accroissement des rejets de polluants et de gaz à effet de serre (CO₂) dont l'effet sur le réchauffement climatique semble prouvé. Depuis quelques années, un nouveau régime de combustion a été découvert. Il devrait permettre, dès qu'il sera compris et maîtrisé, d'atteindre ces objectifs en réduisant les émissions d'oxydes d'azote et en accroissant les rendements énergétiques, donc en diminuant les rejets de CO₂, grâce à l'utilisation de foyers régénératifs fortement isolés. Ce mode de combustion est appelé combustion « sans flamme » ou combustion « diluée ». Une contribution à la meilleure compréhension de ce régime est proposée dans ce travail.

Pour stabiliser ce procédé, une forte recirculation des produits de combustion chauds est induite dans la chambre ce qui dilue et de préchauffe les réactifs avant leur combustion. Dès que les parois deviennent suffisamment chaudes pour que les gaz recirculant atteignent 1000°C, la flamme cesse d'émettre dans le visible, seul le rayonnement des parois est observé, les fluctuations de pression et les bruits aérodynamiques s'estompent, la production des NO_x décroît de presque un ordre de grandeur, les pics de haute température disparaissent et les zones de mélange et de réaction des réactifs s'épaississent [1-16].

L'objectif de ce travail est de décrire expérimentalement ce régime en identifiant les paramètres thermo-chimiques permettant d'atteindre ce régime (taux de dilution et température de préchauffage des réactifs). Les effets de la turbulence, du taux d'étirement de la flamme, la nature du diluant, ne seront pas traités dans ce travail.

2. Dispositif expérimental

2.1. Configuration d'étude

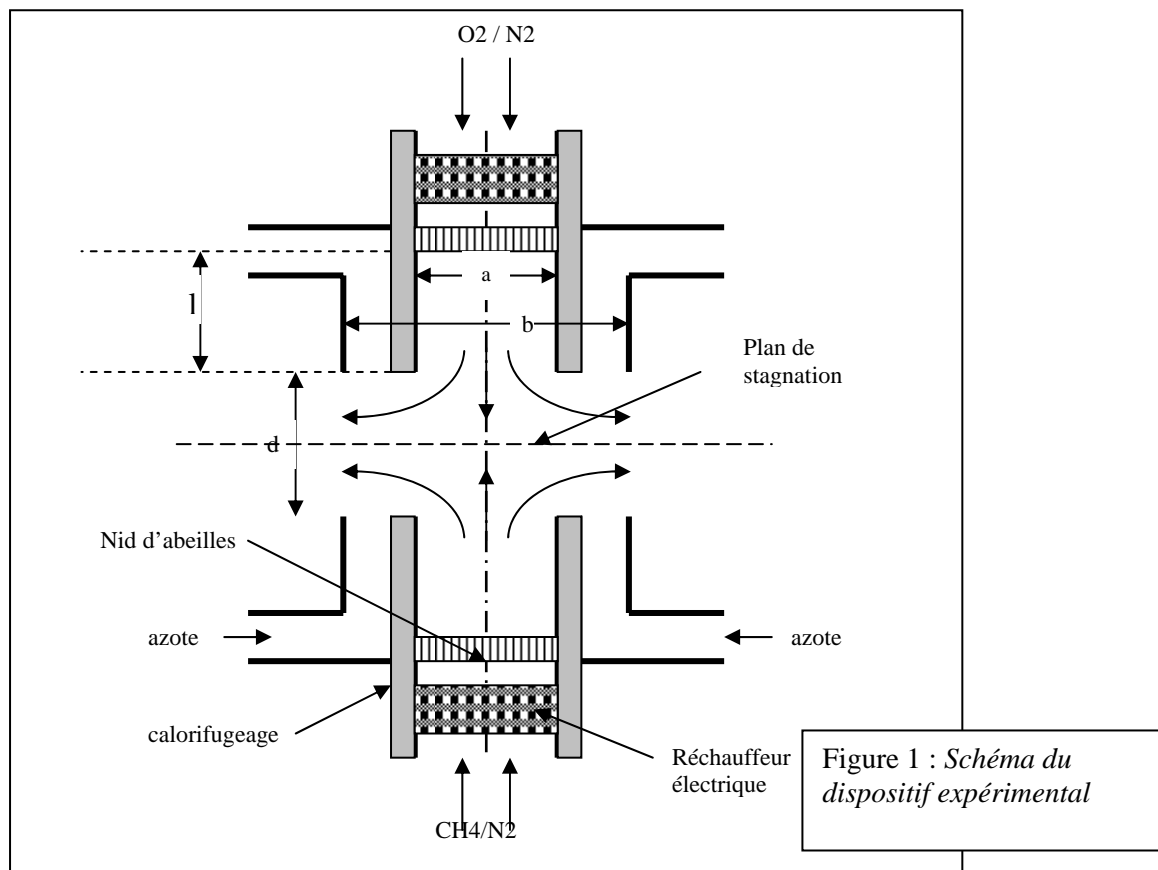
En injectant un jet oxydant (air) face à un jet combustible (méthane), une flamme de diffusion à contre courant se stabilise après allumage à proximité du point de stagnation de

