



Effet de l'Ajout de Carburant d'Hydrogène sur la Flamme de Méthane: Application pour les Paramètres Thermochimique

Mohammed El Hadi Attia^{1,*}, Zied Driss² et Abderrahmane Khechekhouché^{2,3}

¹Département de Physique, Faculté des Sciences exactes, Université HL, El Oued, Algérie

²Laboratoire des Systèmes Electromécaniques, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Université de Sfax, Tunisie

³Unité de développement des énergies renouvelables dans les zones arides (UDERZA), Université d'El Oued, Algérie

*attiameh@gmail.com

Résumé— Dans ce papier, nous présentons une étude numérique de la flamme de diffusion turbulente dans une chambre de combustion cylindrique confinée par deux jets coaxiaux (de méthane/hydrogène et d'air). Le but est d'améliorer le mélange réactif afin de réduire le monoxyde de carbone en tant qu'une espèce chimique polluante. Dans ce travail, les modèles couplés LES/PDF sont utilisés pour surmonter l'interaction turbulence/chimie dans les équations de transport des espèces chimiques. En considérant que la fraction massique du monoxyde de carbone, la fraction de mélange et la variable d'avancement sont sélectionnées pour valider les données à l'aide des résultats expérimentaux tirés de la littérature. En outre, les mêmes paramètres scalaires qui sont considérés dans la validation sont évalués à partir de différentes compositions du carburant de méthane et du pourcentage de l'hydrogène égales à 0, 20, 40, 60, 80 et 100%, pour l'alimentation de la chambre de combustion. En conséquence, l'addition de l'hydrogène réduit le monoxyde de carbone dans les produits de combustion et améliore la brûlure réactive causée par le mélange riche.

Mots clés— Combustion non prémélangée; Turbulence; Simulation des grandes échelles (LES); Fonction de densité de probabilité (PDF); Hydrogène; Dynamique des fluides numérique (CFD).

I. INTRODUCTION

L'enrichissement du combustible par l'hydrogène est utilisé comme technique pour diminuer les émissions de polluants (NOx et CO), d'accroître la vitesse de flamme et d'améliorer le rendement thermique. Où, le comportement de l'allumage du mélange méthane-hydrogène en fonction de la pression lorsque le méthane domine le mélange et les retards d'allumage diminuant avec l'augmentation pression. Mais, si le combustible d'hydrogène présente un maximum du mélange, un négligeable effet de la pression sur l'allumage du mélange méthane-hydrogène est relevé [1-3]. En outre, l'avantage de la modélisation de l'interaction turbulence/composition chimique du combustible d'enrichissement en hydrogène est illustré dans la combustibilité ultérieure, qui aide à favoriser la réaction chimique rapide augmentant ainsi la température et réduisant le débit de recirculation dans la zone de réaction. Par

la présente, l'aide de diagnostic qui fournit des informations sur la vitesse, le champ thermique et la combustion générée OH, NOx et la concentration de CO de l'espèce dans la flamme; où la limite de stabilité pauvre est prolongée par addition d'hydrogène. En outre, l'addition d'hydrogène décale la zone de réaction à des endroits en amont de la flamme pour augmenter la concentration des radicaux OH. De plus, l'augmentation de la température augmente par conséquent la vitesse de formation de NO dans la zone de réaction [2].

Dans ce travail, on utilise les modèles couplés LES/PDF pour décrire l'interaction turbulence/chimie dans la diffusion de la flamme; où, les calculs sont effectués par le code de calcul Fluent. La validation numérique des grandeurs primaires avec les données expérimentales [4] sont considérés pour différentes positions du brûleur. Par conséquent, la fraction massique du monoxyde de carbone (γ_{CO}), la fraction de mélange (Z) et la variable d'avancement (C) sont sélectionnés comme variables scalaires pour tester la fiabilité de l'approche de PDF dans la structure de la flamme. Par la présente, la fraction de mélange permet la mesure du degré du mélange du combustible et du comburant. Ce qui a permis de présenter les zones brûlées où, $Z=1$ dans l'écoulement de combustible pur et $Z=0$ dans l'écoulement d'oxydant pur. Le variable d'avancement est donné pour présenter les zones brûlées. Où, $C=1$ pour le gaz brûlé, mais $C=0$ pour le mélange frais. Dans une deuxième partie, les mêmes quantités sont utilisés pour examiner l'effet de l'injection d'hydrogène dans le jet central de méthane pour alimenter la combustion à des pourcentages différents de H_2 et CH_4 avec des mélanges égales à 0, 20, 40, 60, 80 et 100%.

