

## Etude de l'effet de la géométrie d'un brûleur à veine d'air sur l'écoulement réactif dans une chambre de combustion

Sirine CHOUAIEB<sup>1</sup>, Wassim KRIAA<sup>1</sup>, Hatem MHIRI<sup>1</sup>, Philippe BOURNOT<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ecole nationale d'ingénieurs de Monastir, unité de thermique et thermodynamique des procédés industriels, route de Ouardanine, 5000 Monastir, Tunisie

<sup>2</sup>IUSTI, UMR CNRS 6595, Technopôle Château-Gombert, 5 rue Enrico Fermi, 13013 Marseille, Cedex 20, France

*Chouaieb.sirine@yahoo.fr*

**Résumé :** Cette étude numérique sous FLUENT s'intéresse à la modélisation de l'écoulement réactif d'un brûleur industriel de type veine d'air. L'intérêt de cette étude vient du fait de l'absence des travaux de recherche sur ce type de brûleur bien qu'il est largement utilisé dans le secteur de séchage industriel.

On se propose par le biais de cette simulation numérique d'évaluer l'effet de la géométrie (mono et bi-étagée) d'un brûleur à veine d'air de puissance 750 kW sur l'écoulement réactif résultant au sein de la chambre de combustion considérée et plus précisément sur les champs dynamique et thermique résultants.

### Mots clés :

FLUENT, brûleur à veine d'air, géométrie, écoulement réactif.

## 1. Introduction

Les travaux de recherche faits pour décrire et modéliser le fonctionnement des brûleurs industriels, comprendre les différents phénomènes physiques résultants [1,2] ou évaluer les émissions polluantes produites [3] sont nombreux. Néanmoins, ils sont quasi-absents pour les brûleurs à veine d'air bien qu'ils possèdent plusieurs avantages en termes de rendement élevé et respect aux exigences environnementales (émissions polluantes faibles) et qu'ils sont largement développés dans les secteurs de séchage tels que le séchage des céréales, le séchage textile, le séchage des briques etc... Cette étude constitue un essai dans lequel on va simuler numériquement le fonctionnement de deux modèles des brûleurs à veine d'air mono et bi-étagé de même puissance (750 kW) tout en soulignant les principales différences dues à la modification de la géométrie.

## 2. Configurations étudiées

Le brûleur à veine d'air auquel on s'intéresse est un équipement de combustion destiné à chauffer en direct un débit d'air neuf dans une chambre de combustion selon un montage en intérieur de gaine [4] comme le montre la figure 1.

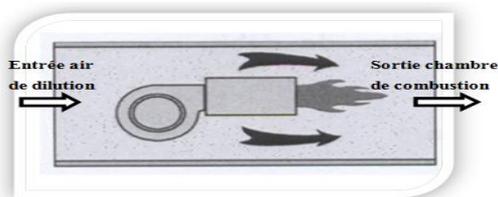


Figure 1: Schéma de principe d'un brûleur à veine d'air [4]

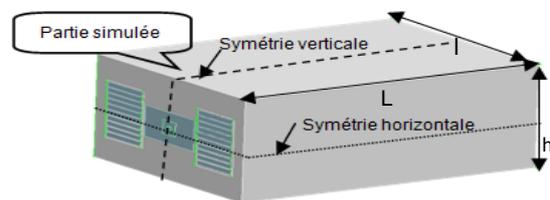


Figure 2 : Représentation de la chambre de combustion: géométrie globale étudiée

Dans cette étude on va comparer le fonctionnement de deux brûleurs à veine d'air de même puissance et qui diffèrent par la forme géométrique : mono et bi-étagée. Ces deux brûleurs sont implantés au sein d'une chambre de combustion de longueur  $L=2\text{m}$ , de largeur  $l=1.7\text{m}$  et de hauteur  $h=1.5\text{m}$  (figure 2).

La configuration géométrique présentée sur la figure 2 obéit à une symétrie horizontale et verticale, ainsi le domaine simulé se réduit au quart du domaine de calcul global comme le montre la figure 3. On donne dans le tableau 1 les caractéristiques dimensionnelles des deux brûleurs utilisés pour le quart du domaine de calcul représenté sur la figure 3.

