

# Etude du décrochement d'une flamme laminaire sous l'effet d'un champ magnétique

B. SARH, P. GILLON, T. DELMAERE, M. CHAHINE, M. BIARD

ICARE-CNRS – Université d'Orléans, 1C, avenue de la Recherche Scientifique 45071 Orléans

## Résumé :

Dans cette étude numérique, on s'intéresse particulièrement aux mécanismes qui peuvent être induits par un gradient de champ magnétique sur une flamme laminaire de diffusion décrochée. Cette flamme de méthane-air est issue d'un brûleur à jets coaxiaux. Les résultats obtenus montrent que le gradient de champ magnétique réduit l'intensité du gradient de fraction massique du carburant, modifiant ainsi la vitesse de propagation de la flamme et par la suite la hauteur de décrochage.

## Abstract :

In this numerical study, one is interested particularly in the study of the mechanisms which can be induced by a gradient of magnetic field on a laminar lifted diffusion flame. This flame of methane-air is issuing from a coaxial jets burner. The results obtained show that the magnetic field gradient reduces the intensity of the fuel mass fraction gradient and consequently modifies the propagation velocity of the flame.

**Mots clefs :** Flamme laminaire de diffusion CH<sub>4</sub>/Air – Champ magnétique – Hauteur de décrochage – Mélange de jets coaxiaux – Simulations numériques

## 1. Introduction :

Les flammes laminaires décrochées du brûleur continuent à être étudiées afin d'identifier les mécanismes qui conduisent au décrochage (liftoff). En effet, la compréhension des mécanismes de stabilisation des flammes décrochées est d'une importance cruciale aussi bien pour les études fondamentales, que pour des applications pratiques. Dans ces dernières, on a souvent recours à des artifices pour minimiser voire réduire ce décrochage et particulièrement dans les flammes turbulentes. Ainsi parmi les solutions pour opérer cette stabilisation de flamme et son accrochage au brûleur sont utilisés, soit des flammes pilotes, nécessitant la modification de la géométrie du brûleur, soit une assistance par plasma, champ électrique ou champ magnétique. C'est dans ce dernier cas où se situe cette étude. On s'intéresse donc à l'impact d'un gradient de champ magnétique sur le développement d'une flamme laminaire axisymétrique CH<sub>4</sub>/air, issue d'un brûleur à jets coaxiaux. La flamme ainsi obtenue est une flamme laminaire triple (triple flamme) qui peut être décollée du brûleur si les conditions de vitesse de l'écoulement sont favorables.

C'est Philipps [1] qui a observé les premières flammes laminaires triples dans une couche de mélange 2D de concentration stratifiée de méthane. Ces flammes sont constituées de trois branches qui naissent au même point, appelé point triple, où deux branches de flammes de prémélanges l'une pauvre et l'autre riche, entourent une troisième branche de flamme de diffusion. Chung et Lee [2] qui ont travaillé sur des flammes laminaires de jets libres de fuel débouchant dans de l'air, ont montré que le nombre de Schmidt, Sc, joue un rôle important sur la hauteur de décrochage.

Pour des flammes de jet simple dont le nombre de Schmidt,  $1 < Sc < 0,5$  (cas du CH<sub>4</sub>), on n'observe pas de décrochement de la flamme lorsque la vitesse d'éjection du fuel augmente. Par contre pour des flammes de jets coaxiaux CH<sub>4</sub>-Air, ou des jets de CH<sub>4</sub> débouchant dans un co-courant d'air ayant une vitesse non nulle,

il est possible d'observer un décrochage de la flamme dont la hauteur est proportionnelle à la vitesse, Smooke et al. [3], Won et al. [4], Plessing et al. [5], Takhashi et Katta [6], ou proportionnelle à la vitesse et au mélange ( $\text{CH}_4$  + azote), Walsh et al. [7].

