

# Effet de la variation du débit de soufflage sur la structure de l'écoulement dans une chambre de combustion

Yoldoss CHOUARI<sup>1\*</sup>, Wassim KRIAA<sup>1</sup>, Philippe BOURNOT<sup>2</sup>, Hatem MHIRI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ecole nationale d'ingénieurs de Monastir, 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.

\* (yoldoss chouari : yoldoss.chouari@yahoo.fr)

**Résumé** - Afin de retrouver le meilleur scénario qui nous permet de mieux profiter de l'énergie de combustion 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). Les mesures expérimentales souvent utilisées pour analyser les écoulements dans des chambres de combustion sont coûteuses. Dans ce contexte, cette étude est dédiée à la simulation de la chambre de combustion du séchoir à tunnel de la briqueterie CERAC en fonctionnement sans récupération. On s'intéresse à l'étude de l'effet de la variation du débit du soufflage ( $D_s = 320000 \text{ m}^3/\text{h}$  (débit maximum soufflé) et  $D_s = 150000 \text{ m}^3/\text{h}$ ) sur les grandeurs dynamiques et thermiques du flux circulant dans la chambre afin de minimiser les risques de détachement de la flamme.

## Nomenclature

$U$	vitesse axiale, $\text{m.s}^{-1}$	$\rho$	masse volumique, $\text{kg.m}^{-3}$
$u_i$	composantes de la vitesse moyenne, $\text{m.s}^{-1}$	$\varepsilon$	taux de dissipation de l'énergie cinétique de turbulence, $\text{m}^2.\text{s}^{-3}$
$x_i$	coordonnées cartésiennes ( $i=1,2,3$ ), m		
$T$	température, K		
	<i>Symboles grecs</i>		<i>Indices et exposants</i>
$\mu$	viscosité dynamique, $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$	-	moyenne de Reynolds
		~	moyenne de Favre

## 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.

Des auteurs comme (Perthuis (1989)[1] et Ladislav et al (2002)[2]), ont essayé d'optimiser le fonctionnement des brûleurs industriels coaxiaux afin d'augmenter leurs rendements et diminuer leurs émissions. Anouar Souid et al (2007)[3] ont effectué des simulations numériques sur un brûleur industriel swirlé. 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 NOx et CO.

Or, les travaux de recherche effectués sur les brûleurs à veine d'air sont quasi-absents. Et puisque les mesures expérimentales souvent utilisées pour analyser les écoulements dans des chambres de combustion sont coûteuses, on a été amené à étudier l'écoulement dans la chambre de combustion d'un séchoir à tunnel de la briqueterie tunisienne CERAC en utilisant des capacités de simulation qu'offre le code « Fluent » qui nous permet de visualiser les résultats d'un écoulement sur un simple écran d'ordinateur, en relevant des variables telles que la vitesse, la pression et la température.

Afin de minimiser le risque de détachement de la flamme, on s'intéresse à l'étude de l'effet de la variation du débit du soufflage ( $D_s = 320000 \text{ m}^3/\text{h}$  (débit maximum soufflé) et  $D_s = 150000 \text{ m}^3/\text{h}$ ) sur les grandeurs dynamiques et thermiques du flux circulant dans la chambre.

## 2. Mise en équation

La modélisation numérique de l'écoulement tridimensionnel et tourbillonnaire se base sur la résolution des équations de conservation (1),(2) et (4) de manière à calculer en tout point du système modélisé les grandeurs caractéristiques du fluide.

Equation de conservation de la masse

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

Equations de conservation de la quantité de mouvement

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

Où  $\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \right)$  sont les contraintes visqueuse et  $R_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j}$  sont les

composantes du tenseur des contraintes de Reynolds. Pour les relier à l'écoulement moyen, on a recours au concept de Boussinesq [5] qui permet de les exprimer en fonction des gradients des vitesses moyennes :

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} (\bar{\rho} k + \mu_t \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k}) \delta_{ij} \quad (3)$$

Equations de conservation de l'énergie

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{T})}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{T})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_j T''} \right] + S_h \quad (4)$$

$S_h$  : Energie due à la réaction chimique et au rayonnement.

## 3. Présentation de la chambre de combustion étudiée

La chambre de combustion (figure 1) étudiée a pour rôle de fournir la quantité de chaleur nécessaire pour ramener la température de l'air de dilution à  $120^\circ\text{C}$ . Cette température permet d'assurer un bon fonctionnement du séchoir à tunnel de la société tunisienne céramique du centre CERAC. La chambre de combustion est constitué d'un brûleur de type veine d'air, de

deux ventilateurs de soufflage, d'une gaine de récupération de l'air du four, de deux registres 'entrée d'air de dilution' et d'un casse flamme.

