

Étude de l'effet de la variation de la longueur de la chambre de combustion sur la structure de l'écoulement

Yoldoss CHOUARI^{1*}, Wassim KRIAA¹, Philippe BOURNOT², Hatem MHIRI¹

¹ Ecole nationale d'ingénieurs de Monastir, route de Ouardanine, 5000 Monastir, Tunisie

² IUSTI, UMR.CNRS 6595, Technopôle Château-Gombert, 5 Rue Enrico Fermi 13013 Marseille Cedex 20, France.

*yoldoss.chouari@yahoo.fr

Résumé : En dépit des progrès technologiques, la construction de la chambre de combustion d'un séchoir à tunnel reste jusqu'à nos jours basée sur l'expérience pratique des hommes de métier. Afin de retrouver le meilleur scénario qui nous permet de mieux profiter de l'énergie de combustion et de récupération et de minimiser les risques de détérioration des dispositifs employés, on a réalisé une étude numérique sur la chambre de combustion du séchoir à tunnel de la société céramique du centre (CERAC).

La résolution numérique du problème est réalisée à l'aide du code commercial FLUENT, en utilisant les modèles de turbulence k- ϵ standard, de combustion 'Eddy Dissipation'(ED) et de transfert radiatif 'Discret Transfer Radiation Model' (DTRM).

On examine l'effet de la variation de la longueur de la chambre de combustion sur la structure dynamique et thermique de l'écoulement.

Mots clés :

Chambre de combustion, récupération, brûleur

1. Introduction

En s'intégrant dans une ligne de production complexe, les chambres de combustion sont utilisées dans un très grand nombre d'activités industrielles.

Les préoccupations énergétiques des dernières années et la nécessité industrielle constante d'affiner les relations entre moindre coût, efficacité maximale et qualité du produit, ont poussé le développement de la recherche dans ce domaine.

La plupart des auteurs comme (Perthuis (1989)[1] et Ladislav et al (2002)[2]), ont essayé d'optimiser le fonctionnement des brûleurs industriels afin d'augmenter leurs rendements et diminuer leurs émissions alors que les travaux sur le dimensionnement de la chambre de combustion sont presque absents. Face à la complexité du problème et des configurations industrielles, l'utilisation de la CFD (computational Fluid Dynamic) devient imminente pour répondre aux questions posées. En effet, Anouar Souid et al (2007)[3] ont effectué des simulations numériques sur un modèle d'un brûleur industriel. Ils ont étudié l'effet des ventelles sur la stabilité de la flamme dans la chambre de combustion. En plus, K .Bashirnezhad et M. Joleini (2010)[4] se sont intéressés à l'influence de la dimension d'un four sur l'émission des polluants. Ils ont remarqué que la réduction des dimensions de la chambre de combustion d'un four permet de réduire les émissions des polluants NO_x et CO. Or, en dépit des progrès technologiques, la construction de la chambre de combustion d'un séchoir à tunnel reste jusqu'à nos jours basée sur l'expérience pratique des hommes de métier.

Dans ce travail, on se propose de conduire des simulations numériques sur la chambre de combustion du séchoir à tunnel de CERAC pour examiner l'effet de la longueur de la chambre sur les caractéristiques de l'écoulement dans le foyer de combustion.

2. Description de la chambre de combustion

La chambre de combustion étudiée a pour rôle de fournir la quantité de chaleur nécessaire pour ramener la température de l'air de dilution et de l'air récupéré du four à 120°C. Cette température permet d'assurer un bon fonctionnement du séchoir à tunnel de la société CERAC (céramique du centre). La chambre de combustion est constituée de deux parties comme montre la Figure1 : (a): la chambre -1- d'une longueur de 5m assurant l'entrée d'air de dilution à travers deux registres qui sont des fentes de largeur 0.45m et deux grilles de largeur

0.85m. Cette première chambre comprend un brûleur de type veine d'air de puissance maximale de 4500kw de longueur 2,13m et de largeur 1m. Au milieu de la chambre -2- se trouve le casse flamme qui est un mur triangulaire placé devant les deux ventilateurs de soufflage de diamètres 1,6m. Sur le plan médian de la chambre de combustion, le brûleur se présente sous forme de quatre injecteurs constitués chacun d'un trou d'injection de gaz de combustion de diamètre 1.8mm et de deux volets déflecteurs qui comportent des trous d'injection de d'air de combustion de différents diamètres «1,5 mm, 1,7 mm, 2,7 mm, 4 mm, 5mm, et 8 mm » (figure1 : (c)).