l'écoulement. La flamme est fine, stable et plane, la combustion est stabilisée par diffusion moléculaire des espèces chimiques vers la zone réactive. Ce type de brûleur est simple à contrôler et possède des accès optiques aisés. De plus, cette configuration permet de séparer les effets des phénomènes aérodynamiques, chimiques et thermiques. L'intérêt de tels brûleurs a été souligné par de nombreux auteurs [13-17].

2.2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental comprend un brûleur à contre courant (Figure 1). Les réactifs non prémélangés, méthane et air, sont dilués dans l'azote simulant partiellement la recirculation des produits de combustion et préchauffés électriquement, ils passent au travers d'une plaque perforée (50% de blocage) et dans un tube de tranquillisation. Le diamètre interne du tube est de 35mm ; la turbulence inférieure à 3% ; l'espace inter-brûleurs est de 35mm ; la vitesse u_c des fluides à la sortie est de 0.5m/s en écoulement froid (température T_c), la vitesse u_h lors du chauffage varie avec la température de préchauffage T_{pr} (298~973K) selon la relation (1) ; la fraction volumique de méthane X_{CH_4} varie de 6 à 30%, celle de l'oxygène de 10 à 21%. Ces quantités sont référencées par leur taux de dilution respectifs a_F et a_O dans les écoulements (2) et (3) :

$$u_h = (u_c / T_c) \cdot T_{pr} \quad (1) \quad a_F = 1 - X_{CH_4} \quad (2) \quad a_O = 1 - X_{O_2} \quad (3)$$



2.3. Méthode de diagnostic

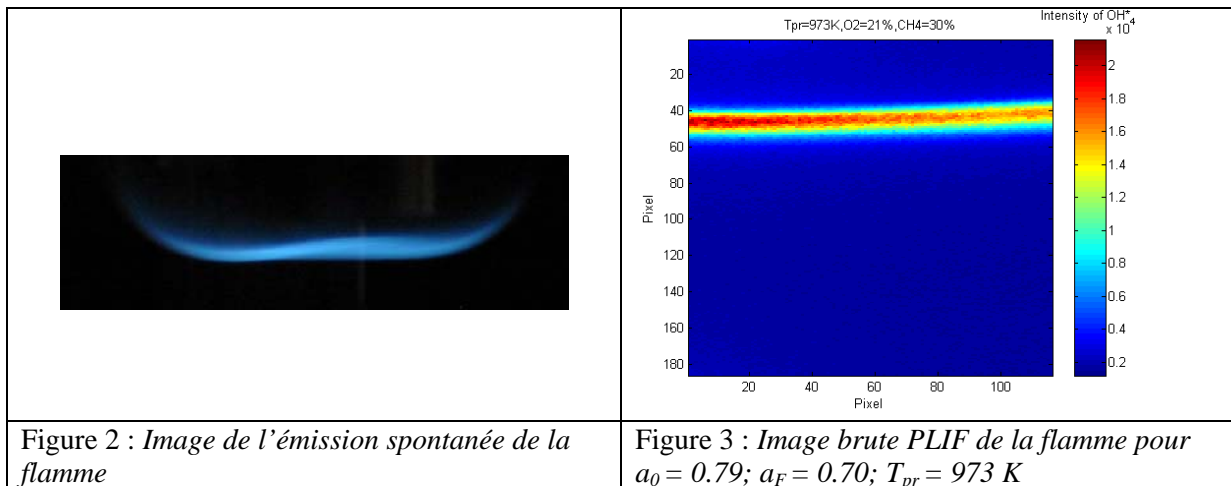
Un système complet de Fluorescence Induite par Laser (PLIF) est utilisé. Il comprend un laser Nd :YAG et un laser à colorant ajustable (énergie par impulsion de 425mJ à 532nm,