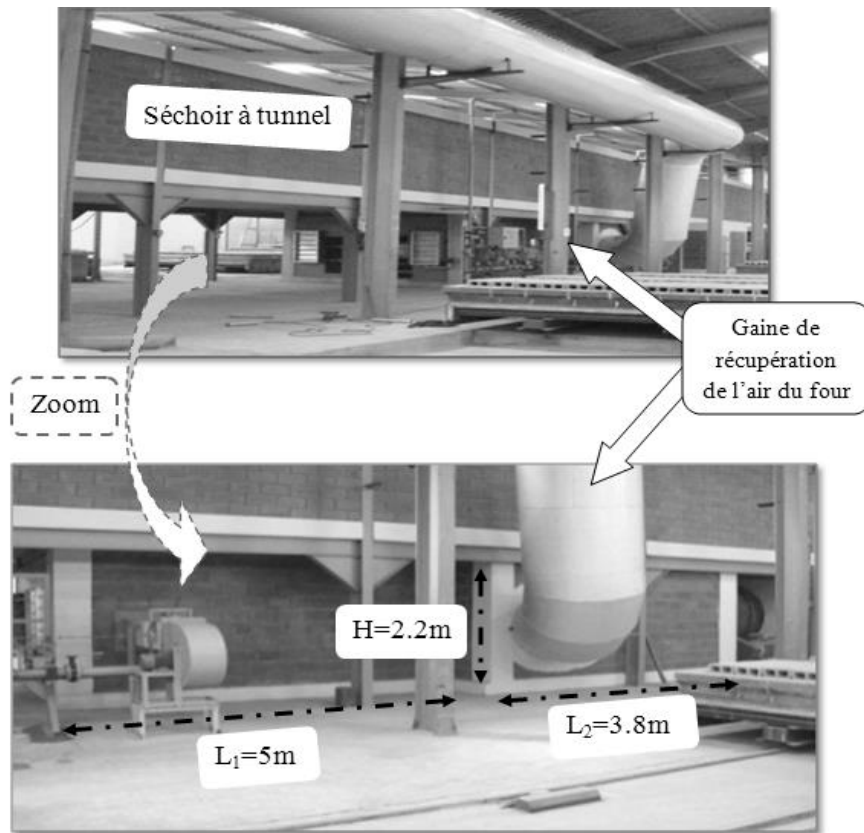
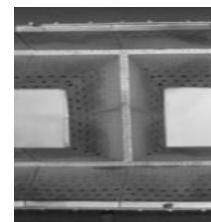
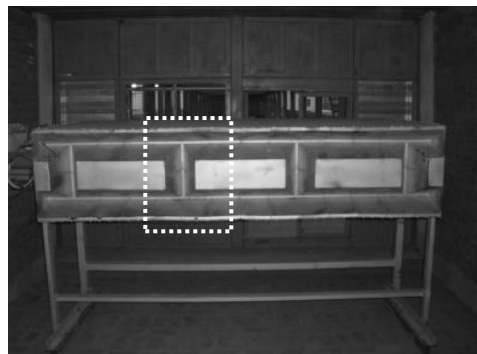


Figure 1 : Vue extérieure de la chambre de combustion étudiée

Comme le montre la figure 2, cette chambre de combustion est caractérisée par une géométrie compliquée. En effet, le brûleur à veine d'air implanté au sein de la chambre comporte un nombre élevé de trous d'air (7376) auxquels s'ajoutent 480 trous de gaz ce qui implique un coût de calcul élevé.



Vue détaillée

Figure 2 : Représentation du brûleur à veine d'air type VEINAIRFLEM V implanté au sein de la société CERAC

#### 4. Construction du domaine de calcul et du maillage

Vue la symétrie de la chambre de combustion étudiée par rapport à la hauteur, on a réduit le calcul à la moitié de la totalité du domaine. A l'aide du mailleur « gambit 2.3.16 », on a effectué la construction géométrique de la moitié de la chambre de combustion. La figure 3 donne l'aspect des différents composants de la chambre étudiée.

