



Effet d'un microjet sur les émissions polluantes en NO au sein des flammes CH₄-H₂/air

Sirine CHOUAIEB¹, Wassim KRIAA¹, Hatem MHIRI¹, Philippe BOURNOT²

¹UTTPI, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Monastir (TUNISIE)

²Institut de Mécanique de Marseille, 60 rue Joliot Curie Technopôle de Château-Gombert 13453 MARSEILLE
Cedex 13 (FRANCE)

chouaieb.sirine@yahoo.fr

kriaawass@yahoo.fr

hatem.mhiri@enim.rnu.tn

philippe.bournot@yahoo.fr

Résumé : L'utilisation des fuels composites CH₄-H₂ constitue une approche intéressante permettant d'améliorer les performances au sein des équipements industriels comparée aux fuels hydrocarbonés. En contre partie, l'utilisation des fuels composites est à l'origine d'une nette augmentation des monoxydes d'azote. Dans ce travail, on se propose d'évaluer la technique du microjet impliquée pour résoudre le problème de production des monoxydes d'azotes caractérisant les flammes CH₄-H₂/air. Les modèles Presumed PDF, Discret Ordinates et k-ε Standard avec la correction de Pope sont utilisés respectivement pour la modélisation de la combustion, du rayonnement et de la turbulence. Le calcul des émissions des monoxydes d'azotes est effectué à l'aide d'un post processeur. Les résultats numériques montrent l'efficacité de la technique du microjet quant à la réduction de l'émission de ces polluants pour un taux faible d'enrichissement en hydrogène ne dépassant pas 10%.

Mots clés :

Fuels composites, monoxydes d'azote, microjet, enrichissement.

1. Introduction

L'amélioration du mélange réactif au sein des équipements de combustion constitue l'objectif principal des chercheurs aussi bien que des industriels. A l'échelle pratique, un processus de mélange efficace garantit d'une part la réduction des polluants et contribue d'autre part à améliorer le rendement des équipements de combustion. Le souci des industriels est d'utiliser des outils faciles à manipuler permettant d'optimiser les performances énergétiques sans pénalité environnementale.

Il est à noter que les fuels composites CH₄-H₂ constituent la meilleure alternative aux fuels hydrocarbonés utilisés pour l'amélioration du mélange tout en réduisant les émissions en monoxydes de carbone et en particules de suie. Babak et al. [1] ont étudié numériquement une flamme de propane-hydrogène avec « bluff-body » et ont montré que le taux de CO dégagé diminue avec l'augmentation de la teneur en hydrogène. Ilbas et al. [2] ont simulé numériquement trois configurations de chambres de combustion en utilisant les modèles k-ε standard et P₁ respectivement pour la turbulence et le rayonnement. Les résultats numériques ainsi obtenus sont en bon accord avec ceux expérimentaux. Concernant la quantification des polluants (NO et CO), ils ont trouvé d'une part que les émissions en NO sont plus importantes pour le cas de H₂ pur puisque la température maximale atteinte dans ce cas prend la valeur la plus grande. D'autre part, la fraction massique en CO est nulle pour le cas

de 100% H₂ et augmente avec l'augmentation de la proportion de CH₄ dans le mélange (H₂/CH₄). Une étude numérique a été élaborée par Guo et al. [3] pour l'étude des flammes de diffusion éthylène-air. Les discussions portent essentiellement sur l'effet de l'enrichissement en hydrogène sur les émissions de suie. Les simulations numériques ont été menées en adoptant un mécanisme réactionnel détaillé et en tenant compte de l'interaction entre les particules de suie et le milieu réactionnel. Les résultats numériques montrent que les flammes enrichies sont caractérisées par des émissions réduites en suie.