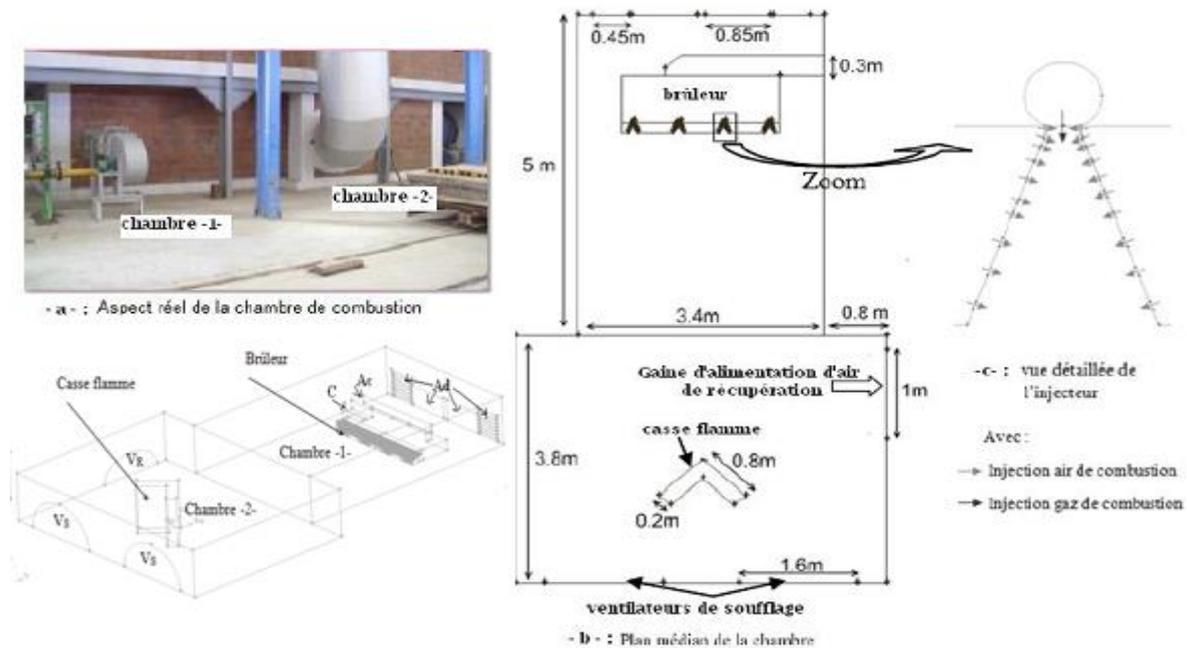


Figure 1 : Configuration de la chambre de combustion étudiée.

Afin d'avoir une idée claire sur l'influence de la longueur de la chambre de combustion sur l'écoulement, on a décidé d'étudier les caractéristiques dynamiques et thermiques de l'écoulement dans le plan médian de la chambre représenté sur la figure 1 : (b).

3. Etude numérique

3.1. Hypothèses

Pour simuler numériquement l'écoulement bidimensionnel dans la chambre de combustion, on a considéré les hypothèses simplificatrices suivantes [5]:

- L'écoulement est stationnaire et turbulent.
- Le fluide est incompressible à masse volumique variable.
- Les constituants du milieu réactif obéissent à la loi des gaz parfaits.

3.2. Maillage et Conditions aux limites

La construction et la génération du maillage de la configuration étudiée ont été effectuées à l'aide de « Gambit 2.3.16 ». Afin d'obtenir une description précise de toutes les variations, en particulier près du nez du brûleur, on a adopté un maillage triangulaire qui permet de raffiner à loisir dans les zones d'intérêt. Afin d'étudier la sensibilité des résultats de la simulation au degré de raffinement du maillage, on a effectué une étude comparative de trois maillages avec un nombre total de cellules respectivement : 175052 ; 230700 et 305250.

Aucune différence significative n'a été mise en évidence entre les résultats des simulations effectuées avec le maillage 2 (230700 cellules) et le maillage 3 (305250 cellules). Ce qui a permis de choisir le maillage le moins dense qui permet de minimiser le temps de calcul.

Les conditions opératoires adoptées sont mentionnées sur la figure 2 et leurs valeurs sont données dans le tableau 1.

