

# Etude numérique de la combustion et des émissions de polluants de différents combustibles dans une chambre cylindrique

ADHAM Adam<sup>1</sup>, MABSATE El Mostafa<sup>2</sup>

Equipe de Recherche et de développement : Modélisation et Multimédia en Mécanique

Ecole Mohammedia d'Ingénieurs – EMI, Rabat, Maroc

Emails: 1-[aadham.adam@gmail.com](mailto:aadam.adam@gmail.com), 2-[mabsate@emi.ac.ma](mailto:mabsate@emi.ac.ma)

## Résumé

Le présent travail rentre dans le domaine de la production de l'énergie thermique et la protection de l'environnement. Il consiste à étudier numériquement la combustion en comparant la production de l'énergie thermique de plusieurs combustibles (gaz, liquide et solide) ainsi que leurs émissions de polluants en CO<sub>2</sub> et NO<sub>x</sub>. Les combustibles choisis sont : le méthane, le propane, le fuel-oil et le charbon. La combustion se déroulera dans une chambre de combustion cylindrique avec un excès d'air de 15% en générant une puissance de 30 kW. Les résultats montrent que la combustion des gaz (méthane et propane) dégage plus d'énergie à la sortie de la chambre de combustion mais aussi plus d'émissions de CO<sub>2</sub> et de NO<sub>x</sub>. Les émissions de CO<sub>2</sub> sont plus faibles pour le charbon que pour les autres combustibles mais la variation de la température à la première moitié de la chambre de combustion est plus importante.

**Mots clefs :** CFD, combustibles, émissions, NO<sub>x</sub>, température, chambre de combustion cylindrique.

## 1. Introduction

La combustion prend son importance dans plusieurs applications d'ingénierie et de recherche ; celle des hydrocarbures et des gaz est la plus connue des sources d'énergie. L'étude numérique de la combustion à travers la mécanique des fluides numérique (CFD : Computational Fluid Dynamics) permet de prédire le comportement d'un fluide en écoulement. La simulation numérique doit prédire les meilleures configurations à avoir en vue d'un fonctionnement optimal. Par exemple, une chambre de combustion doit être conçue de manière à assurer la propagation et la diffusion de la flamme après une durée déterminée, de manière uniforme à la température désirée, avec le minimum de combustible et d'émissions de polluants. Plusieurs études se sont récemment attardées sur la combustion turbulente en étudiant la combustion turbulente d'une flamme

d'hydrogène en 3D [1,2] avec un mécanisme réactionnel détaillé ou d'une flamme de méthane [3,4,5]

Dans cette étude on propose une autre contribution à l'étude comparative de la production de l'énergie thermique et les émissions polluantes lors de la combustion en utilisant quatre combustibles à savoir : le méthane, le propane, le fuel-oil et le charbon.

## 2. Modèle numérique

Le modèle mathématique décrivant les réactions de combustion se base sur les équations de continuité, de quantité de mouvement des espèces et d'énergie, en plus des équations de turbulence. Les simulations ont été réalisées avec le modèle k-ε RNG (Re-Normalisation Group) et le modèle Eddy dissipation pour la combustion. Les équations généralisées régissant la combustion dans le domaine sont :

L'équation de continuité (conservation de la masse) :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

Conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\text{Où } \tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} K_{ij} \quad (3)$$

Equation d'énergie

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + P)] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_{j^1} h_{j^1} J_{j^1} + u_j (\tau_{ij})_{eff} \right) + S_h \quad (4)$$

Où  $J_{j^1}$  est le flux de diffusion de l'espèce  $j^1$ ,  $S_h$  est le terme source,  $E = h - \frac{P}{\rho} + \frac{u_i^2}{2}$ ,  $h = \sum_{j^1} m_{j^1} h_{j^1}$

Avec  $h_{j^1} = \int_{T_{ref}}^T C_{p,j^1} dT$ ,  $\lambda_{eff}$  est la conductivité effective.