En se référant à la littérature, on peut dire que l'enrichissement en hydrogène permet d'améliorer d'une façon significative les caractéristiques du processus de combustion en améliorant la stabilité des flammes et les émissions polluantes. En contre partie, compte tenu du pouvoir calorifique élevé de l'hydrogène, l'utilisation des fuels composites est à l'origine d'une nette augmentation des monoxydes d'azote produits. En effet, l'utilisation de l'hydrogène engendre une augmentation de la production des monoxydes d'azotes par voie thermique à cause des hautes températures atteintes au sein des flammes enrichies.

Il s'avère donc intéressant de penser à des solutions faciles à manipuler et permettant de profiter des avantages de l'hydrogène en n'utilisant qu'une faible proportion dans le fuel hybride CH₄-H₂. Dans ce contexte, la technique du microjet va être mise en œuvre au sein des flammes CH₄-H₂/air. Dans ce travail, on se propose d'introduire un microjet d'air central et évaluer son effet sur les caractéristiques environnementales des flammes CH₄-H₂/air. L'idée du microjet a été précédemment adoptée par Sinha et al. [4]. En effet, ces auteurs ont effectué une étude expérimentale sur les flammes de diffusion confinées CH₄/air. Cette étude a permis de montrer que les flammes à microjet peuvent être contrôlées sans pénalité environnementale pour une large marge de conditions opératoires [4].

En s'inspirant des résultats expérimentaux antérieurs [4, 5], on a choisi d'appliquer la technique du microjet aux flammes CH₄-H₂/air et tester sa capacité à contrôler les émissions polluantes en NO.

2. Présentation des configurations étudiées

La configuration expérimentale de Brookes et Moss [6] schématisée sur la Figure 1a est utilisée pour étudier un écoulement de type jet coaxial réactif et confiné en régime turbulent. Dans le cadre de ce travail, cette configuration a été équipée d'un microjet central de diamètre D_j égal à 1mm. La configuration testée est présentée sur la Figure 1b.

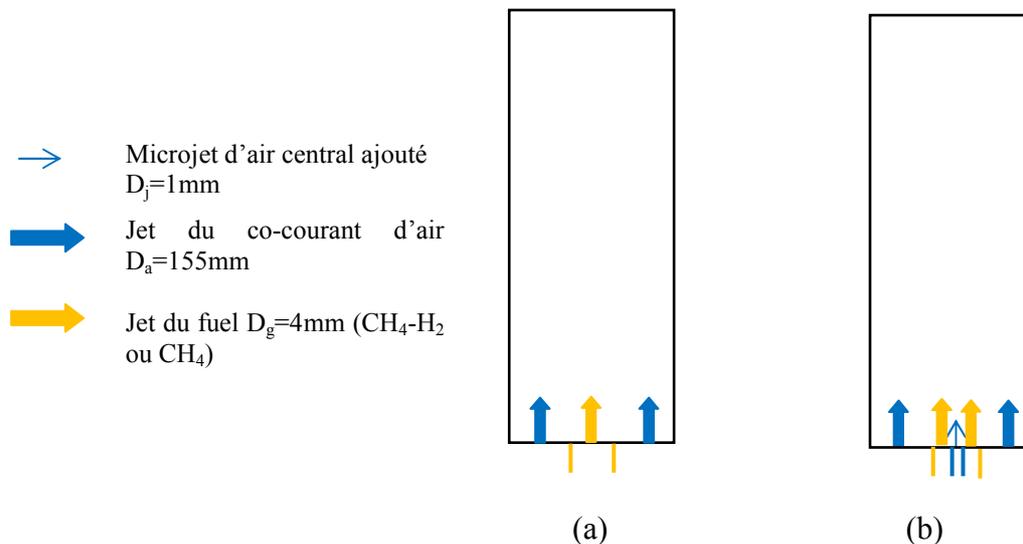


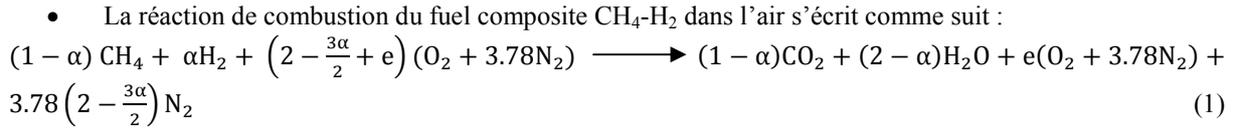
Figure 1: Schématisation de la configuration expérimentale de Brookes et Moss [6] (a) et celle équipée d'un microjet (b)