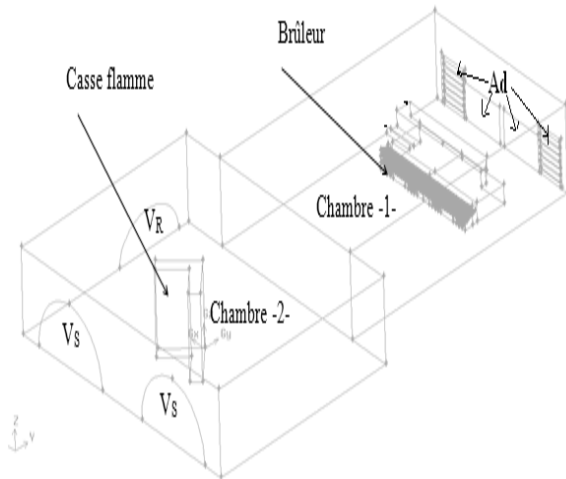
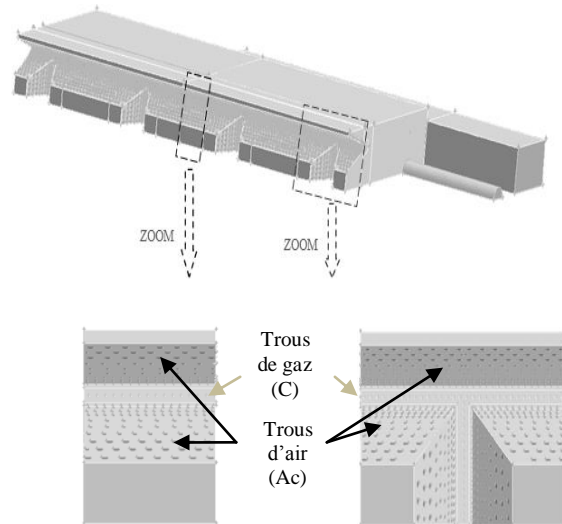


Figure 3 : Aspect des différents composants de la chambre



-a- : 1/2 unité simple

-b- : 1/2 élément H

Figure 4 : Aspect de la moitié du brûleur veine d'air

Le brûleur utilisé est un brûleur type veine d'air composé de 6 unités simples (Figure 4 : -a-) et 4 éléments H (Figure 4 : -b-) permettant d'obtenir une puissance calorifique maximale de 4500KW.

Vue la complexité de la géométrie et la différence de dimensions entre les petits trous (de 1.5 mm maillés par 12 cellules triangulaires) et les dimensions de la chambre (de 5m), on a opté pour un maillage tétraédrique non structuré qui permet de raffiner à loisir dans les zones d'intérêt. On note que les parois trouées du brûleur génèrent des cellules de très petites dimensions qui représentent environ la moitié du nombre total de volume de contrôle.

#### 5. Conditions aux limites

Les conditions aux limites imposées sur la configuration étudiée sont rassemblées dans le tableau 1 et la figure 3.

Domaines	Conditions aux limites
Entrée air de dilution (Ad)	'Velocity inlet': 15m/s-33m/s Intensité de turbulence: $I_t=10\%$ Diamètre hydraulique: $D_h=1,35m$ Fraction volumique de $O_2$ : $V_{f,O_2}=0,23$
Entrée air de combustion (Ac)	'Velocity inlet' : 19.26m/s $I_t=10\%$ $D_h=0.35m$ $V_{f,O_2}=0,23$

Entrée gaz de combustion (C)	'Velocity inlet' : 73m/s It=10% Dh=0.05m Fraction volumique de CH4: $V_{f, CH4}=1$
Plan de symétrie horizontale	Symétrie
Sortie de la chambre de combustion (Vs)	'outflow'

Tableau 1 : Conditions aux limites imposées

## 6. Hypothèses Numérique

Pour simuler numériquement la chambre de combustion, on a considéré les hypothèses suivantes :

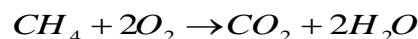
- La configuration est tridimensionnelle.
- L'écoulement est stationnaire et turbulent.
- Le fluide est incompressible.
- Les constituants du milieu réactif obéissent à la loi des gaz parfait.
- La répartition du débit d'air et de gaz de combustion est homogène sur tous les trous
- Effet de rayonnement négligé

Dans ce travail, on a opté pour l'utilisation des modèles suivants :

- La turbulence est modélisée par le modèle K- $\epsilon$  standard faisant intervenir les équations de transport de l'énergie cinétique et son taux de dissipation.
- La combustion est décrite par le modèle Eddy Dissipation (ED) qui suppose que la chimie est très rapide par rapport à la turbulence.