Pour le modèle k-ε RNG, deux autres équations pour l'énergie cinétique turbulente k et le taux de dissipation ε [6] :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k + \rho \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{2\epsilon}^* \rho \frac{\epsilon}{k} \quad (6)$$

$$\text{Avec } C_{2\epsilon}^* = C_{2\epsilon} + \frac{C_{\mu\eta^3} (1 - \frac{\eta}{\eta_0})}{1 + \beta \eta^3}$$

$\mu_t$  est la viscosité des tourbillons,  $\beta$ ,  $\eta$ ,  $\sigma_k$ ,  $\eta_0$ ,  $\sigma_\varepsilon$ ,  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  et  $C_\mu$  sont des constantes du modèle,  $P_k$  est la production d'énergie cinétique de turbulence.

La masse volumique du fluide est calculée selon l'équation d'état des gaz parfaits. Les propriétés telles que viscosité, chaleur spécifique, masse volumique et conductivité thermique du mélange sont calculées à partir des paramètres des espèces selon le mélange de gaz parfaits comme suit :

$$\rho = (P + P_{op})/RT \sum_{i^1} \frac{m_{i^1}}{M_{i^1}} \quad (7)$$

$$C_p = \sum_{i^1} m_{i^1} C_{p,i^1} \quad (8)$$

$$\lambda = \sum_{i^1} [X_{i^1} \lambda_{i^1}] / \left( \sum_{j^1} X_{j^1} \varphi_{i^1,j^1} \right) \quad (9)$$

$$\mu = \sum_{i^1} [X_{i^1} \mu_{i^1}] / \left( \sum_{i^1} X_{i^1} \varphi_{i^1,j^1} \right) \quad (10)$$

$$\text{Avec } \varphi_{i^1,j^1} = \frac{\left[ 1 + \left( \mu_{i^1} / \mu_{j^1} \right)^{1/2} \left( M_{j^1} / M_{i^1} \right)^{1/2} \right]^2}{\left[ 8 \left( 1 + M_{i^1} / M_{j^1} \right) \right]^{1/2}}$$

## 2.1 Géométrie de la chambre de combustion

On considère dans cette étude la géométrie étudiée par *Yapici et al* [7] (figure 1). Leur travail analyse l'effet du pourcentage d'oxygène dans la production d'entropie pour la combustion de méthane et l'air dans une chambre de combustion. Les dimensions dans la chambre de combustion sont :  $r_f = 0.004$  m,  $r_i = 0.006$  m,  $r_o = 0.01$  m,  $R = 0.05$  m,  $L = 0.5$  m

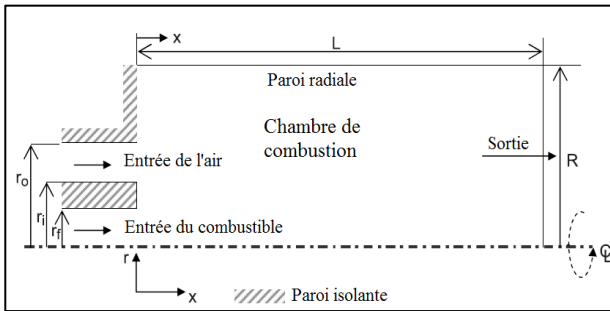


Figure 1 : domaine d'étude

## 2.2 Conditions limites :

À l'entrée du combustible ( $x = 0$  and  $0 < r < r_f$ ), on a  $\dot{m} = \dot{m}_f$  et  $T = T_{amb} = 300$ K

À l'entrée de l'air ( $x = 0$  and  $r_i < r < r_o$ ),

on a  $\dot{m} = \dot{m}_{air}$  et  $T = T_{amb}$

Aux parois entre les deux réactifs ( $x = 0$ ,  $r_f < r < r_i$  et  $r_o < r < R$ ),  $\partial T / \partial x = 0$

Au niveau de la paroi ( $r = R$ , et  $0 < x \leq L$ ),  $u_r = 0$ ,

On suppose une convection naturelle, i.e.,

$q''_w(x) = -h_{amb} [T(x, R) - T_{amb}]$ , ( $h_{amb} = 10$ W/Km<sup>2</sup>).

Puisque le problème posé est symétrique par rapport à l'axe de la chambre de combustion, la variation de toutes les grandeurs  $\psi$  par rapport au rayon est nulle  $\partial \psi / \partial r = 0$ .