3. Modélisation numérique

3.1 Hypothèses

Afin de simuler numériquement l'écoulement réactif développé au sein de la configurations de Brookes et Moss [6] et celle équipée d'un microjet, on a adopté les hypothèses suivantes :

- La configuration est bidimensionnelle ;
- L'écoulement est en régimes stationnaire et turbulent ;
- Le fluide est incompressible à masse volumique variable ;
- Les constituants du milieu réactionnel obéissent à la loi des gaz parfaits ;



Avec e et α étant respectivement l'excès d'air et la fraction molaire de l'hydrogène dans le fuel.

3.2 Système d'équations

Les équations moyennées de continuité et de quantité de mouvement décrivant l'écoulement réactif turbulent étudié s'écrivent de la manière suivante:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{\rho u'_i u'_j}) + F_i \quad (3)$$

Le calcul des composantes du tenseur des contraintes de Reynolds $-\overline{\rho u'_i u'_j}$ est détaillé dans la Ref. [7].

La conservation des espèces est prise en compte en résolvant les équations de conservation de la fraction de mélange et sa variance (Eqs. (4) et (5)).

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{f}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_f} \frac{\partial \tilde{f}}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{f}^2) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_f} \frac{\partial \tilde{f}^2}{\partial x_j} \right) + C_g \mu_t \left(\frac{\partial \tilde{f}}{\partial x_j} \right)^2 - C_d \bar{\rho} \frac{\varepsilon}{k} \tilde{f}^2 \quad (5)$$

La conservation de l'énergie est calculée suivant l'Eq. (6). Plus de détails sont disponibles dans la Ref [7].

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{H}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial \tilde{H}}{\partial x_j} \right) + S_E \quad (6)$$

3.3 Modèles physiques utilisés

Afin de modéliser numériquement l'écoulement réactif considéré, on a recours aux modèles rassemblés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Modèles physiques utilisés pour la modélisation de la configuration de Brookes et Moss [6]

Modèle de turbulence	k-ε Standard avec la correction de Pope
Modèle de combustion	Presumed PDF
Modèle de rayonnement	DO

3.4 Conditions d'injection et aux limites

Les conditions aux limites utilisées pour la modélisation de la flamme de Brookes et Moss [6] en présence du microjet (Figure 1) sont données dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Conditions aux limites imposées au sein du domaine de calcul

Domaines	Type des conditions aux limites
Buse du co-courant d'air	Mass flow inlet
Buse du fuel	Mass flow inlet
Buse du microjet d'air	Mass flow inlet
Parois	Wall
Axe de symétrie	Axis
Sortie	Outflow

Afin d'étudier les propriétés des flammes CH₄-H₂/air en présence d'un microjet d'air central, on a considéré les cas tests rassemblés dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Conditions d'injection des flammes à microjet CH₄-H₂/air

Cas test N°	% H ₂ dans le fuel (échelle massique)	\dot{m}_g (kg/s)	\dot{m}_a (kg/s)	\dot{m}_j (kg/s)
1	0	1.72*10 ⁻⁴	118*10 ⁻⁴	2.355*10 ⁻⁵
2	10			
3	30			
4	50			
5	100			

On note que le microjet considéré est éjecté d'une buse centrale de diamètre D_j égal à 1 mm. Pour tous les cas tests, le débit du microjet est fixé à $\dot{m}_j = 2.355 \cdot 10^{-5}$ kg/s soit une vitesse moyenne égale à 25m/s.

3.5. Méthode de résolution numérique

Le maillage adopté est constitué de 60680 cellules élémentaires. Un test de maillage a été effectué pour s'assurer de l'indépendance des résultats numériques du nombre de cellules utilisé. La démarche suivie pour le choix du maillage est celle discutée dans la Ref [8].