II. EQUATIONS

Les équations de gouvernance filtrée dans LES pour la combustion turbulente peuvent être écrites en coordonnées cartésiennes [2-7].

L'équation de continuité s'écrit:



$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i) = 0 \quad (1)$$

Les équations de quantité de mouvements s'écrivent:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = - \frac{\partial}{\partial x_i} [\bar{\rho} (\overline{u_i u_j} - \tilde{u}_i \tilde{u}_j)] - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} \quad (2)$$

L'équation d'énergie s'écrit:

$$\frac{\partial}{\partial t} \bar{\rho} \tilde{h} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{h}) = - \frac{\partial}{\partial x_i} [\bar{\rho} (\overline{u_i h} - \tilde{u}_i \tilde{h})] + \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \overline{u_j \tau_{ij}} \quad (3)$$

L'équation d'espèce s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial t} \bar{\rho} \tilde{Y}_f + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Y}_f) = - \frac{\partial}{\partial x_i} [\bar{\rho} (\overline{u_i Y_f} - \tilde{u}_i \tilde{Y}_f)] + \bar{\omega}_f \quad (4)$$

Où: $i = 1, 2, 3$ et $j = 1, 2, 3$.

L'état thermodynamique s'écrit:

$$\bar{p} = \bar{\rho} R_m \bar{T} \quad (5)$$

Les tensions de Reynolds non résolues $(\overline{u_i u_j} - \tilde{u}_i \tilde{u}_j)$, nécessitent un modèle de turbulence à l'échelle des sous-mailles.

Les espèces non résolues flux $(\overline{u_i Y_f} - \tilde{u}_i \tilde{Y}_f)$ et les flux d'enthalpie $(\overline{u_i h} - \tilde{u}_i \tilde{h})$ nécessitent une approche fonction de densité de probabilité (PDF).

La vitesse de réaction chimique filtrée est notée $\bar{\omega}_f$.

III. DOMAINE DE CONTROLE ET CONDITIONS AUX LIMITES

La présente étude est axée sur l'enrichissement du méthane de la flamme par le carburant d'hydrogène. Le dispositif expérimental considéré pour la validation du modèle numérique est montré sur la figure 1. La chambre de combustion cylindrique de rayon $R_4=61.15$ mm et de longueur $L=1$ m est pressurisée à $p=3,8$ bars, et possède une paroi à une température constante $T=500$ K. Le brûleur est composée par deux jets coaxiaux, le premier centrale de rayon interne $R_1=31.57$ mm et de rayon externe $R_2=31.75$ mm, qui injecte le méthane et/ou hydrogène avec un débit massique d'admission $Q_1=7.2$ g/s et une température $T_1=300$ K. Le deuxième jet est annulaire de rayon interne $R_3=46.85$ mm. Il injecte l'air avec un débit massique d'entrée $Q_2=137$ g/s et préchauffé à une température $T_2=750$ K [2-7].