À la sortie de la chambre,  $\partial u / \partial x = 0$ , toutes les vitesses sont nulles sauf la vitesse axiale.

L'étude est réalisée avec le code CFD Ansys fluent pour la résolution des équations de transport. Ces équations sont non linéaires, couplées et résolues de manière séquentielle, par conséquent plusieurs itérations de la boucle de résolution sont nécessaires pour obtenir la convergence de la solution. Les critères de convergences considérés sont ceux existants par défaut sur fluent. L'indépendance de la solution par rapport au maillage est obtenue pour un maillage de 15000 éléments (12500 pour  $0 < x < 0.25$ m et 2500 pour  $0.25 < x < 0.5$ m).

## 2.3 Validation du modèle

Le modèle utilisé par [7] dans le cas d'un mélange stœchiométrique avec différents pourcentages d'oxygène est donné pour la répartition axiale de la température est donné dans la figure 2. On constate que nos résultats numériques obtenus sont très proches des résultats obtenus par [7], ce qui nous permet de conclure que notre démarche de résolution est bonne et validée.

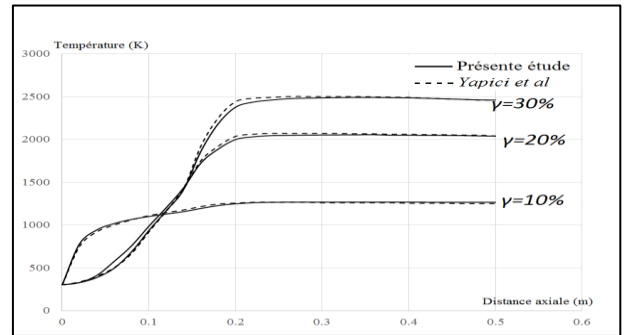


Figure 2 : comparaison avec le modèle de référence pour différents pourcentages d'oxygène  $\gamma$

## 3. Résultats et discussions

### 3.1. Température axiale

Comme le montre la figure 3, la température axiale pour le charbon atteint rapidement sa valeur maximale (2241K) puis décroît jusqu'à 632K à la sortie. Pour le méthane et propane, la température augmente progressivement jusqu'à atteindre 2322K pour le propane et 2235 pour le méthane. La température à la sortie baisse légèrement. Pour le fuel-oil, La température atteint 1105K et reste inférieure à celles du méthane et propane. Ceci est dû à la valeur élevée des pouvoirs calorifiques des combustibles gazeux.

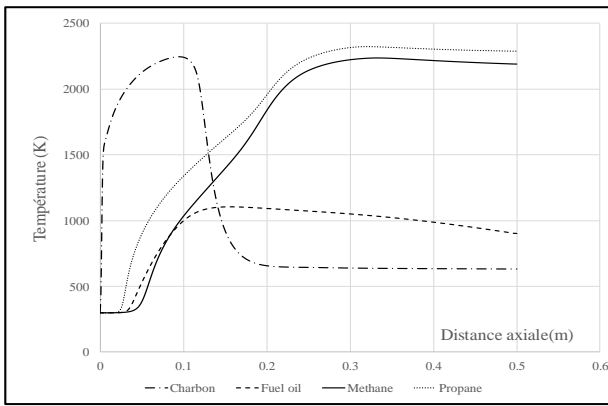


Figure 3 : Distribution des températures axiales pour les différents combustibles

### 3.2. Emissions de CO<sub>2</sub>

La figure 4 montre la distribution des fractions massique de CO<sub>2</sub> pour chaque combustible. L'émission du dioxyde de carbone augmente jusqu'à arrêt des réactions et se stabilisent pour le méthane et propane. De même que pour la température, la fraction massique de CO<sub>2</sub> pour le cas du charbon est la plus faible à la sortie de la chambre.