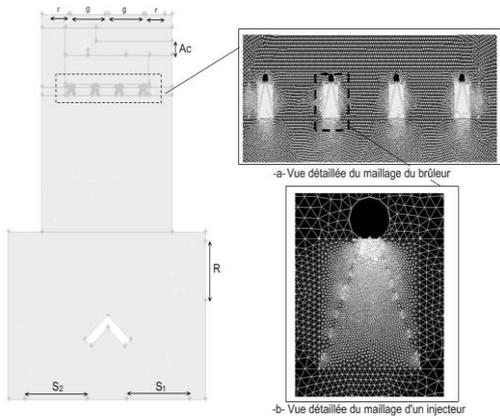


Figure 2 : Maillage et Conditions aux limites de la configuration étudiée.

Tableau 1 : Conditions aux limites imposées

Domaines	Conditions aux limites
Entrée air de dilution (r+g)	Velocity inlet: 15m/s Fraction massique de O_2 : $V_{f,O_2}=0,23$
Entrée air de combustion (Ac)	Velocity inlet: 15,33m/s $V_{f,O_2}=0,23$
Entrée gaz de combustion (C)	Velocity inlet: 58,14m/s Fraction massique de CH_4 : $V_{f,CH_4}=1$
Sortie de la chambre de combustion (S1,S2)	outflow

3.3 Modélisation physique

La simulation numérique est effectuée à l'aide du code industriel « FLUENT » qui utilise une méthode numérique aux volumes finis couplée à un schéma de résolution multigrille. Les équations régissant ce problème sont obtenues en utilisant la décomposition de Favre qui engendre de nouveaux termes 'un système ouvert' et une perte d'informations. Afin de pouvoir résoudre ce système, il convient de choisir les schémas de fermeture qui réintroduisent les informations perdues dans un nouveau système fermé. Afin d'obtenir un nombre d'équations égal au nombre de paramètres inconnus, on a opté pour l'utilisation des modèles de turbulence k- ϵ standard et de transfert radiatif « Discret Transfer Radiation Model » (DTRM) puisqu'il assure une bonne stabilité de calcul pour la configuration étudiée.

Le couplage entre la turbulence de l'écoulement et la réactivité du système, imposé par les réactions de combustion, est traité par le Modèle « Eddy Dissipation » (ED). Puisque, suite à une comparaison des résultats obtenue par les deux modèle ED qui suppose que la chimie est très rapide par rapport à la turbulence, et EDC qui est basé sur la cinétique chimique détaillée d'Arrhenius[5], on remarque que la flamme présente une allure similaire pour ces deux cas.

Les différentes espèces chimiques prises en compte pour les calculs d'équilibre sont : CH_4 , CO_2 , H_2O , et O_2 .

La réaction chimique stœchiométrique (théorique) utilisée est la suivante :



On note que pour tout les cas étudiés, le brûleur veine d'air fonctionne avec un excès d'air de 7.23%.

Les équations différentielles sont discrétisées à l'aide d'un schéma implicite afin d'obtenir un système d'équations algébriques. Les termes de convection sont interpolés à partir des valeurs au centre sur chaque face du volume de contrôle suivant un schéma « Upwind » de premier ordre. Le couplage vitesse-pression est basé sur l'algorithme SIMPLE.

Le critère d'arrêt des calculs est basé sur la somme des résidus normalisés sur l'ensemble des points du domaine de calcul. La précision choisie est de l'ordre de 10^{-4} pour les différentes grandeurs, sauf pour l'équation d'énergie qui est de 10^{-6} .

4. Résultats et discussions

On s'intéresse à l'effet de la longueur de la chambre de combustion sur les grandeurs dynamique et thermique de l'écoulement réactif. Afin de déterminer la longueur minimale qui assure un bon fonctionnement de la chambre, on propose d'étudier les quatre cas suivants $L = 5,50m$; $5,00m$; $4,25m$ et $3,50m$ pour les cas nommés plus loin dans ce texte A, B, C, et D, respectivement.

On a choisit un fonctionnement avec récupération ($150000m^3/h$) en réduisant la puissance du brûleur à $3600KW$ avec un excès d'air de 7.23%.

4.1 Etude de la structure dynamique

Sur la figure 3, on représente les contours de la vitesse verticale et les lignes de courant pour les cas A, B, C et D testés.

Pour les quatre cas simulés, on note que l'écoulement possède la même structure de point de vue boucles de recirculation sauf pour le cas A où on observe la disparition de la boucle de recirculation située à gauche dans la chambre -1- et le rétrécissement de l'autre zone de recirculation. On remarque que plus la longueur de la chambre -1- est petite, plus les boucles de recirculation deviennent attachées au nez du brûleur. Ceci est dû au manque de place pour l'épanouissement des boucles de recirculation qui sont emprisonnées dans la chambre -1- par l'écoulement du débit de récupération.