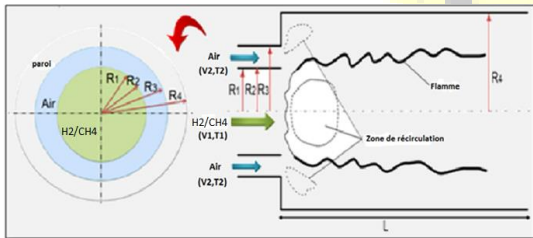


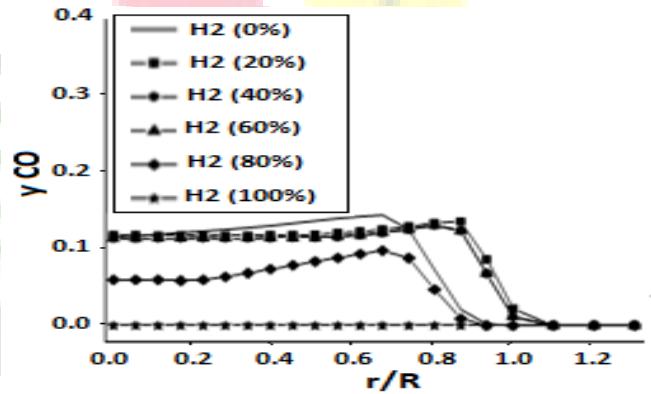
Fig. 1 Schéma représentatif du brûleur.

IV. RESULTANTS ET DISCUSSION

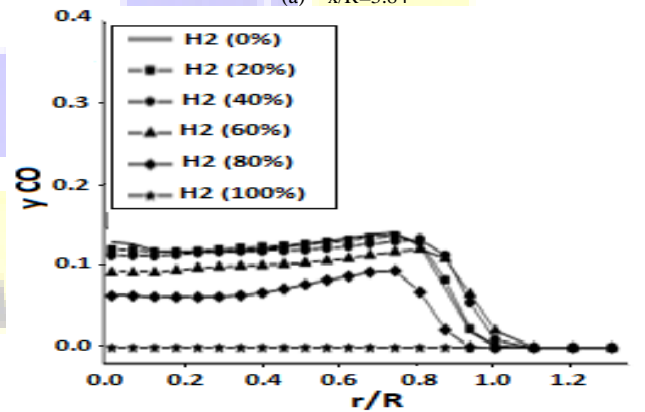
Ce modèle est déjà validé dans des travaux antérieurs [3,5,7].

A. Fraction massique du monoxyde de carbone (yCO)

Dans cette partie, nous avons choisi le monoxyde de carbone comme une espèce chimique des polluants pour réduire l'enrichissement de l'hydrogène. Le champ du monoxyde de carbone est présenté dans deux positions $x/R=3,84$ et $x/R=7,41$ comme le montre la figure 2. D'après ces résultats, les profils montrent la même tendance la fraction CO diminuent avec la distance radiale. Dans la position $x/R=7,41$, située loin de l'entrée du brûleur, la production du CO est considérable et il est à peu près la même dans la première position $x/R=3.84$. De ce fait, l'effet de l'injection d'hydrogène dans le méthane apparaît clairement dans la réduction du CO lorsqu'on augmente la composition de l'hydrogène pur. Toutefois, l'addition d'hydrogène a une relation inverse avec la production du monoxyde de carbone.



(a) $x/R=3.84$



(b) $x/R=7.41$

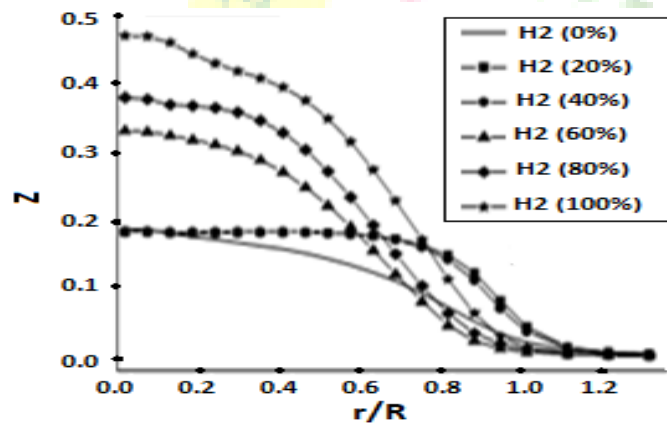
Fig. 2 Profils radiaux de la fraction massique moyenne du monoxyde de carbone considéré pour différentes injections de l'hydrogène dans le carburant.