La résolution numérique des équations de conservation données précédemment (Eqs (2)-(6)) associées à leurs conditions d'injection et aux limites est effectuée à l'aide du code commercial FLUENT. Un schéma UPWIND de second ordre a été utilisé pour toutes les équations de conservation. L'algorithme SIMPLE est utilisé pour le couplage pression-vitesse.

Le critère de convergence adopté pour les différentes grandeurs calculées est le résidu normalisé. Il est égal à 10⁻⁶ pour l'équation de l'énergie et 10⁻³ pour les autres équations. Concernant les émissions des NO effectuée à l'aide d'un post processeur, le résidu normalisé imposé est égal à 10⁻⁷.

4. Résultats et discussion

4.1. Validation numérique

La Figure 2 illustre les profils numériques axiaux de température comparés à ceux expérimentaux. On note que les mesures expérimentales de température au sein du milieu réactionnel sont reproduites d'une manière satisfaisante.

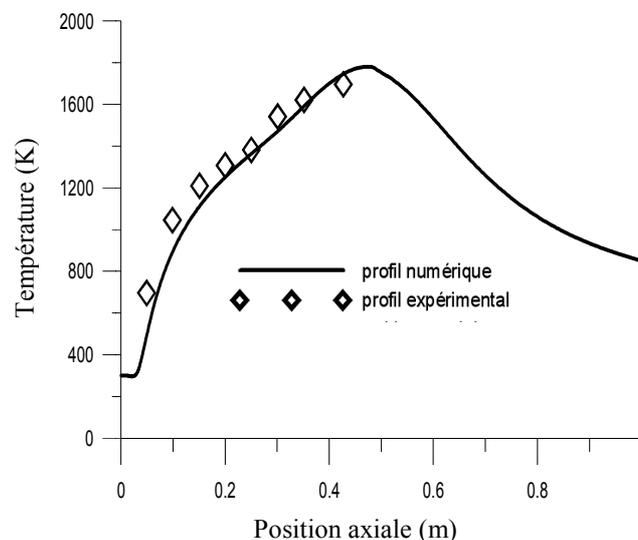


Figure 2: Profils axiaux expérimentaux et numériques de température

4.2. Etude des flammes CH₄-H₂/air en présence d'un microjet d'air central

Bien que l'enrichissement du fuel en hydrogène joue un rôle important dans la réduction des émissions des particules de suie [7], la production des NO est de plus en plus élevée que le pourcentage en hydrogène est important. Ceci est en relation avec le pouvoir énergétique élevé de l'hydrogène provoquant des températures de flammes plus grandes. De même, à cause des problèmes de production, de stockage et de transport, l'utilisation de l'hydrogène reste plutôt théorique et son intégration à l'échelle industrielle est encore en cours de développement. Dans ce travail, on propose la technique du microjet pour résoudre le problème de production des monoxydes d'azotes caractérisant les flammes CH₄-H₂/air.

4.2.1 Effet du microjet sur le champ thermique des flammes CH₄-H₂/air

Avant de procéder à déterminer l'effet du microjet sur les émissions polluantes au sein des flammes enrichies, on doit s'assurer que la technique du microjet n'affecte pas la stabilité des flammes résultantes. Pour se faire, on représente sur la Figure 3 les contours des flammes à microjet CH₄-H₂/air pour des pourcentages de H₂ variant entre 0% et 100%. On note que pour une même vitesse du microjet ($V_j=25$ m/s), l'ajout de l'hydrogène ne modifie pas l'allure générale des flammes développées.