Cette hauteur de décrochage est aussi affectée par la présence autour de la flamme d'un champ magnétique. D'une manière générale, plusieurs travaux ont été conduits pour déterminer avec précision l'impact du champ magnétique sur les flammes. L'équipe Ueno et Harada [8] a observé à partir d'expériences sous champ magnétique à fort gradient ( $200 \text{ T/m} < \nabla B < 300 \text{ T/m}$ ) que les flammes étaient fortement déformées et que l'écoulement de comburant (air) était modifié. Wakayama [9] montre que la présence d'oxygène dans les jets aux abords de l'entrefer d'un électroaimant permet de modifier la vitesse du jet. Wakayama et Sugie [10] montrent qu'il est possible de contrôler la combustion sur les flammes de diffusion à partir d'un champ magnétique. Les auteurs ont placé une flamme au niveau des gradients décroissants d'un électroaimant et ont constaté une réduction de la géométrie de la flamme. Yamada et al [11] proposent à partir d'une étude numérique qui simule une flamme de diffusion soumise à 4 gradients magnétiques différents que les mouvements du radical OH observés lors des expériences soient provoqués par l'air ambiant qui entre ou sort de la flamme entraîné suivant les différents gradients magnétiques. La même équipe, Yamada et al [12], réalise une flamme de diffusion  $\text{H}_2/\text{O}_2$  et la compare qualitativement à des résultats numériques. Baker et Calvert [13] ont étudié le comportement d'une flamme de diffusion sous plusieurs intensités d'un champ magnétique décroissant. Ils montrent, à partir d'une combinaison des nombres de Grashof, Grashof magnétique, et de Froude, Froude magnétique, un comportement universel des flammes qui peut être utilisé pour prédire la longueur des flammes sous champ magnétique. Khaldi F. [14] a réalisé une étude numérique et expérimentale sur une flamme de diffusion de propane dans l'air soumise à un fort gradient magnétique. L'auteur montre ainsi que le champ magnétique joue un rôle important sur les mécanismes de convection en créant une convection magnétique. Cette convection magnétique peut amplifier ou annuler l'effet de convection naturelle. Baker et Saito [15] et Gupta et Baker [16] ont réalisé des études portant sur l'influence d'un champ magnétique uniforme sur une flamme de diffusion. Les auteurs montrent que l'influence du champ magnétique augmente avec la température. Enfin Gilard et al. [17] ont étudié expérimentalement l'influence d'un champ magnétique sur des flammes coaxiales laminaires de  $\text{CH}_4/\text{air}$ . Ils montrent que le champ magnétique réduit les hauteurs de décrochage des flammes décollés, repousse les limites d'extinction de la flamme et que le domaine de stabilité de la flamme est augmenté en présence du champ magnétique.

Notre objectif dans cette étude est de comprendre comment le champ magnétique modifie les hauteurs de décrochage des flammes laminaires d'une part, et comment la structure de la flamme se trouve affectée par ce champ d'autre part. Pour cela, cette étude numérique est conduite sur une flamme laminaire à jets coaxiaux de méthane et d'air se développant dans un gradient de champ magnétique généré par un aimant.

## 2. Formulation du problème

La figure 1, présente les caractéristiques du brûleur. Il est composé de deux jets coaxiaux issus de deux tubes concentriques de diamètre 4 mm et 10 mm. Le méthane est injecté par le tube central et l'air par le tube annulaire. L'épaisseur des tubes est de 1 mm. La paroi du tube central est effilée de manière à éviter une recirculation de l'écoulement à la sortie. La longueur,  $L$ , des tubes est de 219 mm.

Les débits de fuel et d'air utilisés sont :

Méthane:  $4,32 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  - Air :  $5,13 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$

Les autres caractéristiques de l'écoulement sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Rapport des diamètres	$r_{Di} = D_{air}/D_c$	2,5
Rapport des vitesses	$r_v = u_{air}/u_c$	2,35
Rapport des densités	$r_d = \rho_{air}/\rho_c$	1,8
Rapport des quantités de mouvement	$r_M = (\rho_{air} u_{air}^2)/(\rho_c u_c^2)$	9,94
Nb de Reynolds $\text{CH}_4$	$Re_c = u_c D_c / \nu_c$	78
Nb de Reynolds air	$Re_{air} = u_{air} D_{air} / \nu_{air}$	510
Nb de Froude	$Fr = \rho_c u_c^2 / (\rho_\infty \rho_c) g D_c$	3,78
Richesse	$\phi$	0,8

### 3. Démarche numérique

Les jets de méthane et d'air sont issus verticalement du brûleur et débouchent dans de l'air stagnant. L'écoulement est laminaire, stationnaire et axisymétrique. Les équations qui régissent cet écoulement sont les suivantes :

Equation de continuité

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

où  $\rho$  est la masse volumique et  $\vec{v}$  le vecteur vitesse.