fréquence de répétition de 10Hz et temps de l'éclair de 3-5ns, le colorant utilisé est la Rhodamine pour qu'en sortie le plan laser à 282.91nm excite le radical OH). Le détecteur est une caméra ICCD (PI-MAX2, Princeton Instruments, Roper Scientific Inc, 16bits) équipée d'un objectif UV. Une batterie de filtres optiques adaptés à l'émission fluorescence recherchée est placée devant l'objectif, la résolution de l'image est de 581*591 pixels² avec une résolution de 133µm par pixel, le temps d'ouverture est de 100ns. Cent images sont acquises pour chaque série de mesures. Une calibration du laser à colorant est effectuée à l'aide d'un brûleur Bunsen hydrogène/air avant les mesures.

3. Résultats

3.1. Visualisation de l'émission spontanée de la flamme

Les figures 2 et 3 représentent une image typique de l'émission spontanée de la flamme et une image PLIF de l'émission OH. La zone de combustion est plate et stable, l'intensité d'émission diminue avec le taux de dilution et augmente avec la température de préchauffage. La flamme reste visible et le régime sans flamme n'est pas complètement atteint.



3.2. Diagramme de stabilité de la combustion

Le diagramme de stabilité de la combustion est effectué pour $u_c=0.5m/s$, T_{pr} variant de 298 à 973K et $X_{O_2}<21\%$, il est représenté en fonction du rapport d'équivalence local ϕ défini par (4):

$$\phi = (X_{CH_4}/X_{O_2})_{ext} / (X_{CH_4}/X_{O_2})_{stoi} \quad (4)$$

La figure 4 représente la limite d'extinction en fonction de la température de préchauffage T_{pr} pour différentes concentrations des réactifs. On observe que le domaine de stabilité augmente fortement avec T_{pr} et avec la concentration des réactifs. Pour les fortes valeurs de T_{pr} , la combustion se stabilise même pour les faibles taux d'oxygène ($X_{O_2}=9\%$) ce qui est bien en deçà du comportement dans les conditions normales de température et de pression. Une évaluation du nombre de Damköhler Da à l'extinction (le temps chimique est évalué à partir du schéma de cinétique chimique de Westbrook [18] et le temps de diffusion à partir de l'inverse du taux d'étirement) montre que Da varie avec T_{pr}^{20} et $0.1^{X_{O_2}}$. En conséquence, l'influence de T_{pr} est prépondérante sur la variation de Da pour l'existence de la flamme.