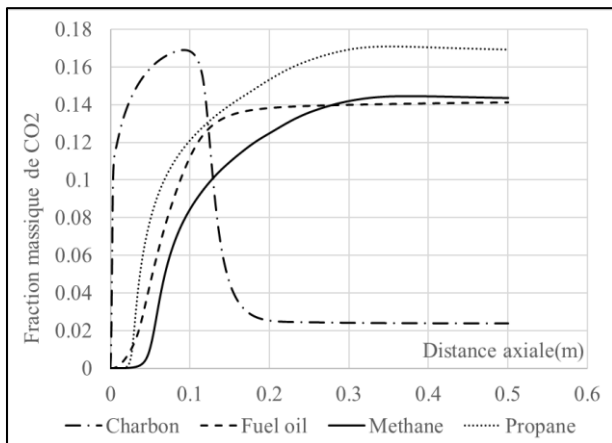


Figure 4 : Distribution des fractions massiques de CO<sub>2</sub> pour les différents combustibles

### 3.3. Emissions de NO<sub>x</sub>

La figure 5 montre les fractions massiques des émissions des NO<sub>x</sub>. L'émission des oxydes de nitrogène étant directement liée à l'augmentation de la température, il est attendu que le méthane et propane donne le plus d'émissions de NO<sub>x</sub> vue les températures générées. La combustion du fuel-oil génère le moins de NO<sub>x</sub> due à la température n'excédant pas 1105K.

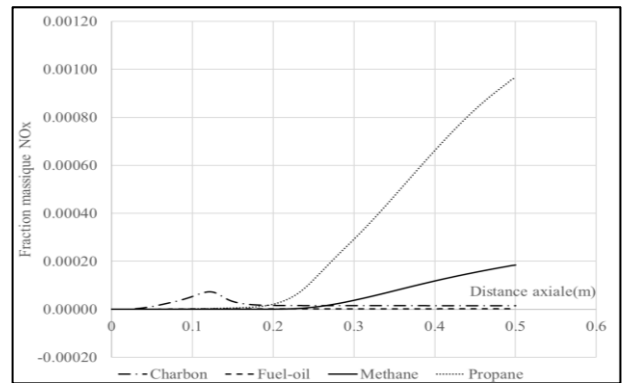


Figure 5 : Distribution des fractions massiques de NO<sub>x</sub> pour les différents combustibles

### Conclusion :

Cette étude numérique nous a permis de faire une comparaison de différents combustibles en termes de production d'énergie suivant la distribution de température axiale et des émissions de CO<sub>2</sub> et NO<sub>x</sub>. On a vu que la combustion des combustibles gazeux (méthane et propane) dégageait plus d'énergie à la sortie de la chambre de combustion mais aussi plus d'émissions de CO<sub>2</sub> et de NO<sub>x</sub> vu la température. La combustion dans le cas du charbon étudié donne les plus basses valeurs, quoique la température au début de la chambre de combustion ( $0 < x < 0,2m$ ) augmente plus rapidement que dans le reste de la chambre, ce qui implique un dimensionnement particulier et un matériau approprié pour cette région.

### Références

- [1] Tanahasi, M., Fujimura, M., and Miyauchi, T., 2000, "Coherent fine-scale eddies in turbulent premixed flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, 28(1), pp. 529-535.
- [2] Tanahasi, M., Nada, Y., Ito, Y., and Miyauchi, T., 2002, "Numerical simulation of premixed turbulent methane combustion," *Proceedings of the Combustion Institute*, 29(2), pp. 1987-1993.
- [3] Bell J. B., Day M. S., and Grcar J. F., 2002, "Numerical simulation of premixed turbulent methane combustion," *Proceedings of the Combustion Institute*, 29(2), pp. 1987-1993.
- [4] Thevenin D., Gicquel O., Charentenay J., Hilbert, R., and Veynante, D, 2002, "Two-versus three-dimensional direct simulations of turbulent methane flame kernels using realistic chemistry," *Proceedings of the Combustion Institute*, 29(2), pp. 2031-2039.
- [5] Jenkins K. W., and Cant R. S., 2002, "Curvature effects on flame kernels in a turbulent environment," *Proceedings of the Combustion Institute*, 29(2), pp. 2023-2029.
- [6] Ansys fluent theory guide. ANSYS, Inc. release 16.1 Southpointe, April 2015.
- [7] Huseyin Yapici, Gamze Basturk, esrin Kayatas and Bilge Albayrak, Numerical study of effect of oxygen fraction on local entropy generation in a methane-air burner, *Sadhana*, Vol. 29, Part 6, December 2004, pp. 641-667.