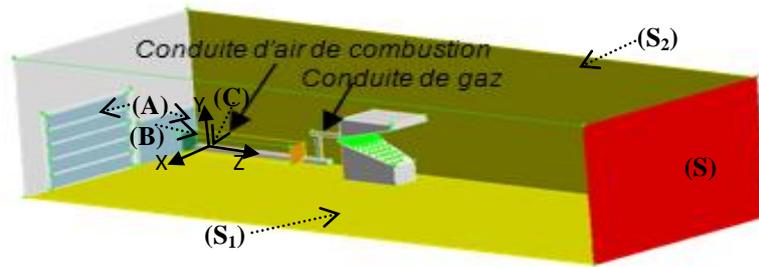


Figure 3 : Représentation du domaine de calcul simulé selon une symétrie horizontale et verticale : 1/4 de la chambre globale

Tableau 1: Caractéristiques des brûleurs mono et bi-étagés (1/4 du domaine total)

Caractéristiques	Brûleur à 1 étage	Brûleur à 2 étages
Longueur (cm)	46	30.5
Largeur (cm)	17.75	17.75
Hauteur (cm)	7.25	11.5
Nombre de trous d'air	342	356
Nombre de trous de gaz	48	48

Comme déjà noté, les deux brûleurs étudiés sont caractérisés par une puissance égale à 750 kW et diffèrent par la forme géométrique: mono et bi-étagée. En fait, les deux modèles adoptés sont inspirés du brûleur à veine d'air VEINAIRFLAM V implanté au sein de la société tunisienne céramique du centre CERAC. Ce brûleur de puissance égale à 4500 kW est destiné au séchage des briques. Comme le montre la figure 4, ce brûleur est caractérisé par une géométrie compliquée vu le nombre élevé de trous d'air (7376) auxquels s'ajoutent le nombre de trous de gaz (480) ce qui implique un coût de calcul élevé. De ce fait, et pour des raisons simplificatrices, on a intérêt à étudier un modèle représentatif du brûleur réel de taille réduite et de puissance égale à 750 kW.

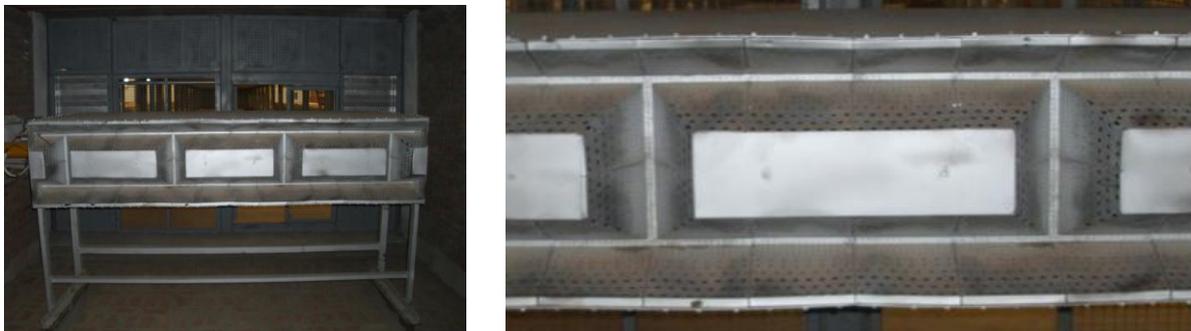


Figure 4 : Vue globale et vue rapprochée du brûleur à veine d'air type VEINAIRFLAM V au sein de CERAC

Les deux modèles utilisés pour la modélisation numérique sont représentés sur les figures (5a) et (5b) selon une symétrie horizontale et verticale comme indiquées sur la figure 2.

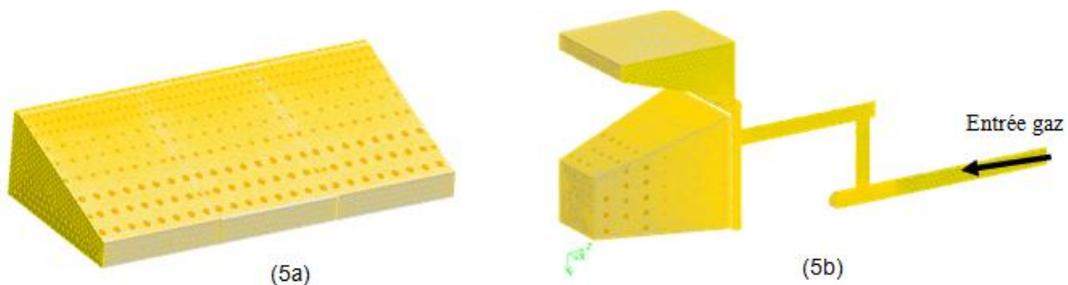


Figure 5 : Représentation et maillage des brûleurs à veine d'air mono (5a) et bi-étagé (5b):1/4 du domaine total

Les domaines de calcul utilisés sont maillés en 1 026 883 et 1 053 951 volumes élémentaires respectivement pour le cas du brûleur à un seul étage (5a) et à deux étages (5b). Compte tenu de la complexité des géométries, les maillages adoptés sont tétraédriques pour la totalité du domaine.