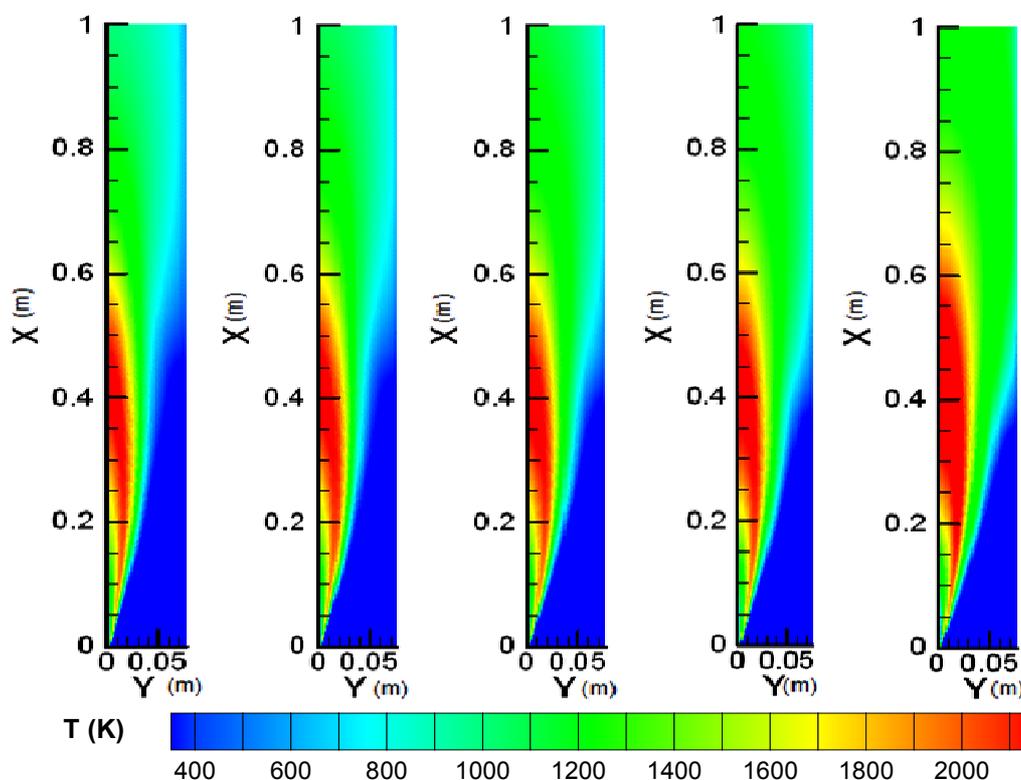


Figure 3 : Effet de l'enrichissement en hydrogène sur les contours des flammes à microjet CH₄-H₂/air

Néanmoins, comme le montre la Figure 4, une vue zoomée des flammes à microjet dans la zone proche de la sortie de la buse centrale indique la présence d'une flamme interne pour tous les cas tests. A priori, la flamme interne est due à la présence du microjet d'air central. En effet, cette flamme interne a été identifiée précédemment par les résultats expérimentaux des flammes à microjet CH₄/air de Sinha et al. [4] et ceux numériques de Chouaieb et al. [7-9].