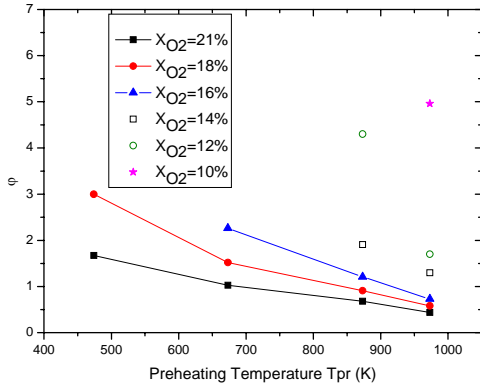


Figure 4 : Limites d'extinction pour différentes concentrations d'oxygène

Les résultats montrent clairement que l'épaisseur moyenne δ_{OH} augmente avec T_{pr} et avec les fractions volumiques des réactifs. Ce résultat sur la variation de δ_{OH} est consistant avec les observations de nombreux auteurs [8 et 19]. On constate donc un effet opposé de T_{pr} et de la dilution des réactifs sur la variation de l'épaisseur de la flamme. Afin d'évaluer les conséquences de cette compétition, on détermine maintenant la variation de δ_{OH} avec une température estimée de la flamme T_{ad} exprimée (5) en accord avec l'hypothèse de Burke-Schumann dans un brûleur à contre courant :

$$T_{ad} = T_{pr} + (Q \cdot Y_{F0} / C_p) \cdot z_{st} \quad (5)$$

où Q est la chaleur de réaction du méthane, Y_{F0} la fraction massique de méthane dans l'écoulement combustible, C_p est la capacité calorifique du mélange évaluée à T_{pr} et z_{st} la fraction de mélange à la stoechiométrie $z_{st} = 1/(\varphi + 1)$, φ est le rapport d'équivalence global.

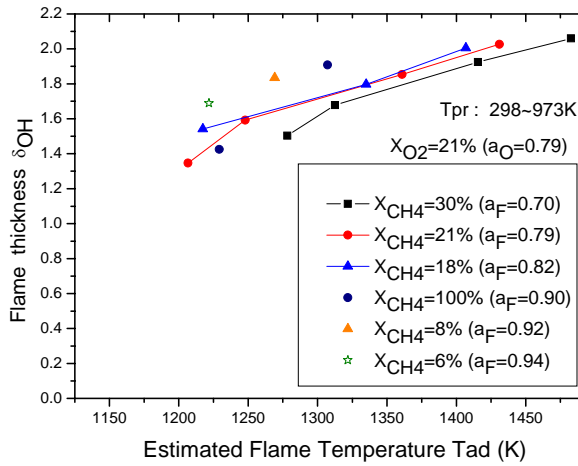


Figure 5 : Variation de l'épaisseur de la zone d'émission de OH avec la température de flamme estimée pour différentes valeurs de T_{pr} et des taux de dilution du méthane ($X_{O_2} = 21\%$)

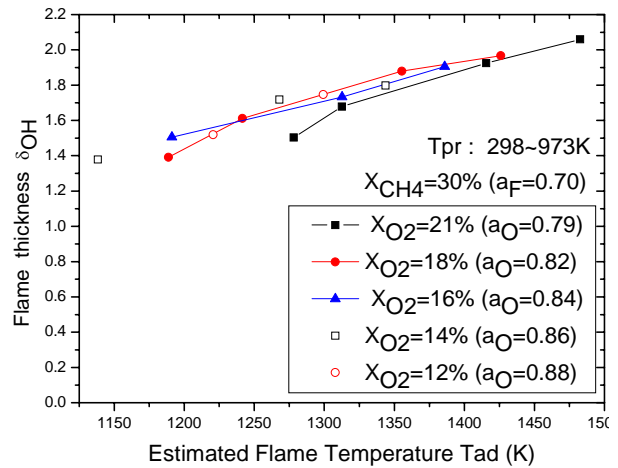


Figure 6 : Variation de l'épaisseur de la zone d'émission de OH avec la température de flamme estimée pour différentes valeurs de T_{pr} et des taux de dilution du méthane ($X_{CH_4} = 30\%$)

Les figures 5 et 6 reportent les variations de l'épaisseur δ_{OH} de l'émission OH avec la température de flamme T_{ad} pour différentes valeurs de T_{pr} et des concentrations en réactifs X_{CH_4} et X_{O_2} . On observe que l'épaisseur de la zone réactive, caractérisée par δ_{OH} , augmente

3.3. Epaisseur de la zone réactive

L'épaisseur de la zone réactive δ_{OH} est déterminée à partir du traitement des images de l'émission des radicaux OH, il est supposée que cette grandeur est représentative du comportement de la combustion en fonction de la température de préchauffage et des taux de dilution des réactifs dans les flux à contre courant.

significativement avec la température de préchauffage des réactifs. Une augmentation plus limitée de δ_{OH} est notée avec les concentrations en CH_4 et O_2 , l'effet de X_{O_2} est légèrement plus important. Dans tous les cas, l'effet de la température de préchauffage reste prépondérant sur ceux des taux de dilution, c'est donc le paramètre contrôlant le régime de combustion diluée.

