



Etude Numérique de la Production du CO₂ dans un Foyer d'une Chaudière à Biomasse

B. Khelidj¹, F. Bouzeffour², A. Kellaci³, R. Mazouzi⁴

Laboratoire FIMA, Université de Khemis Miliana,

¹b.khelidj@orange.fr

²boufateh_12@hotmail.fr

³akellaci@yahoo.fr

⁴mazouzi_r@yahoo.fr

Résumé — Une des raisons de la pollution de notre environnement, est la mauvaise utilisation des sources d'énergie primaire. L'intérêt du développement de nouvelles technologies additionné à l'utilisation des sources d'énergie renouvelables pour lutter contre la pollution est donc fondamental. L'utilisation de la biomasse, qui est une énergie renouvelable, comme combustible dans des configurations nouvelles, peut répondre à ces préoccupations. Afin d'apporter notre contribution à l'amélioration de la qualité de la combustion, nous nous sommes intéressés à une chaudière de petite puissance qui a été conçue pour fonctionner avec des combustibles pas, ou très peu, polluants comme la biomasse. Le travail que nous présentons dans cette étude est relatif à la simulation numérique de la production du CO₂ dans le foyer de la chaudière à biomasse. Les résultats de simulation ont été confrontés avec ceux de l'expérience.

Mots clés — biomasse, combustion, turbulente, polluants, simulation numérique.

I. INTRODUCTION

Le développement durable des énergies renouvelables ainsi que la protection durable de l'environnement passent formellement par la conception de nouvelles configurations. C'est dans cet optique que nous avons conçu une chaudière de petite puissance, qui s'adapte à des combustibles pas, ou très peu, polluants comme le gaz naturel ou la biomasse. Schématiquement notre appareil est constitué de deux parties complémentaires mais qui font dans un premier temps l'objet d'étude séparée. La première partie est formée d'une chambre de combustion cylindrique où sont brûlés les gaz combustibles. La deuxième est formée d'un magasin de stockage et des moyens de transformation et d'acheminement du combustible vers la chambre de combustion. Pour le gaz naturel il s'agit d'un brûleur à gaz alors que pour la biomasse c'est le magasin qui fonctionne comme un pyrolyseur et qui fournit des gaz de pyrolyse. Dans les deux cas nous brûlons des

gaz combustibles, plus ou moins riche en méthane, dans la chambre de combustion. Dans ce qui suit nous exposons la modélisation mathématique d'un écoulement réactif et la modélisation de la combustion turbulente puis nous présentons les résultats relatifs à l'évolution du dioxyde de carbone dans la chambre de combustion qui est formée d'un tube en béton réfractaire et où la flamme se développe.

II. LE MODÈLE GÉOMÉTRIQUE

Le travail que nous présentons ici est limité à la simulation de la combustion des matières volatiles, issues de la décomposition thermique de la biomasse, dans un foyer [1]. Par conséquent l'élément essentiel, de notre appareil, qui nous intéresse dans cette étude est le tube thermo- catalyseur (8) qui forme le foyer et qui est représenté sur la figure (Fig.1).

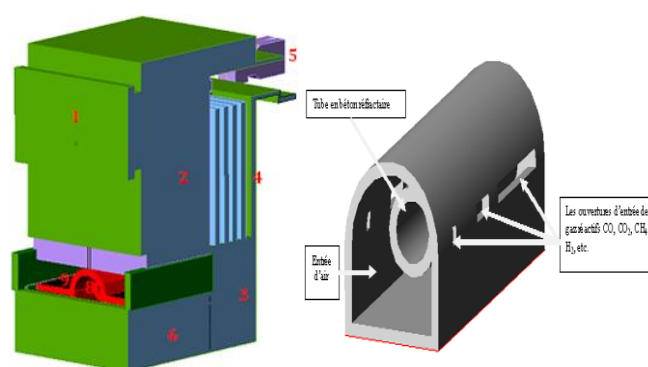


Fig.1 Schéma du tube réfractaire (foyer)

Notre chaudière à bois [1] comporte un magasin de stockage de bois (2), un tube thermo- catalyseur (8) qui assure la combustion des gaz de pyrolyse du bois, un turbo extracteur (5) qui assure le tirage forcé des fumées ainsi qu'un échangeur de chaleur (4). On trouve aussi une porte de chargement (1), une chambre de combustion (3), un cendrier (6) et une demi-grille (9).



III. FORMULATION MATHÉMATIQUE

La modélisation mathématique de l'écoulement réactif des gaz est basée sur un ensemble d'équations différentielles traduisant la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie, le transport et les réactions des espèces chimiques et sur l'équation d'état du système.