Equation de quantité de mouvement

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F}$$

où  $P$  est la pression,  $\vec{g}$  est l'accélération de la pesanteur,  $\vec{F}$  représente les forces volumiques extérieures,  $\vec{\tau}$  est le tenseur des contraintes.

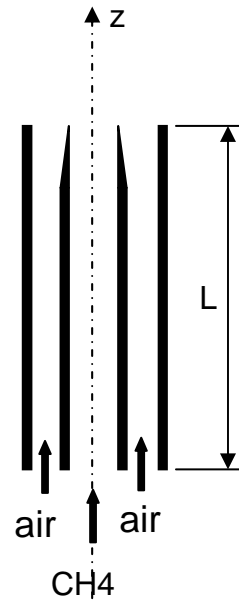


Figure 1 : Schéma du brûleur

Equation d'espèces

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + \dot{\omega}_i$$

où  $Y_i$  est la fraction massique de l'espèce  $i$ ,  $\dot{\omega}_i$  est le taux de production/destruction de l'espèce  $i$  ( $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $\vec{J}_i$  est le flux de diffusion d'espèces qui obéit à la loi de Fick.

Equation de l'énergie :

$$\nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + P)) = \nabla \cdot \left( k \nabla T - \sum_i h_i \vec{J}_i + (\vec{\tau} \cdot \vec{v}) \right) + Q_{\text{réaction}} + Q_{\text{rayonnement}}$$

$E$  est l'énergie du volume  $E = h - \frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2}$  où  $h$  est l'enthalpie.  $k$  est la conductivité thermique,  $\vec{J}_i$  la diffusion d'espèce.  $Q_{\text{réaction}}$  représente le flux de chaleur apporté/retiré par différentes réactions chimiques, et  $Q_{\text{rayonnement}}$  le flux de chaleur échangé par rayonnement. La quantité de chaleur dégagée par la réaction est calculée par l'expression suivante :  $Q_{\text{réaction}} = -\sum_i h_i^0 \dot{\omega}_i$  avec  $h_i^0$  l'enthalpie de formation de l'espèce  $i$  et  $\dot{\omega}_i$  le taux de création/destruction de l'espèce.

Equation d'état :

$$\rho = \frac{P}{RT \sum_i \frac{Y_i}{M_{w,i}}}$$

avec  $P=101325$  Pa

Le modèle de combustion utilisé est le modèle de Smooke et Giovangigli [18]. C'est un mécanisme réactionnel à 26 réactions et 16 espèces chimiques.

Ces équations sont résolues par le code FLUENT dans lequel deux modifications ont été introduites :

- ajout d'un terme source dans l'équation de quantité de mouvement représentant l'influence du champ magnétique. Seule la force résultant de l'influence du champ magnétique

sur l'oxygène a été comptabilisée :  $\vec{F} = \frac{1}{2\mu_0} \rho Y_{O_2} \chi_{m,O_2} \nabla(B^2)$

où  $\chi_{m,i} = \chi_{O_2} / \rho_{O_2}$  et  $\chi_{O_2}$  est la susceptibilité paramagnétique du dioxygène et  $\rho$  est la masse volumique de l'air et  $Y_{O_2}$  fraction massique de l'oxygène.

Pour l'oxygène à 300K,  $\chi = 1,8517 \times 10^{-6}$ .

- ajout d'un modèle radiatif qui permet de ne prendre en compte que les pertes radiatives des gaz chauds et notamment des espèces les plus radiatives comme le CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O et CH<sub>4</sub> (Barlow et al. [19]).

La figure 2 montre le maillage approprié au calcul numérique. L'origine du repère (r,z) est fixée au centre de la section de sortie du brûleur. Le domaine du calcul s'étend verticalement de z=-215 mm à z=750 mm, et radialement de r=0 à r=200 mm.

Les conditions aux limites sont de type 'ouverte':

Sur l'axe z : condition de symétrie

Sur les segments bc et cd, condition de pression

Sur le segment ab : du/dz=0 et v=0,  $Y_{O_2}=0,2316$  et  $Y_{N_2}=0,7684$ , T=300 K

Sur les parois du brûleur les vitesses axiales et normales sont nulles. La température des parois est prise égale à 300 K

Une étude de sensibilité des résultats au maillage a été réalisée. Le nombre de mailles finales adoptées est de 118650 mailles.