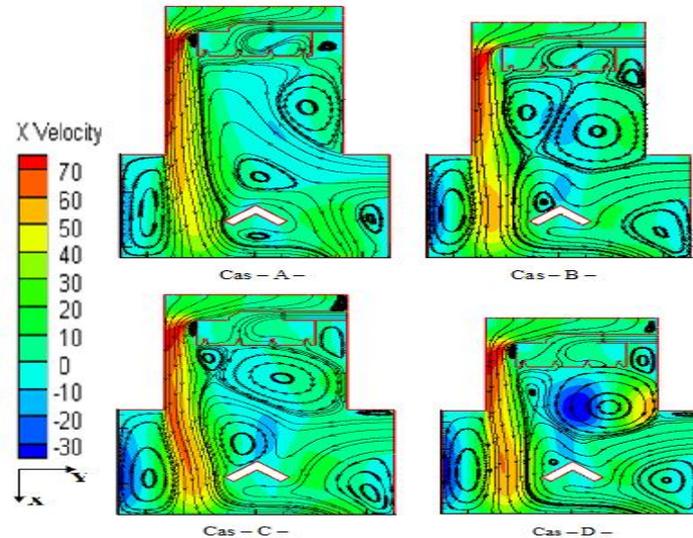


Figure 3 : Contours de la vitesse verticale et lignes de courant des cas tests A, B, C et D (Modèle K- ϵ standard, ED et DTRM).

4.2 Etude de la structure thermique

La figure 4 représente les contours de la température pour les quatre cas simulés A, B, C et D. Pour le cas A qui correspond à la chambre de combustion la plus longue, la flamme est courte orientée vers les parois du brûleur avec une température maximale de 2018K. Cette forme inclinée peut être expliquée par l'effet de coanda « qui dit qu'un jet sortant d'une buse a tendance à suivre une surface courbée, à condition que la courbe de la surface ou son angle d'attaque avec le flux ne soit pas trop forte »

Pour les cas B, C et D, on remarque que plus la chambre -1- est petite, plus la flamme devient courte et collée à la paroi du brûleur ceci est due à l'écoulement du débit de récupération au voisinage du nez du brûleur empêchant la flamme de se développer.

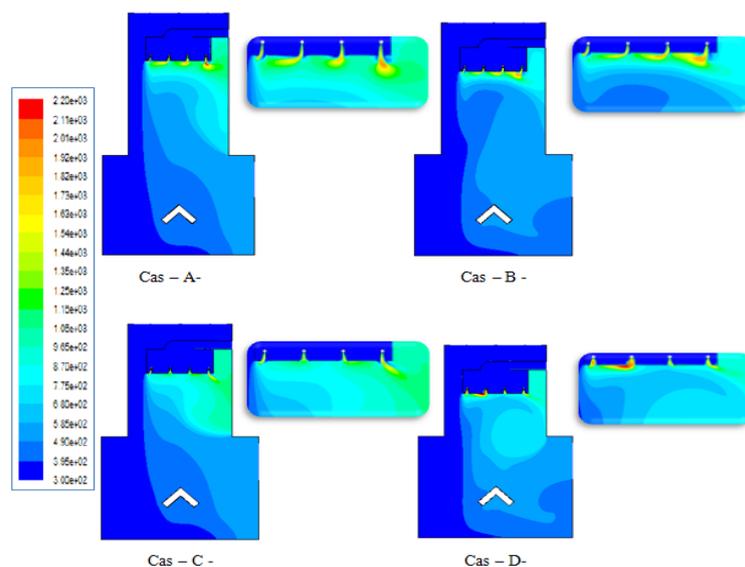


Figure 4 : Contours de température des cas A, B, C et D (Modèle K- ϵ standard, ED et DTRM).

Afin de mieux visualiser les points chauds qui sont apparus au niveau des parois du brûleur, on a relevé sur le tableau 3 la température moyenne et maximale sur les parois du brûleur pour les quatre cas tests.

Ce tableau confirme l'existence de points chauds dans le cas D avec une température maximale égale à 1157K ; de plus on remarque que plus la longueur de la chambre de combustion est faible, plus le risque de détérioration du brûleur est grand.

Tableau 3 : Température moyenne et maximale sur les parois du brûleur.