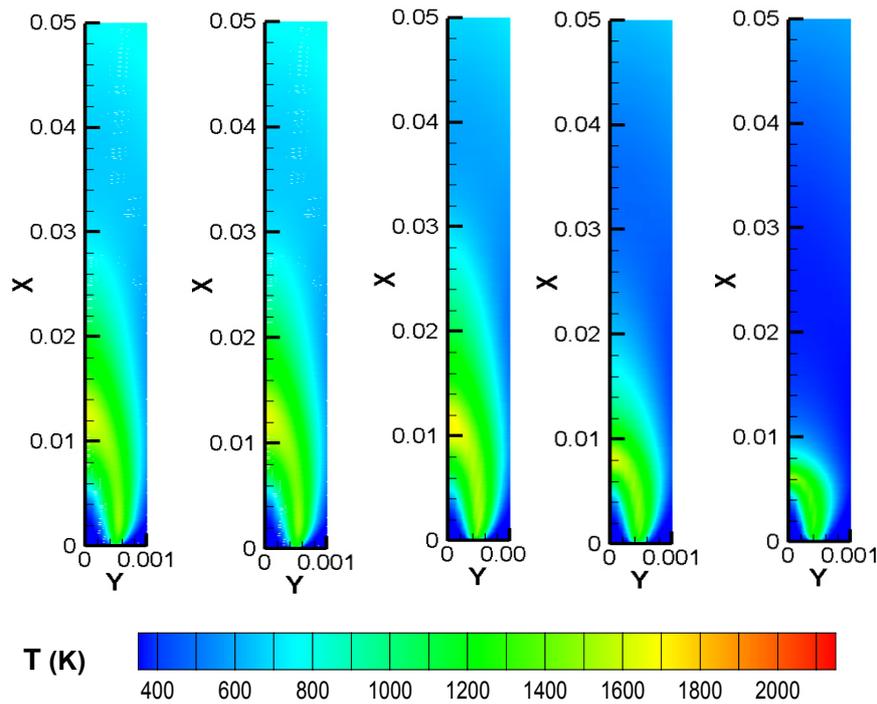


Figure 4 : Identification des flammes internes pour les flammes à microjet CH₄-H₂/air (vue zoomée)

A ce stade, on se propose d'évaluer l'effet du microjet ajouté sur les émissions polluantes en NO à la sortie du confinement pour les flammes CH₄-H₂/air.

Le Tableau 4 récapitule les fractions volumiques des NO émises à la sortie du confinement pour les différents cas tests correspondant à des pourcentages d'hydrogène entre 0% et 100%.

Tableau 4 : Effet du microjet sur les fractions volumiques des NO produits à la sortie du confinement au sein des flammes CH₄-H₂/air

Cas test N°	% de l'hydrogène dans le fuel	Fraction volumique de NO (ppm)	
		Sans microjet	Avec microjet
1	0	0.196	0.0528
2	10	0.318	0.084
3	30	1.466	1.028
4	50	4.193	2.895
5	100	37.345	14.495

En se basant sur le Tableau 4, on note que l'introduction du microjet permet de diminuer remarquablement les émissions en NO pour un même pourcentage d'hydrogène dans le fuel. On conclut ainsi quant à l'efficacité du microjet ajouté pour la réduction des NO émis au sein des flammes CH₄-H₂/air.

La réduction est maximale pour un pourcentage d'hydrogène inférieur ou égal à 10% et dépasse 73%. Ceci peut être dû à la faible réduction de température dans la zone proche de la buse du microjet.

En comparant le taux de NO produit par les flammes à microjet enrichies par rapport à la flamme référence (100% CH₄ sans microjet), on trouve qu'en présence du microjet, on peut atteindre un taux de NO plus réduit pour un pourcentage d'hydrogène ne dépassant pas 10% (cas tests N°1 et N°2). En effet, le cas test N°1 montre que l'ajout du microjet à la flamme de Brookes et Moss [6] permet de minimiser les NO produits à la sortie du confinement de 73%. Et même pour les flammes enrichies, on peut réduire de 57% l'émission des NO si on procède à un enrichissement ne dépassant pas 10% (cas test N°2).

De ces faits, on montre que l'association du microjet aux flammes faiblement enrichies est capable de réduire les émissions polluantes en NO. La technique du microjet permet ainsi de profiter des avantages de l'utilisation de l'hydrogène au sein des équipements de combustion pour un pourcentage faible et sans pénalité environnementale vis-à-vis des NO produits. Cette approche est intéressante dans la filière de combustion de l'hydrogène dans la mesure où elle permet non seulement de faire face aux émissions élevées de NO liées aux hautes températures des flammes enrichies mais aussi de réduire les coûts élevés de sa production.