Si l'on suppose que la zone réactive s'inscrit entièrement à l'intérieur de la zone de mélange des jets, l'épaisseur de la flamme peut être corrélée à l'épaisseur de la zone de mélange $\delta_{mélange}$. Pour un écoulement laminaire, $\delta_{mélange}$ varie avec $(D/u_h)^{1/2}$ [20] où D est le coefficient de dilution des espèces qui peut être supposé proportionnel à $T_{pr}^{1.8}$. Ainsi une épaisseur de flamme normée $\delta_{OH}^* = \frac{\delta_{OH}}{T_{pr}^{0.4}}$ est définie afin de coupler les effets de température et de dilution. La figure 7 rassemble les variations de δ_{OH}^* en fonction de la température de flamme estimée pour différents rapports de dilution. Une même variation quasi-linéaire est obtenue. L'épaississement de la flamme apparaît principalement lié à l'augmentation de la température de préchauffage, l'effet de la dilution de l'oxygène apparaît comme moins important, celui du méthane encore plus faible.

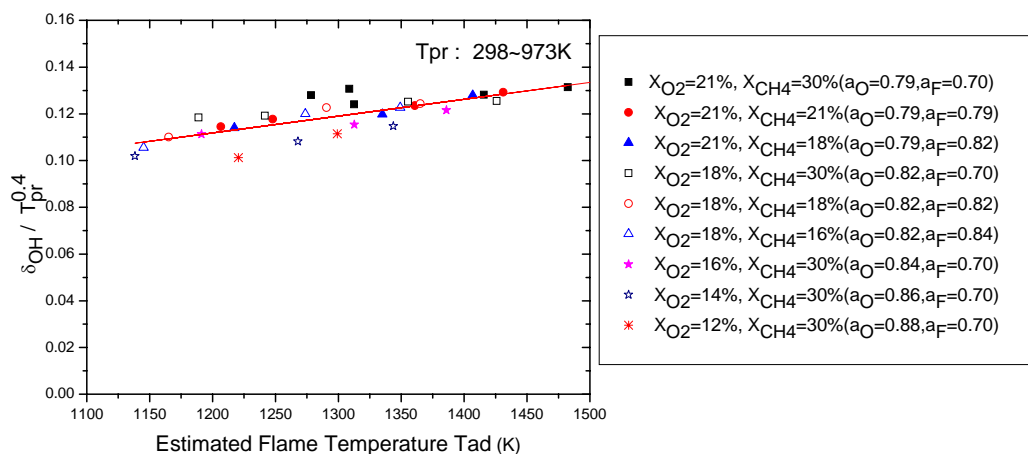


Figure 7 : Variation de l'épaisseur normée de la flamme en fonction de la température de combustion estimée T_{ad} pour différentes valeurs de T_{pr} , a_F et a_O

4. Conclusion

L'analyse des résultats sur la stabilisation de la flamme et sur la variation de l'épaisseur de l'émission OH montrent que :

- le préchauffage des réactifs :
 - élargit le domaine d'existence de la combustion qui subsiste avec des taux de dilution de réactifs particulièrement importants, particulièrement pour l'oxygène lorsque T_{pr} atteint 973K ;
 - épaissit la zone d'émission induite de OH d'une manière plus importante que celle d'un accroissement de la concentration des réactifs ;
 - épaissit la zone de mélange des réactifs (accroissement de la viscosité dynamique des fluides et du coefficient de diffusion moléculaire des espèces chimiques), mais dans des proportions inférieures à celle de la zone réactive;
- la dilution des réactifs :

- limite l'intensité des pics à forte température, d'où un abaissement de la production des oxydes d'azote d'origine thermique ;
- diminue l'épaisseur de la zone réactive. Ce dernier effet est opposé à l'effet d'épaississement dû à la température T_{pr} , mais l'influence de ce dernier reste primordial.