A. Equation de conservation de la masse [2]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0$$

B. Équations de la quantité de mouvement [2]:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{(\partial x_j)} \left(-\rho u_i' u_j' \right) + F_i$$

C. Equation de conservation de l'énergie: elle est donnée sous la forme [3]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho E + \frac{\partial}{\partial x_j} u_j (\rho E + p) = \frac{\frac{\partial}{(\partial x_i)} \left(\lambda + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \partial T}{\partial x_j} + u_i \tau_{ij \text{ eff}}$$

D. Équations des espèces chimiques à la forme suivante [3]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho Y_i + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j Y_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t}) (\partial Y_i)}{\partial x_i} \right) + R_i$$

E. Equation d'état:

Le milieu fluide est défini comme un mélange (mixture) réactif dont les propriétés globales sont définies de la manière suivante:

$$\rho = \frac{p}{RT \sum_i^n \frac{Y_i}{M_i}}$$

F. Modélisation de la turbulence

Les relations du modèle k-ε développées initialement par Launder et Spalding [4], [5] comportent cinq constants, dont les valeurs ont été déterminées afin de valider le modèle pour un certain nombre de configuration expérimentale définies.

1) Modèle k-ε Standard

Pour calculer la viscosité tourbillonnaire μ_t, le modèle k-ε Standard emploie la relation de Prandtl-Kolmogorov pourrelire, μ_t à k et à ε.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho k + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + [C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k(G)_k} + C_{3\varepsilon} G_b] - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon$$

2) Le modèle k-ε RNG

Ce modèle a été obtenu a partir d'une technique mathématique appelée groupe de ré-normalisation [4].

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho k + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + [C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k(G)_k} + C_{3\varepsilon} G_b]$$

3) Le modèle k-ε réalisable

Le transport de l'énergie cinétique turbulente (k) et le taux de dissipation de l'énergie cinétique (ε) sont calculés avec les deux équations de transport, mais, à la différence du modèle Standard, C_μ n'est pas constante.

IV. RÉSULTATS

Les résultats obtenus à partir de la simulation numérique de la combustion des gaz combustibles, issus de la pyrolyse de la biomasse dans notre foyer sont présentés et discutés. Ces résultats sont relatifs entre autre à la distribution des produits de combustion dans le foyer. Ils ont été comparés aux résultats expérimentaux obtenus sur le foyer [6].

Sur la figure 2 nous présentons l'évolution de la teneur de CO₂ exprimée en pourcentage en fonction du temps. Cette évolution est obtenue pour des conditions de fonctionnement choisies préalablement. La teneur de CO₂ varie dans le temps



autour d'une valeur moyenne qui est déterminée pour chaque essai. Cette valeur moyenne varie à son tour en fonction des conditions de fonctionnement de l'appareil.

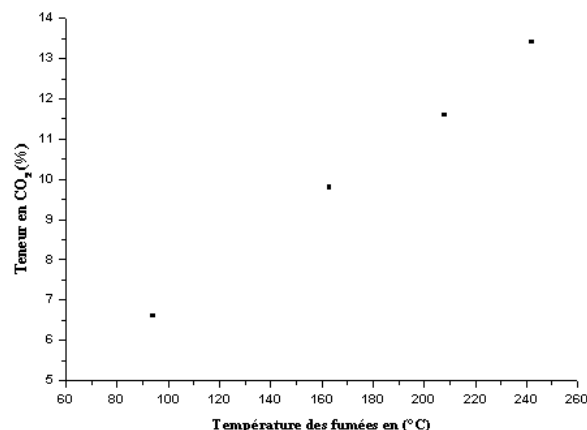


Fig.3 Teneur de CO₂ en fonction de la température des fumées

	Température Observée (°C)		CO ₂ en (%)
	à l'entrée du foyer	à la sortie du foyer	
Modèle « k-ε » Standard	1564	1220	15.4
Modèle « k-ε » réalisable	1250	1230	17.0
Modèle « k-ε » RNG	1290	1240	13.4
Expérience	1150	950	11.0

Le tableau (1) ci-dessous résume la comparaison des résultats expérimentaux et de simulation de la teneur de CO₂ et de la température dans une section à l'entrée et à la sortie du foyer. Trois variantes du modèle de turbulence ont été testés et il apparaît que le modèle « k-ε » RNG donne des résultats qui se rapprochent le plus de la réalité. La différence peut s'expliquer par le fait que les résultats de simulation ont été obtenus en faisant plusieurs hypothèses simplificatrices. Nous pouvons constater que l'ordre de grandeur entre les résultats expérimentaux et les résultats de simulations est bien respecté.