Conclusion

Ce travail présente une étude numérique portant sur l'effet de l'ajout d'un microjet d'air central sur les émissions polluantes en NO. L'intérêt du microjet ajouté aux flammes CH₄-H₂/air s'impose dans la mesure où il permet de résoudre le problème de l'augmentation des NO produits pour les flammes faiblement enrichies en hydrogène. En effet, comparé au cas sans microjet, les résultats numériques ont permis de conclure que l'ajout du microjet permet de minimiser les NO produits à la sortie du confinement de 73%. Cette réduction est de l'ordre de 57% au sein des flammes enrichies si on procède à un enrichissement ne dépassant pas 10%. Les résultats numériques montrent ainsi que la technique du microjet appliquée aux flammes CH₄-H₂/air est bénéfique puisqu'elle permet d'utiliser moins d'hydrogène et réduire plus le NO produit sans affecter la stabilité des flammes.

Nomenclature

Symbole		X	Position axiale, <i>m</i>
		Y	Position radiale, <i>m</i>
D	Diamètre, <i>m</i>		
D _k	Coefficient de diffusion moléculaire, <i>m</i> ² <i>s</i> ⁻¹		
E	Energie massique totale, <i>J.kg</i> ⁻¹		
f	Fraction de mélange		Symboles grecs
f'	Fluctuation de la fraction de mélange	ρ	Densité, <i>kg.m</i> ⁻³
g	Accélération de pesanteur, <i>m.s</i> ⁻²		
H	Enthalpie, <i>J</i>		
h	Enthalpie spécifique, <i>J.kg</i> ⁻¹		
k	Energie cinétique de turbulence, <i>m</i> ² . <i>s</i> ⁻²		Exposant, Indices
P	Pression statique, <i>Pa</i>	a	Air
Pr	Nombre de Prandtl ($Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda}$)	g	fuel (CH ₄ ou CH ₄ -H ₂)
T	Température, <i>K</i>	j	microjet
u _i , u _j	Composantes de la vitesse moyenne suivant x et y, <i>m s</i> ⁻¹		
u' _i , v' _j	Fluctuations de la vitesse, <i>m s</i> ⁻¹		

Références

- [1] K. Babak, S. Tabejamaat, N. Jalalatian, The impact of hydrogen enrichment and bluff-body lip thickness on characteristics of blended propane/hydrogen bluff-body stabilized turbulent diffusion flames, *Energy Conversion and Management*, 103: 1–13, 2015.
- [2] M. Ilbas, I. Yilmaz, Y. Kaplan, Investigations of hydrogen and hydrogen–hydrocarbon composite fuel combustion and NO_x emission characteristics in a model combustor, *International Journal of Hydrogen Energy* 30: 1139–1077, 2005.
- [3] H. Guo, F. Liu, G.J. Smallwood, O.L. Gülder, Numerical study on the influence of hydrogen addition on soot formation in a laminar ethylene–air diffusion flame, *Combustion and Flame* 145: 324–338, 2006.
- [4] A. Sinha, R. Ganguly, I.K. Puri, Control of confined nonpremixed flames using a microjet; *International Journal of Heat and Fluid Flow* 26: 431–439, 2005.
- [5] R. Ganguly, I.K. Puri, Nonpremixed flame control with microjets; *Experiments in Fluids* 36: 635–641 DOI 10.1007/s00348-003-0749-z, 2004.
- [6] S.J. Brookes, J.B. Moss, Measurements of Soot Production and Thermal Radiation From Confined Turbulent Jet Diffusion Flames of Methane, *Combustion and Flame*, 116:49–6, 1999.
- [7] S. Chouaieb, W. Kriaa, H. Mhiri, Ph. Bournot, Presumed PDF modeling of microjet assisted CH₄-H₂/air turbulent flames. *Energy Conversion and Management*, 120: 412–421, 2016.
- [8] S. Chouaieb, W. Kriaa, H. Mhiri, Ph. Bournot, A parametric study of microjet assisted methane/air turbulent flames, *Energy Conversion and Management* 140C (2017) pp. 121-132, 2017.
- [9] S. Chouaieb, W. Kriaa, H. Mhiri, Ph. Bournot, Étude numérique des champs thermique et dynamique d'un brûleur coaxial avec un microjet d'air central, *Congrès Français de thermique SFT : Thermique & contexte incertain*, Gerardmer, 2013.