Les différentes espèces chimiques prises en compte pour les calculs d'équilibre sont : CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, et O<sub>2</sub>.

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



On note que pour tout les cas étudiés, le brûleur veine d'air de puissance de 4500 KW fonctionne avec un excès d'air de 7.23%.

## 7. Résultats et discussions

Dans cette section, on donne à titre comparatif les résultats de simulations pour les deux débits de soufflage :

- Cas A :  $D_s = 320000 \text{ m}^3/\text{h}$  (débit maximum soufflé)
- Cas B :  $D_s = 150000 \text{ m}^3/\text{h}$

On s'intéresse essentiellement à l'étude du champ thermique permettant de donner l'allure de la flamme résultante pour chacun des cas testés. De même, on donne les résultats du champ

dynamique, particulièrement les contours des zones de recirculation dans la mesure à expliquer les allures des flammes trouvées.

La figure 6 présente les contours de température dans les plans  $Z=0m$  pour les deux cas tests A et B. Pour le cas B qui correspond au débit de dilution le plus faible, la flamme se présente longue et molle se développant jusqu'à la moitié de la chambre 1. On remarque aussi le détachement (séparation du brûleur) de la flamme en aval de la gaine d'air, ceci est due à la structure de l'écoulement, qui présente l'apparition d'une zone de recirculation qui aspire la flamme et l'emprisonne en aval de la gaine d'air. Pour le cas A, la flamme est courte puisqu'elle ne dépasse pas le  $\frac{1}{4}$  de la chambre 1. On observe dans ce cas que la flamme se présente très courte et orientée vers la droite au niveau du premier injecteur au voisinage du débit de dilution et plus étalée et inclinée vers la gauche au niveau des autres injecteurs. Cette forme est le résultat de l'apparition de zone de recirculation très intense des deux côtés du brûleur.

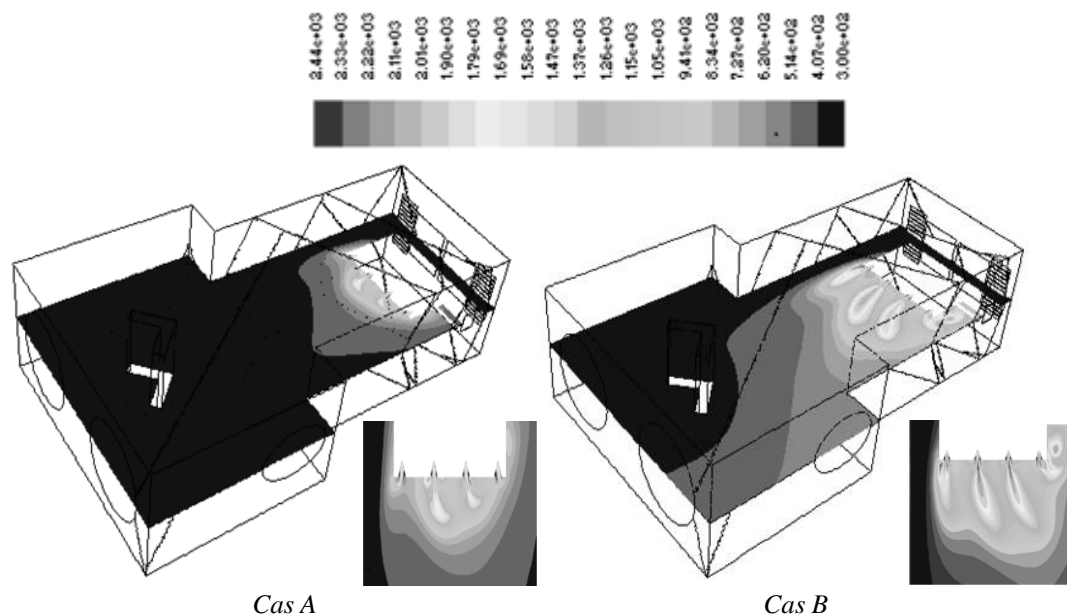


Figure 6 : Contours de température sur le plan ( $z=0m$ ) pour les deux cas A et B

Afin de mieux visualiser la distribution de la température au niveau du nez du brûleur, on donne sur la figure 7 l'évolution transversale de la température sur la droite ( $x, y=5m, z=0.148$ ). D'après cette figure, on peut observer que pour le cas A qui correspond à  $D_s=320000 \text{ m}^3/h$ , la température au nez se présente symétrique et plus homogène que celle pour le cas B. En effet, pour le cas A la température varie entre 1250K et 2050K contrairement au cas B où la température est non homogène puisqu'elle varie entre 700K et 1800K. Ceci est dû à la disparité de la distribution de l'air au nez du brûleur, en effet, on note que plus la vitesse tend vers 8 m/s, plus la distribution de la température au nez du brûleur devient hétérogène.