Les conditions aux limites imposées sur les différents domaines de la configuration étudiée représentée sur la figure 3 sont rassemblées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Conditions aux limites et domaines de la configuration représentée sur la figure 3

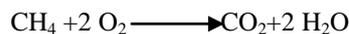
Domaines	Conditions aux limites
Entrée air de dilution (A)	Velocity inlet $I_t=5\%$ , $D_h=0.1387\text{m}$ , $V_{f,O_2}=0.23$
Entrée air de combustion (B)	Velocity inlet $I_t=5\%$ , $D_h=0.1167\text{m}$ , $V_{f,O_2}=0.23$
Entrée conduite gaz (C)	Velocity inlet $I_t=5\%$ , $D_h=0.041\text{m}$ , $V_{f,CH_4}=1$
Parois de la chambre de combustion, du brûleur, de la conduite gaz et de la conduite d'air de combustion	wall
Plan de symétrie horizontale ( $S_1$ ) et verticale ( $S_2$ )	symmetry
Sortie chambre de combustion (S)	outflow

### 3. Considérations mathématiques et conditions d'injections

La modélisation mathématique d'un écoulement turbulent en absence ou en présence d'une réaction chimique nécessite la résolution des équations différentielles aux dérivées partielles. En fait, ces équations traduisent les lois de conservation de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie et des espèces chimiques au sein d'un volume élémentaire de fluide.

La résolution numérique de l'écoulement réactif résultant au sein de la chambre de combustion étudiée s'effectue en prenant en considération les hypothèses suivantes:

- La configuration est tridimensionnelle;
- L'écoulement est en régime turbulent et stationnaire;
- Le fluide est incompressible à masse volumique variable;
- Les constituants du milieu réactionnel obéissent à la loi des gaz parfaits ;
- Le gaz naturel est assimilé au méthane  $CH_4$ . La réaction chimique stœchiométrique du méthane dans l'air prend la forme suivante :



Les valeurs des nombre de Prandtl turbulent et du nombre de Schmidt turbulent sont respectivement 0.85 et 0.7.

Les modèles physiques utilisés sont respectivement  $k-\epsilon$  standard [5], «Eddy dissipation» ED [6] et «Discret Ordinates» DO [7] respectivement pour la turbulence, la combustion et le rayonnement. Les conditions d'injection utilisées sont données par le tableau 3.

Tableau 3 : Conditions d'injection pour les brûleurs mono et bi-étagés

Vitesse de l'air de combustion (m/s)	20
Vitesse de l'air de dilution (m/s)	15
Vitesse du gaz (m/s)	15

### 4. Evaluation du fonctionnement du brûleur à veine d'air suivant une géométrie mono et bi-étagée

Pour cette partie, on s'intéresse à identifier les principales différences entre les deux brûleurs fonctionnant avec un et deux étages. On a implanté les deux brûleurs étudiés dans la même chambre de combustion pour une même puissance de 750 kW et un excès d'air de 12%.

#### 3.1 Etude du champ thermique

Sur la figure 6, sont représentés les résultats de simulation correspondant aux champs thermiques donnés pour les deux géométries traités.

En se référant aux résultats de la figure 6 représentant les contours de température au niveau du plan de symétrie horizontale ( $S_1$ ) comme indiqué sur la figure 3, on peut dire que:

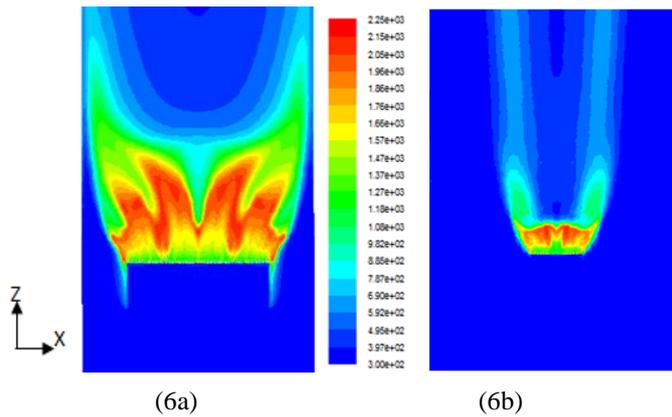


Figure 6 : Contours de température pour le fonctionnement du brûleur selon une géométrie mono (6a) et bi-étagée (6b)