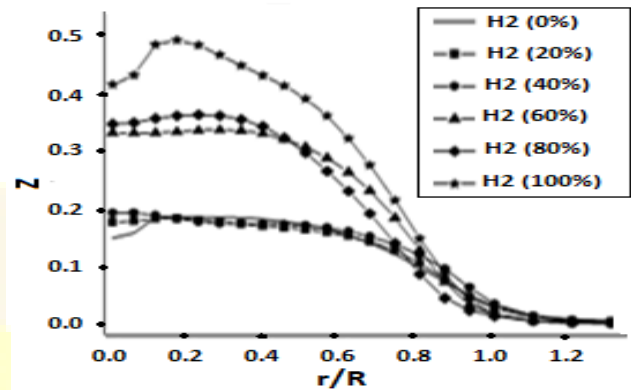
B. Fraction de mélange (Z)

Sur la figure 3, les variations radiales de la fraction moyenne de mélange à deux positions $x/R=3,84$ et $x/R=7,41$ sont présentés pour différents cas de l'addition d'hydrogène dans le combustible de méthane. Les profils dans ces positions ont la même tendance. En effet, les valeurs maximales situées dans le centre du brûleur diminuent avec la distance radiale. L'effet de l'injection d'hydrogène dans la flamme de méthane est clair comme c'est montré dans tous les profils. Dans ces conditions, la relation entre la fraction de mélange et l'addition d'hydrogène est proportionnelle. En outre, tous les cas sont considérés pour le même débit massique d'entrée, mais la densité de chaque cas n'est pas identique. Cependant, une légère masse d'hydrogène relativement au méthane entraîne la diminution de la masse du mélange réactif du carburant injecté par le jet central qui augmente la vitesse d'entrée. Par conséquent, il est clair que la vitesse de la flamme a un impact sur les produits dans le brûleur.

En outre, les profils du monoxyde de carbone montrent la même tendance avec les profils de fractions de mélange. Dans le centre de la chambre de combustion, les valeurs de fraction de mélange et du CO sont élevées et ils diminuent avec la distance radiale.



(a) $x/R=3.84$

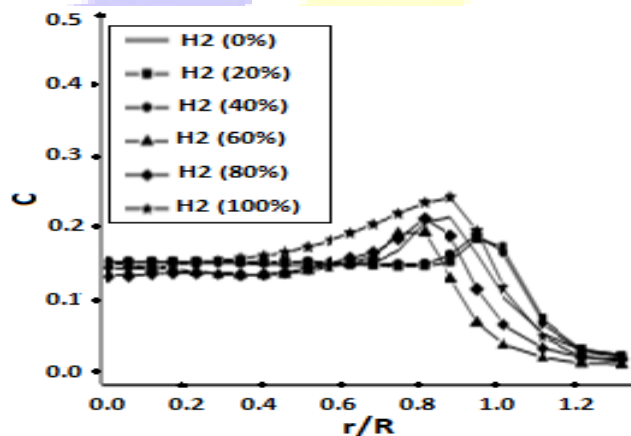


(b) $x/R=7.41$

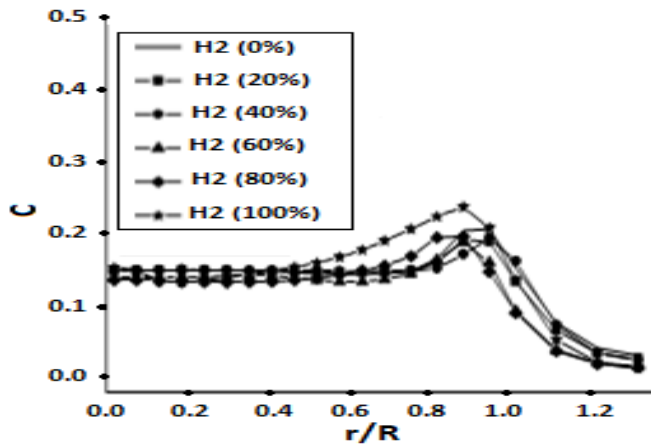
Fig. 3 Profils radiaux de la fraction moyenne du mélange considéré avec injection de l'hydrogène dans le carburant.