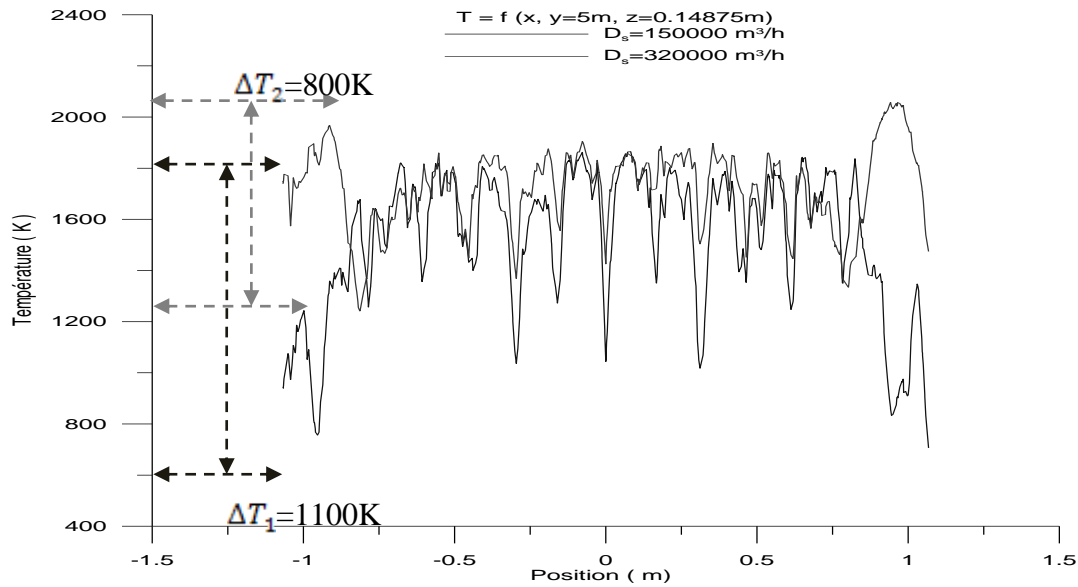


Figure 7 : Profils de la température sur l'axe  $(x, y=5m, z=0.148)$  pour les deux cas tests A et B

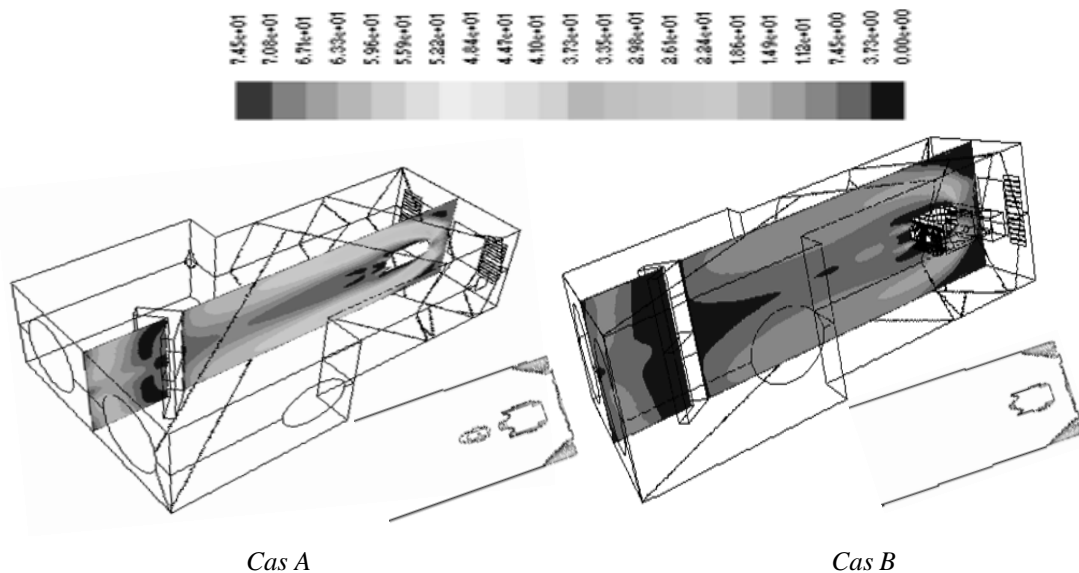


Figure 8 : Contours de vitesse et de vitesse axiale négative sur le plan  $(x=0m)$  pour les deux cas A et B