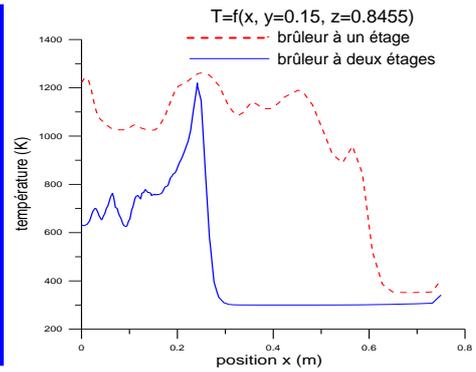


Figure 7 : Profils de température sur la droite ( $x, y=0.15, z=0.8455$ )

- Le modèle du brûleur à un étage permettant d'avoir une puissance de 750 kW n'est pas bien adapté à la géométrie de la chambre de combustion étudiée. En fait, contrairement au mode de fonctionnement du brûleur à deux étages, la flamme caractérisant le cas avec un seul étage est tellement développée et large qu'elle se rapproche beaucoup des parois de la chambre et de sa sortie.

- Le brûleur à un étage engendre une flamme largement développée dans la direction horizontale, en contre partie on trouve une allure de largeur convenable pour le brûleur à deux étages. Les différences observées au niveau de l'allure de la flamme développée pour les deux modes (brûleur à un ou à deux étages) se ramènent à la modification de la géométrie du brûleur et particulièrement à la répartition des trous d'air. En effet, le brûleur à un étage dont on dispose est un brûleur de largeur importante alors que la hauteur du brûleur est plus importante pour le cas à deux étages. Par analogie à cette géométrie, on a une propagation de flamme plus importante dans la direction de l'étendu géométrique le plus important du brûleur (nombre de trous d'air plus élevé).

Afin de conclure quant aux différences des flammes engendrées pour les deux brûleurs en termes de l'évolution de température dans le domaine de calcul, on représente la figure 7 où on suit l'évolution de la température sur deux droites appartenant respectivement à la direction transversale de propagation de la flamme ( $x, y=0.15, z=0.8455$ ). En comparant la répartition de température pour les deux modes de fonctionnement, on note que le brûleur à un étage est caractérisé par une température plus homogène que celui à deux étages. De même, le brûleur mono-étagé est caractérisé par une température de répartition plus uniforme au nez du brûleur (figure 8). Néanmoins, pour la géométrie mono-étagée, la température à la paroi de la chambre atteint 1240K alors qu'elle ne dépasse pas 640K pour la géométrie bi-étagée. On parle ainsi du problème de points chauds à la paroi de la chambre pour le cas où on a utilisé le brûleur à un seul étage qui se manifeste par une flamme collée aux parois de la chambre (figure (6a)).

### 3.2 Etude du champ dynamique

On représente dans la figure 9 l'évolution de la vitesse sur une droite appartenant au nez du brûleur ( $x, y=0.15, z=0.8455$ ) pour les modes de fonctionnement à un seul étage et à deux étages.

Dans cette partie, on se propose de vérifier un critère imposé par le fabricant du brûleur type VEINAIRFLAM V : « avoir une vitesse minimale de 8 à 10 m/s au niveau du nez du brûleur (figure 8) pour maintenir une température stable »

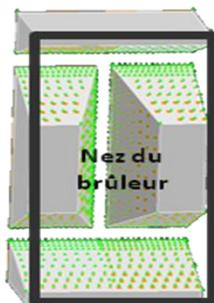


Figure 8 : Représentation du nez du brûleur

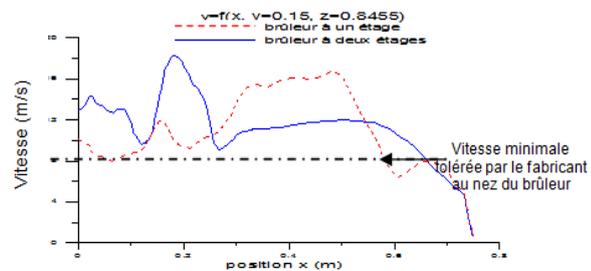


Figure 9 : Profils transversaux de vitesse ( $x, y=0.15, z=0.8455$ ) : Influence de la géométrie du brûleur à un ou à deux étages

D'après la figure 9, on voit que la vitesse pour le cas du brûleur à un seul étage se situe en dessous de celle minimale tolérée par le fabricant. Le critère ainsi donné n'est pas vérifié pour le fonctionnement du brûleur selon une géométrie mono-étagée.