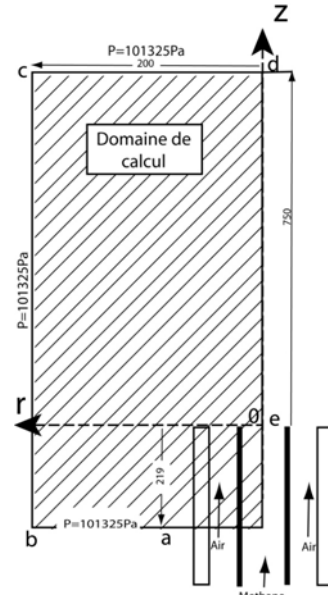


Figure 2 : maillage

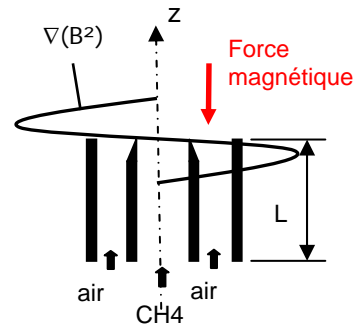


Figure 3 : Profil de  $\nabla(B^2)$ , sens de la force magnétique sur O<sub>2</sub>

#### 4. Résultats

Nous présentons ici les résultats obtenus dans le cas de la flamme laminaire décrochée avec et sans la présence du champ magnétique. L'axe de l'aimant est placé sur la section de sortie du brûleur et le centre de l'aimant est centré sur l'axe vertical du brûleur [cas c0]. Le gradient du champ magnétique et la force résultante sont présentés sur la figure 3.

Avant de réaliser le calcul dans le cas réactif, nous avons entrepris une étude complète de l'influence du champ magnétique sur l'écoulement sans flamme : mélange CH<sub>4</sub>/air.

Sur la figure 4, nous présentons la distribution de la température de la flamme en l'absence et en présence du champ magnétique. Compte tenu des débits de CH<sub>4</sub> et d'air cités ci-dessus, et d'un gradient magnétique de 30 T<sup>2</sup>/m, nous obtenons les valeurs suivantes pour la hauteur de décrochage, la longueur de la flamme et la température maximale dans la flamme :

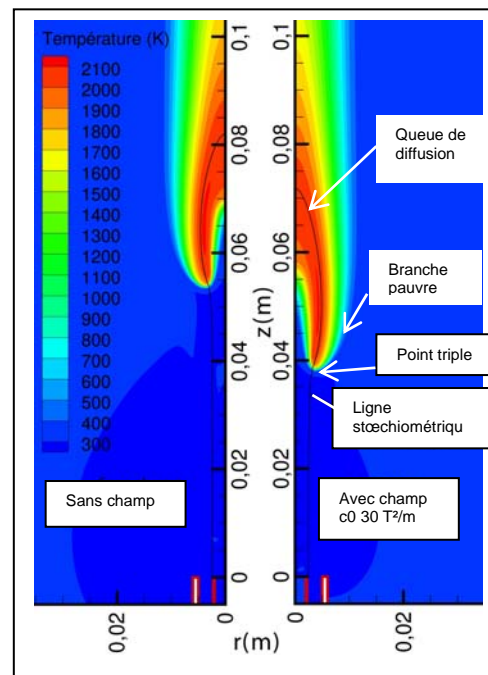


Figure 4 : Distribution spatiale de la température de la flamme

	Sans champ	c0 30T <sup>2</sup> /m
H <sub>L</sub> (mm)	53,41	38,01
L <sub>f</sub> (mm)	28,54	33,79
T <sub>max</sub> (K)	2109	2106

On note que la flamme sous champ magnétique, c0 30 T<sup>2</sup>/m, présente une longueur visible de flamme et une longueur des branches riches supérieures à celles du cas sans champ. Le rapport entre ces dimensions respectivement est de 1,35. Cette augmentation de la longueur visible de la flamme et des branches riches est à corrélérer avec les évolutions des champs de fraction massique de CH<sub>4</sub> et d'O<sub>2</sub> respectivement sur les figures 5 et 6. En effet, comme la hauteur de décrochage a été diminuée sous l'action du champ magnétique, la flamme sous champ magnétique se stabilise à une hauteur où le mélange central contient plus de méthane que dans le cas sans champ. A l'inverse, la fraction massique d'oxygène, O<sub>2</sub>, se trouve en proportion réduite par rapport au cas sans champ. Cette fraction massique d'O<sub>2</sub> moins importante dans le cas avec champ, à cause de la force magnétique qui décroît la vitesse du jet annulaire d'air, conduit à une longueur de flamme supérieure à celle observée dans le cas sans champ (Stephen R. Turns, [20]).