Les contours de vitesse dans le plan  $x=0m$  pour les deux cas tests A et B montrent que la structure dynamique de l'écoulement a complètement changé suite à la variation du débit de soufflage (figure 8). La réduction du débit de soufflage fait disparaître la zone de recirculation centrale.

La figure 9 présente les contours de température dans le plan  $x=0m$  pour les deux cas tests A et B. On note que, pour le cas A, la forme de la flamme prend l'aspect d'une flamme large ceci est expliqué par la structure de l'écoulement (figure 8) qui présente une zone de recirculation au voisinage du nez du brûleur qui permet l'amélioration du mélange entre les réactifs et réduit la zone de réaction. Et ainsi, on se retrouve avec un écoulement à forte composante tangentielle au nez du brûleur. Pour le cas B, la flamme a la forme d'un fuseau allongé, c'est l'aspect d'une flamme longue, ce qui indique un manque de mélange entre les réactifs.

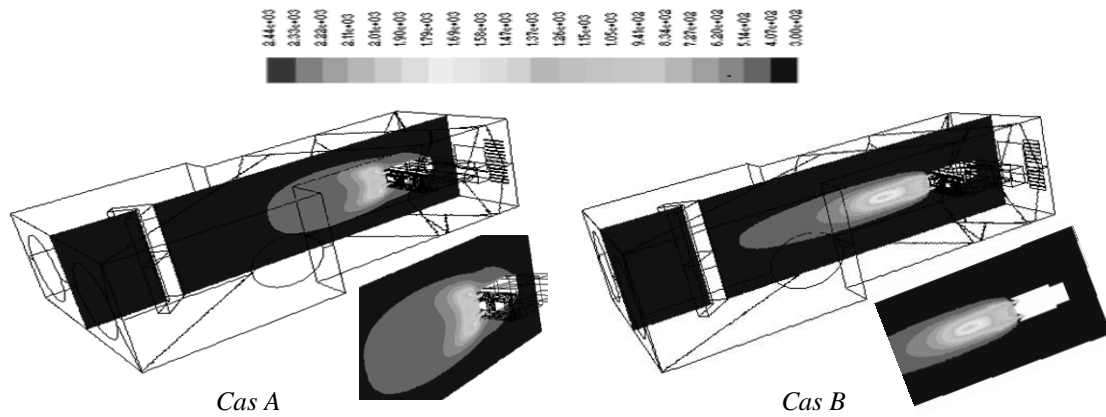


Figure 9 : Contours de température sur le plan ( $x=0m$ ) pour les deux cas A et B

Suite à la comparaison de ces deux cas de fonctionnement de la chambre de combustion du séchoir à tunnel, On a constaté que plus la vitesse de dilution diminue :

- Plus l'allure de la flamme devient plus longue et molle ;
- Plus le risque de détachement de la flamme augmente ;
- On a un risque de retour de flamme en aval de la gaine d'air ;
- La température au niveau du brûleur perd son homogénéité ;
- La composante axiale de la vitesse devient de plus en plus dominante et ainsi la flamme prend l'aspect d'une flamme longue.

## 8. CONCLUSION

Cette étude constitue une approche numérique dans laquelle on a utilisé le code de calcul industriel FLUENT 6.3 pour la modélisation de l'écoulement réactif au sein d'une chambre de combustion.

On a étudié l'effet de la variation du débit du soufflage ( $D_s = 320000 \text{ m}^3/\text{h}$  (débit maximum soufflé) et  $D_s = 150000 \text{ m}^3/\text{h}$ ) sur les grandeurs dynamiques et thermiques du flux circulant dans la chambre afin de minimiser les risques de détachement de la flamme. Afin de remédier au problème de détachement de la flamme, il est préférable d'augmenter la vitesse de l'air de dilution.

### 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, Petr Stehlik, Josef Canek and Jaroslav Oral 2002, Low NOx burners prediction of emissions concentration based on design, *measurements and modelling Waste management*, 22, 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 6.3, « Documentation », User's Guide Fluent.Inc, 2005.