### 3.3 Analyse des émissions polluantes en fonction de la géométrie mono et bi-étagée du brûleur

On s'intéresse dans cette section à évaluer les émissions polluantes à la sortie de la chambre de combustion. Le tableau 4 représente une comparaison entre les émissions en monoxyde d'azote (NO) pour les deux géométries: mono et bi-étagée. D'après le tableau 4, on note des émissions plus faibles pour le cas du brûleur à deux étages où la fraction massique moyenne est de l'ordre de  $5.44 \cdot 10^{-7}$ .

Tableau 4: Fractions massiques maximales à la sortie de la chambre: Effet de la géométrie du brûleur

Géométrie	Fraction massique moyenne de NO à la sortie de la chambre
Brûleur à 1 étage	$6.12 \cdot 10^{-7}$
Brûleur à 2 étages	$5.44 \cdot 10^{-7}$

Néanmoins, le choix du brûleur à un étage reste significatif et valable. En effet, pour les deux modes de fonctionnement, la fraction massique en NO à la sortie ne dépasse pas  $6.12 \cdot 10^{-7}$  (brûleur mono-étagé). La valeur de la fraction massique maximale en NO à la sortie de la chambre est tellement faible et inférieure aux normes les plus strictes imposées pour les équipements de combustion qu'elle peut être négligée pour les deux modes.

## 4. Conclusion

Pour montrer l'effet de la géométrie sur le fonctionnement du brûleur étudié, on a adopté deux configurations possibles du brûleur à veine d'air type VEINAIRFLAM V assurant une puissance 750 kW. La comparaison faite montre des différences au niveau des champs thermique et dynamique. En fait, la flamme développée par le brûleur mono-étagé est tellement développée et large qu'elle se rapproche beaucoup des parois de la chambre et de sa sortie. Dans ce cas, on a conclu que le choix du brûleur à deux étages est plus approprié à la chambre de combustion utilisée puisqu'il engendre une flamme plus adaptée à sa géométrie. L'étude des émissions polluantes pour les cas traités a permis de relever l'influence de la géométrie du brûleur sur le taux de NO produit. On a pu aussi souligner le taux faible des émissions polluantes caractérisant les brûleurs étudiés et plus généralement les brûleurs de type veine d'air.

### Nomenclature

$D_h$	diamètre hydraulique, $m$	$\varepsilon$	taux de dissipation de l'énergie cinétique de turbulence, $m^2 \cdot s^{-3}$
$g$	accélération de la pesanteur, $m \cdot s^{-2}$	$\gamma$	terme de diffusion, $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
$T$	température, $K$	$\mu_t$	viscosité dynamique turbulente, $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
$h$	enthalpie massique, $kJ/kg$	$\lambda$	conductivité thermique, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$I_t$	intensité de la turbulence, %		
$k$	énergie cinétique de turbulence, $m^2 \cdot s^{-2}$		

### Symboles grecs

$\rho$  masse volumique,  $kg \cdot m^{-3}$

### Exposant, Indices

— grandeur moyenne (moyenne de Favre)  
— grandeur moyenne (moyenne de Reynolds)

## Références

- [1] M. Ishak et al, Noxious emission reduction from liquid fuel burner via air staging method, *Journal Mechanical*, No. 24, 40 – 46, December 2007.
- [2] A. Souid et al, Simulation d'un brûleur industriel: Étude de l'effet des ventelles sur les caractéristiques de l'écoulement : *18ème Congrès Français de Mécanique*, 2007.
- [3] A Frassoldati et al. Experimental and modeling study of low-NOx industrial burners, 2005.
- [4] Équipement thermique série VEIN' AIRNOX, brûleurs à gaz-installation et maintenance- études techniques-composants pour équipements thermiques industriels.
- [5] FLUENT 6.2, « Documentation », User's Guide Fluent.Inc, 2005.
- [6] A.M. Eaton, L.D.Smoot, S.C.Hill and C.N. Eatough. "Components, formulations, solutions, evaluation and application of comprehensive combustion models", *Progress in Energy and Combustion Science*, 25, 387-436, 1999.
- [7] H.C Hottel and A.F.Sarofim. "Radiative transfer". Mc Graw-Hill, New-York, 1967.