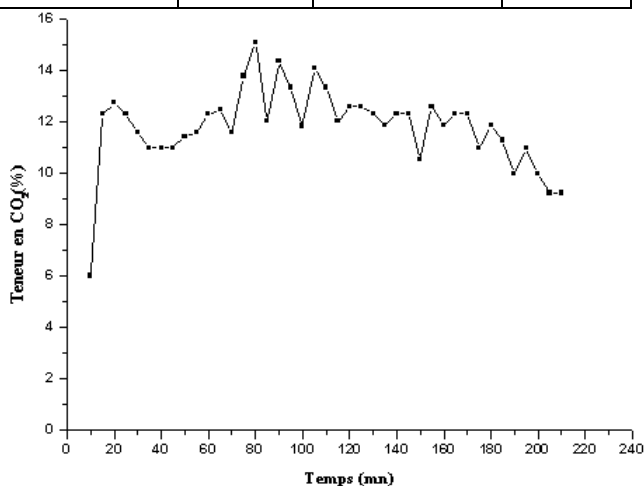


Fig.2 Teneur de CO₂ en fonction du temps

TABLEAU 1

Comparaison des résultats expérimentaux et de simulation

Pour illustrer cette variation avec les conditions expérimentales, nous présentons sur la figure 3 la valeur moyenne de la teneur de CO₂ en fonction de la température des fumées. Nous constatons que la valeur moyenne de la teneur de CO₂ augmente lorsque la température des fumées augmente c'est à dire lorsque le tirage des fumées augmente.

1) *Modèle de turbulence «k-ε» de type standard*

La figure (Fig. 5), montre le champ de l'espèce chimique du dioxyde de carbone dans le foyer. Sa fraction massique maximale est d'environ 0,154. Dans le foyer, plus on s'éloigne de l'entrée du tube et plus la fraction du dioxyde de carbone augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale dans la zone de haute température voir figure (Fig. 4).

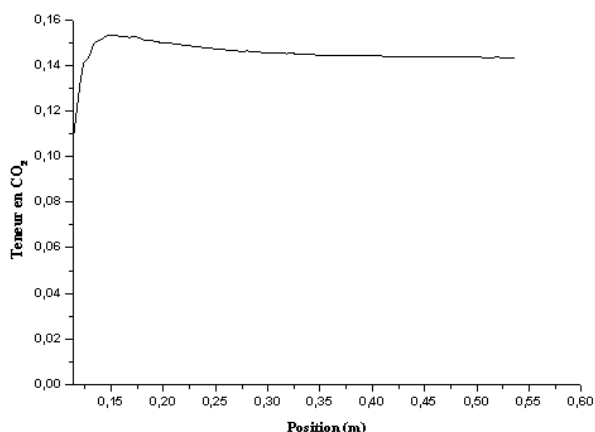


Fig.4 Evolution de la fraction massique du CO₂ dans le foyer
« Cas standard »

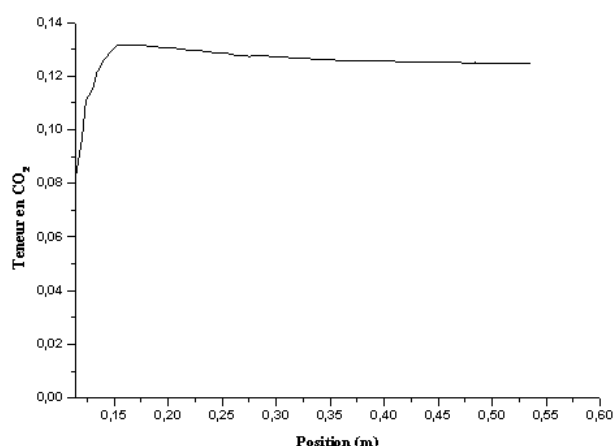


Fig.5 Evolution de la fraction massique du CO₂ dans le foyer « Cas RNG »

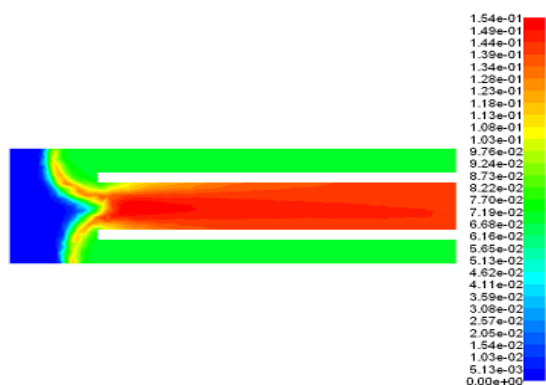


Fig.5 Champ de l'espèce chimique du dioxyde de carbone dans le foyer « Cas standard ».