Bien que ces résultats exigent encore d'être complétés dans d'autres conditions, ils confirment le point clé de la combustion « sans flamme » ou « dilué » à savoir que le préchauffage par dilution des réactifs dans les gaz brûlés (ici par de l'azote chaud) permet de stabiliser des flammes dans une zone réactive épaissie. Les phénomènes caractéristiques de ce mode apparaissent lorsque le préchauffage des réactifs atteint 973K, mais l'émission de la flamme disparaît pour des températures T_{pr} encore supérieures, la combustion subsistant avec des concentrations en réactifs extrêmement faibles (quelques % d'oxygène).

Ce travail a permis d'apporter une connaissance supplémentaire à l'apparition du nouveau régime de combustion « sans flamme ». Ce régime permet d'accroître l'efficacité de la combustion et de réduire fortement la production d'oxydes d'azote d'origine thermique.

Références

1. J. A Wüning, J. G. Wüning, Gas Wärme International, 10 (1992) 438-444
2. T. Hasegawa, R. Tanaka, Combustion Science and Technology 4 (1994) 265-273
3. J. A Wüning, J. G. Wüning, Progress in Energy and Combustion Science, 4 (1997) 1315-1321
4. J. A. Wüning and J. G. Wüning, Prog. Energy Combust. Sci. 23 (1997) 81-94
5. M. Katsuki, T. Hasegawa, Proc. Combust. Inst. 27 (1998) 3135-3146
6. T. Plessing, N. Peters, J. G. Wüning, Proc. Combust. Inst. 27 (1998) 3197-3204
7. T. Fujimori, D. Riechelmann, J. Sato, Proc. Combust. Inst. 27 (1998) 1149-1155
8. T. Ishiguro, S. Tsuge, T. Furuhashi, et al., Proc. Combust. Inst. 27 (1998) 3205-3213
9. R. Weber, S. Orsino, N. Lallemant, et al., Proc. Combust. Inst. 28 (2000) 1315-1321
10. P. Bauer, *Etude expérimentale d'un régime de combustion diluée dans une configuration à contre-courant*, PhD thesis, l'Université de POITIERS, Poitiers, France, 2006
11. P. Bauer, J. M. Most, Y.Y. Liu, et al., Proceedings of the European Combustion Meeting 2007, Mediterranean Agronomic Institute of Chania, Crete, Greece, 11-13 April 2007
12. A. Cavaliere, M. de Joannon, Progress in Energy and Combustion Science 30 (2004) 329-366
13. E. Mastorakos, A.M. K.P. Taylor, J. H. Whitelaw, Combust. Flame 102 (1995) 101-114
14. K. Maruta, K. Muso, K. Takeda, et al., Proc. Combust. Inst. 28 (2000) 2117-2123
15. C. H. Sohn, I. M. Jemong, S. H. Chung, Combust. Flame 130 (2002) 83-93
16. R. Fuse, H. Kobayashi, Y. Ju, et al., Int. J. Therm. Sci. 41 (2002) 693-698
17. H. Tsuji, Progress in Energy and Combustion Science 8 (1982) 93 -119
18. C. K. Westbrook, F. L. Dryer, Combust Sci Tech 27 (1981): 31 - 43
19. T Fujimori, D Riechelmann, J Sato, Proc. Combust. Inst. 28 (2000) 455-461
20. T. Poinso and D. Veynante, Theoretical Numerical Combustion, Second Edition, Edwards, USA, 2005.

Remerciements

Ce travail a été financé par le programme Energie du CNRS, le ministère de la recherche, la région Poitou-Charentes, l'Université Aéronautique et Astronautique de Pékin ainsi que par Fondation des Sciences de Chine. Que ces organismes soient remerciés.