En ce qui concerne la largeur de flamme, pour pouvoir opérer une comparaison entre les deux cas avec et sans champ magnétique, nous avons tracé l'évolution du rayon stœchiométrique obtenu lors de l'étude dans le cas non réactif, voir figure 7. Ces courbes montrent que le ralentissement du jet annulaire et la meilleure diffusion du méthane à cause du champ magnétique, permettent au point triple de se positionner à des valeurs de rayons plus élevées que dans le cas sans champ. Ceci décale les branches de réactions et augmentent la largeur de la flamme. De plus, lorsque l'on calcule les gradients de fraction massique de CH<sub>4</sub>, on montre que le gradient de concentration décroît entre le cas sans champ et le cas avec champ. Or d'après Ko et Chung [21], Kim et al. [22], la vitesse de propagation de la flamme augmente quand le gradient de fraction massique décroît. Ceci conduit à une réduction de la hauteur de décrochage de la flamme laminaire par rapport au cas sans champ magnétique.

## 5. Conclusions et perspectives

L'étude numérique de la flamme laminaire décrochée a permis d'expliquer les modifications que subit la flamme dans sa structure lorsqu'elle est soumise à un gradient de champ magnétique.

L'étude des mélanges de jets dans le cas sans flamme à permis de conclure sur les gradients de concentration et par la suite sur les vitesses de propagation des flammes expliquant ainsi la réduction de la hauteur de décrochage de la flamme. Ce travail se poursuivra par le calcul des flammes dans d'autres situations de vitesses d'air et de CH<sub>4</sub> et aussi dans d'autres conditions d'intensité du champ magnétique.