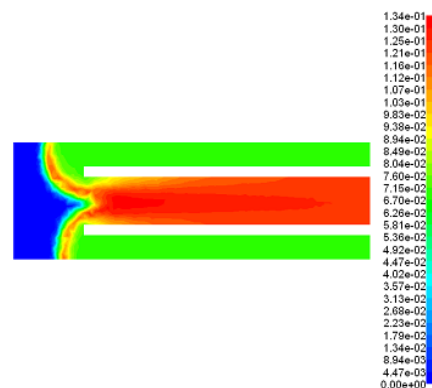


Fig.6 Champ de l'espèce chimique du dioxyde de carbone dans le foyer « Cas RNG »

2) Modèle de turbulence « $k-\epsilon$ » de type RNG

La figure (Fig. 6), montre le champ de l'espèce chimique du dioxyde de carbone dans le foyer. Sa fraction massique maximale est d'environ 0,134. Dans le foyer, plus on s'éloigne de l'entrée du tube et plus la fraction du dioxyde de carbone augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale dans la zone de haute température voir figure (Fig. 5).

3) Modèle de turbulence « $k-\epsilon$ » de type réalisable

La figure (Fig. 8), montre le champ de l'espèce chimique dioxyde de carbone dans le foyer. Sa fraction massique maximale atteinte est de l'ordre de 0,17. Dans le foyer, plus on s'éloigne de l'entrée du tube et plus la fraction du dioxyde de carbone augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale dans la zone de haute température comme le montre la figure (Fig. 7).

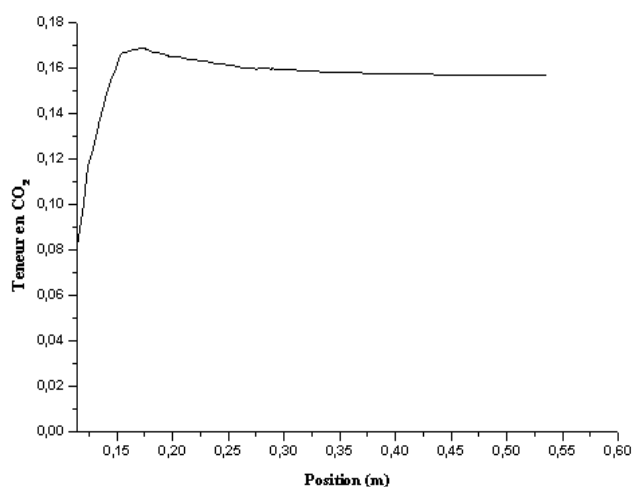


Fig.7 Evolution de la fraction massique du CO₂ dans le foyer « Cas réalisable »

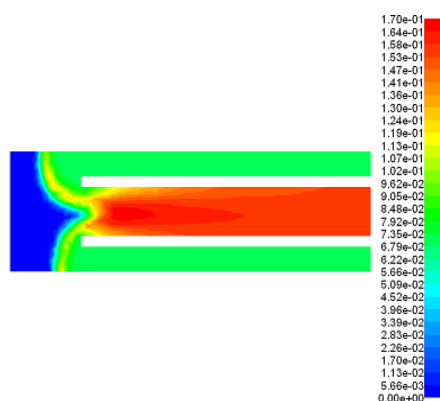


Fig.8 Champ de l'espèce chimique du dioxyde de carbone dans le foyer « Cas réalisable »

CONCLUSION

Ce travail nous a permis de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu dans un foyer à combustion inversée. Il constitue une contribution aux recherches consacrées à l'optimisation de la combustion de la biomasse dans les foyers de chaudières.

Les résultats de simulations obtenus sous forme de cartographies, nous ont permis de voir la distribution, dans le foyer, des différentes grandeurs calculées. Ces résultats sont relatifs entre autre aux températures, et aux produits de combustion dans le foyer de la chaudière.

REFERENCE

- [1] B. Khelidj, F. Bouzeffour, A. Kellaci, M. Lounis, R. Mazouzi. "Simulation de la Combustion des Gaz de Pyrolyse de la Biomasse dans un foyer à Combustion Inversée". JITH, 2011.
- [2] H. K. Versteeg, W. Malalasekera, "An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method". London: Longman group Ltd, 1995.
- [3] Fluent Inc. Fluent 6.3 Users Guide, 2006.
- [4] B. E. Launder and D.B. Spalding, "Lectures in Mathematical Models of Turbulence ". London, UK, 1972.

- [5] B. E. Launder and D.B. Spalding, "The numerical computation of turbulent flows ". Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 3, pp. 269-289, 1974.
- [6] B. Khelidj "Foyer à combustion inversée". Rapport interne, GRPCP Poitiers, (1986).