Cas	A	B	C	D
T moyenne	419.63K	398.55K	464.26K	617.67K
T maximale	867.23K	882.37K	945.58K	1157.37K

En représentant la température maximale atteinte sur les parois du brûleur en fonction de la longueur de la chambre (voir figure 5), on remarque que plus la longueur de la chambre est petite, plus la température sur les parois du brûleur est élevée. Ce qui présente un danger considérable pour le brûleur puisque selon les documents du constructeur du brûleur veine d'air il est préférable de fonctionner avec des températures avoisinantes des parois du brûleur au-dessous de 1000 K surtout pour un fonctionnement fréquent.

Ainsi, en se basant sur la figure 5 et afin de retrouver un compromis entre un minimum d'encombrement et un bon fonctionnement de la chambre de combustion en minimisant le risque de détérioration du brûleur, il est préférable de fonctionner avec une longueur supérieure à 4 m (qui correspond à une température maximale de 1000K sur les parois du brûleur).

Afin de confirmer cette constatation, on a effectué une dernière simulation avec une chambre de combustion de longueur 4m. On remarque que le contour de température (Figure 6) présente une flamme bien établie (courte et non collée sur les parois) au nez du brûleur. En effet, on retrouve une température moyenne de 302K et une température maximale égale à 961K ce qui est en accord avec le résultat déduit par la figure 5.

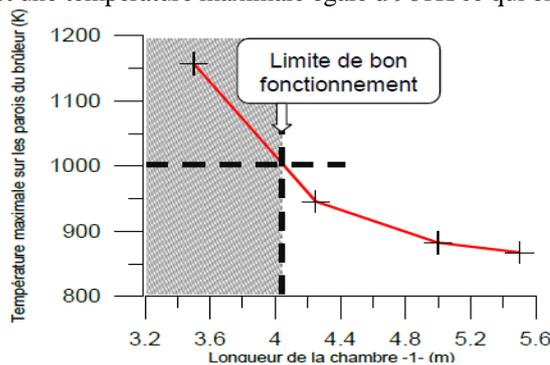


Figure 5 : Evolution de température maximale du brûleur en fonction de la longueur de la chambre

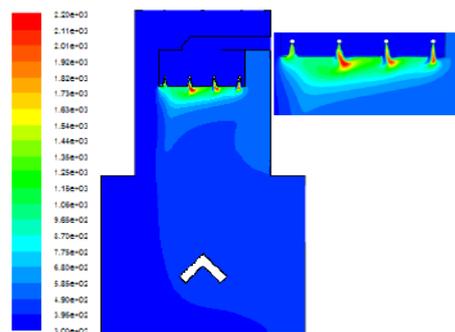


Figure 6 : Contours de température pour le cas L=4m

5. Conclusion

Dans ce travail, nous avons présenté les résultats obtenus par la modélisation d'un écoulement réactif dans la chambre de combustion d'un séchoir à tunnel de la briqueterie CERAC (céramique du centre).

Les simulations sont effectuées à l'aide du code de calcul FLUENT version 6.2, en utilisant le modèle de turbulence k- standard, le modèle de combustion ED, et le modèle de rayonnement DTRM. Nous avons examiné l'impact de la variation de la longueur de la chambre sur les grandeurs dynamique et thermique de l'écoulement réactif.

On a déduit que plus la chambre est grande plus le risque de détérioration du brûleur diminue. Et d'après la courbe présentant l'évolution de la température maximale sur les parois du brûleur en fonction de la longueur de la chambre, on a déduit que la longueur minimale de la chambre est égale à 4m.

Références

- [1] Perthuis E., Revue des techniques de réduction des émissions d'oxydes d'azote au niveau des brûleurs, Revue Générale de Thermique, 330 374–377, 1989
- [2] Ladislav Bebar, Vit Kermes, Peter Stehlik, Josef Canek and Jaroslav Oral 2002, Low NOx burners prediction of emissions concentration based on design, measurements and modelling Waste management, Issue 4, Pages 443-451,2002
- [3] Anouar Souid et al, Simulation d'un brûleur industriel : Etude de l'effet des ventelles sur les caractéristiques de l'écoulement, 18ème Congrès Français de Mécanique, Grenoble, 27-31 août 2007
- [4] K .Bashirnezhad and M. Joleini, Experimental Investigation of Combustion Chamber Dimensions Effects on Pollutant Emission and Combustion Efficiency, World Academy of Science, Engineering and Technology, 2010
- [5] Fluent User's Guide