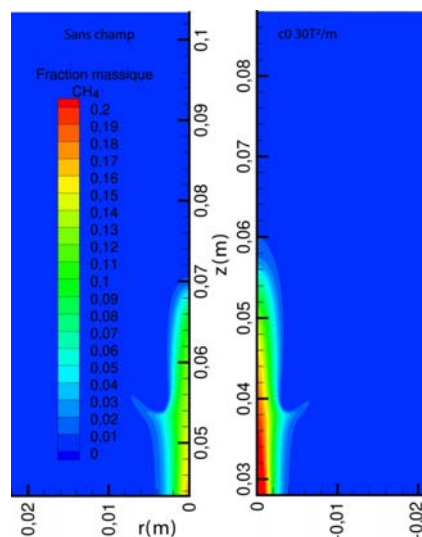


Figure 5 : Distribution spatiale de CH<sub>4</sub>

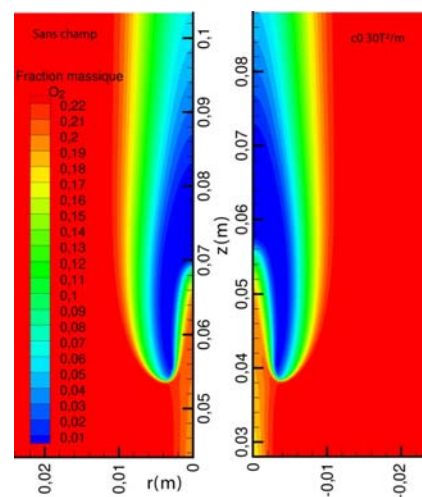


Figure 6 : Distribution spatiale d'O<sub>2</sub>

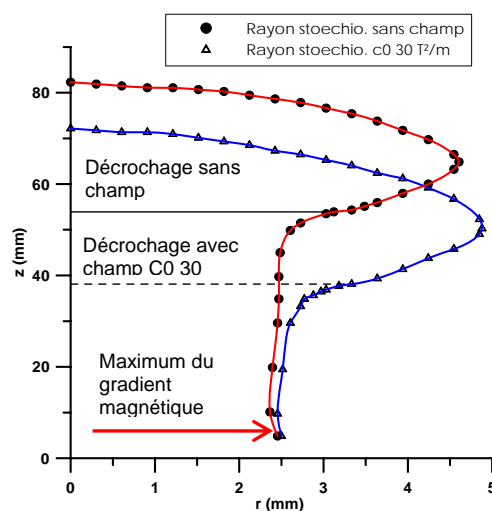


Figure 7 : Evolution du rayon stœchiométrique

## Références

- [1] Philips H. (1965), «Flame in buoyant methane layer», Proc. Combust. Inst. 10 (1965) 1277-1283.
- [2] Chung S.H., Lee B. J., (1991), « On the characteristics of laminar lifted flames in a nonpremixed jet» Combustion and Flame 86, 62-72.
- [3] Smooke M.D., Ern A., Tanoff M.A., Mohammed R.K., Marran D.F. and Long M.B. (1996) « Computational and experimental study of NO in an axisymmetric laminar diffusion flame ». 26<sup>th</sup> Symposium on Combustion Institute, pp. 2161-2170.
- [4] Won S.H., Kim J., Hong K.J., Cha M.S. Chung S.H. (2005) « Stabilization mechanism of lifted flame edge in the near field of coflow jets for diluted methane ». Proceedings of the Combustion Institute 30, 339-347.
- [5] Plessing T., Therhoeven P., Peters N., Mansour M. S. (1998) « An experimental and numerical study of a laminar triple flame ». Combustion and Flame, 115, 335-353.
- [6] Takahashi F. and Katta V. (1996) «Unsteady extinction mechanisms of diffusion flames». 26<sup>th</sup> Symposium on Combustion Institute, pp. 339-347.
- [7] Walsh K.T., Fielding J., Smooke M.D., Long M. B. and Linan A. (2005) « A comparison of computational and experimental lift-off heights of coflow laminar diffusion flames ». Proceedings of the Combustion Institute 30, 357-365.
- [8] Ueno S. and Harada K. (1987) « Effects of magnetic fields on flames and gas flow » IEEE Transactions on Magnetics 23 (5), 2752-2754.
- [9] Wakayama N. I.(1995) « Magnetic acceleration and deceleration of O<sub>2</sub> gas streams injected into air» IEEE Transactions on Magnetics 31 (1), 897-901.
- [10] Wakayama N. I., Sugie M. (1996) « Magnetic promotion of combustion in diffusion flames» Physica B 216,;403-405.
- [11] Yamada E., Shinoda M., Yamashita H., Kitagawa K., (2003), « Influence of four kinds of gradient magnetic fields on hydrogen-oxygen flame» AIAA journal, 41 (8), 1535-1541.
- [12] Yamada E., Shinoda M., Yamashita H., Kitagawa K., (2003\*), « Experimental and numerical analyses of magnetic effect on OH radical distribution in hydrogen-oxygen diffusion flame» Combustion and Flame 135, 365-379.
- [13] Baker J., Calvert M. E., (2003), « A study of the characteristic of slotted laminar jet diffusion flames in the presence of non uniform magnetic fields» Combustion and Flame 133, 345-357.
- [14] Khaldi F. (2004), « Flamme de diffusion laminaire dans un gradient magnétique vertical », Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble.
- [15] Baker J., Saito K., (2000), « Magnetocombustion: a thermodynamic analysis» Journal of Propulsion and Power 15 (2), 263-268.
- [16] Gupta A., Baker J., (2005), « Effect of uniform magnetic field on equilibrium combustion composition: Constant volume » AIAA journal 43 (11), 2438-2444.
- [17] Gilard V., Gillon P., Blanchard J.N. and Sarh B. (2008) « Influence of horizontal magnetic field on a co-flow methane/air diffusion flame », Combust. Sci. and Tech. 180, 1920-1935.
- [18] Smooke M.D. and Giovangigli V. (1994) « Simplified Transport and reduced chemistry models on premixed and non premixed combustion », pp. 81-106 in: J.Buckmaster and T.Takeno (Eds.) Modeling in Combustion Science, Proc. of the US-Japan Seminar, Kapaa, Kauai, Hawaii, 24-29 July 1994 Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1995.
- [19] Barlow R.S., Karpetis A.N., Frank J.H. and Chen J.Y. (2001), « Scalar profiles and NO formation in laminar opposed flow partially premixed Methane/Air flames ». Combustion and flame, 127, 2102-2118.
- [20] Turns S.R. (1996) « An introduction to combustion Concept and application », Mac Graw Hill, Inc.
- [21] Ko Y.S. and Chung S.H. (1999), « Propagation of Unsteady Tribrachial Flames in Laminar Non-premixed Jets », Combustion and Flame 118:151-163.
- [22] Kim I. N., Seo I.J., Chul OH K., Shin H.D., (2005) « Lift-off Characteristics of triple flame with concentration gradient », Proceedings of the Combustion Institute, 30, 367-394.