C. Variable d'avancement (C)

L'impact de l'injection d'hydrogène dans la variable d'avancement est présenté sur la figure 4, pour les mêmes positions considérées avec des pourcentages semblables à celles déjà utilisés comme précédemment pour la composition du carburant (CH_4 et H_2) et pour la fraction de mélange et le monoxyde de carbone. Les profils de la variable d'avancement ont même tendance pour tous les cas de l'ajout d'hydrogène. L'ajout du carburant d'hydrogène sur le mélange réactif donne une légère augmentation de la variable d'avancement. Dans les positions $x/R=3,84$ et $x/R=7,41$, la relation de proportionnalité entre l'injection de l'hydrogène et la variable d'avancement est montré. En effet, l'addition d'hydrogène améliore les particules de mélange réactif et augmente la vitesse de combustion dans le brûleur. Par conséquent les réactifs convertis produits par la combustion sont augmentées. Ce qui entraîne l'augmentation des gaz qui brûlent dans la chambre de combustion.



(a) $x/R=3.84$



(b) $x/R=7.41$

Fig. 4 Profils radiaux de la variable d'avancement moyenne du mélange considéré avec injection de l'hydrogène dans le carburant.

V. CONCLUSIONS

Le présent travail expose une étude numérique de la flamme de diffusion turbulente, de méthane et d'air, sur la base de l'injection d'hydrogène dans le jet central de méthane. Les différents cas de combustion considérés tiennent en compte de la composition du carburant, CH₄ et/ou H₂, fourni au brûleur. Par conséquent, les modèles couplés LES/PDF sont sélectionnés pour surmonter les problèmes dans les équations de transport spécialement l'interaction turbulence/chimie. Ainsi, on annonce les résultats importants obtenus dans ce travail :

- L'addition de l'hydrogène permet d'améliorer le mélange réactif.
- Le mélange riche réactif permet d'améliorer la combustion des réactifs brûlants.
- L'enrichissement de combustible de l'hydrogène réduit les émissions du CO dans les produits de combustion.

VI. NOMENCLATURE

R	constante des gaz parfaits, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
M	masse molaire, $kg.mole^{-1}$
r	rayon, m
t	temps, s
T	température, K
u	vitesse, $m.s^{-1}$
x	position, m
y	fraction de masse

$S\phi$ terme source

Symboles grecs

Φ	paramètre transporté
δ_{ij}	delta de Kronecker
μ	viscosité dynamique, $kg.m^{-1}.s^{-1}$
ν	viscosité cinématique, $m^2.s^{-1}$
ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$

Exposant, Indices

t turbulent

RECONNAISSANCE

Les auteurs remercient Laboratoire des systèmes électromécaniques (LASEM), ENIS, Université de Sfax, Tunisie.

Les auteurs remercient les organisateurs du 5^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables, Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa – Algérie.

REFERENCES

- [1] A. Mameri. "Etude numérique De la combustion turbulente du prémélange pauvre méthane/air enrichi à l'hydrogène," Ph.D. dissertation, Univ., Orléans, France 2009.
- [2] M.E.H. Attia, "Etude de l'Effet de l'Injection de H₂ sur une Flamme Non Prémélangée". Ph.D. Thesis, University of Tébessa, Algeria 2017.
- [3] F. Bouras, M.E.H. Attia, F. Khaldi and M. SI-AMEUR. "Control of the Methane Flame Behavior by the Hydrogen Fuel Addition: Application to Power Plant Combustion Chamber," *Int Journal of Hydrogen energy*, vol. 42, pp. 8932- 8939, 2017.
- [4] M.E.H. Attia, Z. Driss and A. Khechekhouche, Numerical Study of the Combustion of CH₄-C₃H₈/Air: Application to a Combustion Chamber with Two Coaxial Jets. *International Journal of Energetica (IJECA)*, vol. 2(2), pp. 38-42, 2017.
- [5] M.E.H. Attia, A. Khechekhouche and Z. Driss, Numerical Simulation of Methane-Hydrogen Combustion in the Air: Influence on Combustion Parameters. *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 11(2), pp. 1-8, 2018.
- [6] C.D. Pierce and P. Moin, "Progress-variable approach for large-eddy simulation of non-premixed turbulent combustion," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 504, pp. 73-97, 2004.
- [7] F. Bouras, M.E.H. Attia and F. Khaldi, Improvements of the Combustion Characteristics by the Hydrogen Enrichment, in: *Proceedings of the IEEE Xplore*, pp. 1-5, 2015.