

Effet de la variation de température sur les caractéristiques dynamiques d'un écoulement issu d'une cheminée autour d'un obstacle parallélépipédique

Ines BHOURI BAOUAB^{1*}, Nejla MAHJOUR SAÏD¹, Hatem MHIRI¹, George LEPALEC², Philippe BOURNOT²

¹Unité de Thermique et Thermodynamique des Procédés Industriels, Ecole Nationale d'ingénieurs de Monastir, Route de Ouardanine, 5000 Monastir - Tunisie.

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

* (auteur correspondant: bhour_i_ines@yahoo.fr)

Résumé – Cette étude consiste en une simulation numérique de l'écoulement émanant d'une cheminée coudée et impactant sur un obstacle parallélépipédique placé en aval. Pour cela, l'ensemble des équations de Navier Stokes est résolu. Le système d'équations étant ouvert, nous avons eu recours au modèle turbulent de second ordre RSM (Reynolds Stress Model). Le modèle est ensuite maillé de manière non uniforme, particulièrement resserré près de la cheminée et de l'obstacle pour une meilleure résolution de l'écoulement résultant dans ces zones. La confrontation des résultats calculés aux données expérimentales donnent une concordance satisfaisante. La généralisation des conditions adoptées, à savoir l'injection d'une fumée non réactive au sein de la cheminée coudée et l'introduction d'un gradient variable entre la température de la fumée et celle du l'écoulement environnant, permet d'analyser l'influence de ce gradient sur le comportement dynamique de l'écoulement résultant à différents emplacements du domaine.

g	force de gravité	m/s^2
d	diamètre de la cheminée	m
h	Hauteur de la cheminée	m
T	température	K
\tilde{u}_i	vitesse selon la direction i	m/s

x_i	coordonnées dans la direction i	m
μ	viscosité cinétique	kg/ms
k	Energie cinétique de turbulence	
R	rapport de vitesse	

1. Introduction

La dégradation de la qualité de l'air qu'on respire est devenue de nos jours, l'une des préoccupations essentielles des organismes environnementaux qui veillent sur la qualité de notre vie. L'étude des panaches issus des cheminées et l'optimisation de leurs conditions d'émission constituent un point essentiel dans la réduction et même la prévention de la pollution atmosphérique. Cette étude est d'autant plus complexe si nous considérons la présence d'obstacles placés en aval de ces cheminées. En effet, l'introduction de ce facteur ajoute à la complexité de la configuration de part la multitude des facteurs impliqués : la taille, la forme, l'orientation, le nombre, etc... La richesse de cette configuration et son implication dans des domaines sensibles, à savoir la santé et l'environnement font que le sujet a largement été traité dans la littérature.

Le travail de Becker et al. [1] s'inscrit dans ce contexte puisqu'il considère un écoulement autour d'un obstacle tridimensionnel répondant à différents rapports de forme (longueur/hauteur) et conditions aux limites. Les expérimentations montrent que l'écoulement résultant dépend du rapport de forme, de l'angle d'attaque, du nombre de Reynolds et du type de la couche limite.

Erhard et al. [2] ont généralisé cette configuration en modélisant numériquement la dispersion et le transport des polluants au voisinage de plusieurs obstacles cubiques. En fait, cette étude est plutôt comparative puisqu'elle tend à prouver la performance d'un nouveau modèle non linéaire turbulent par confrontation de ses résultats à ceux élaborés par le modèle k- ϵ standard et aux données recueillies expérimentalement. La performance de ce modèle provient de sa capacité à rapporter convenablement, et mieux que les modèles linéaires, les tensions et les structures tourbillonnaires à l'échelle cubique. Une meilleure détection du caractère non stationnaire de l'écoulement reste à préconiser.

La dispersion d'un polluant autour d'un obstacle isolé dans un milieu isotherme a été considérée par Bouterra [3] en vue d'examiner les comportements dynamique et thermique de l'écoulement résultant. L'attention a particulièrement été portée sur l'effet de la stratification thermique sur le transport et la dispersion autour d'un obstacle. L'attention a également été portée sur la perturbation de l'écoulement d'abord par l'alignement de deux obstacles en aval de la source puis par l'introduction de deux sources ; la première étant placée en amont du premier obstacle et la seconde entre eux.

Mahjoub et al. [4] ont étudié l'évolution d'un polluant issu d'une cheminée droite en régime turbulent et en présence d'obstacles en vue de simuler un cas industriel réel. Une étude paramétrique a mis en évidence l'influence de la hauteur de la cheminée, du rapport d'injection (vitesse d'éjection par vitesse du vent : V_0/U_∞), et de l'emplacement des bâtiments. Les résultats obtenus montrent que plus le rapport des vitesses n'est pas faible, moins le panache est surélevé. Cette observation permet de prévenir le problème d'aspiration des polluants derrière la cheminée ; cet endroit étant propice à la formation de grands tourbillons vu la dépendance de ce mécanisme de la topographie du domaine et de la proximité ou non des obstacles. Le rapport d'injection affecte également les zones de recirculation se développant en aval des obstacles. Les résultats prouvent aussi que la variation de la distance séparant la cheminée de l'obstacle influe sur la dispersion des polluants.

Ce bref aperçu de la littérature traitant de l'écoulement autour d'obstacles montre la diversité des paramètres influents sur ce type de configuration ; à savoir les facteurs météorologiques, la forme des obstacles, leur emplacement, leur nombre, leur orientation, etc. Nous nous proposons dans le présent travail d'évaluer un tout autre facteur, non moins important, à savoir le gradient entre la température d'éjection de la fumée et celle de l'écoulement environnant. L'optimisation de cette configuration et le contrôle de l'écoulement résultant sous pareilles conditions sont primordiaux dans la mesure où des produits secondaires nuisibles peuvent être générés et donc affecter l'environnement et l'Homme. Le danger est d'autant plus alarmant que des températures encore plus élevées sont atteintes afin d'améliorer l'efficacité des applications concernées.

Nous nous restreindrons dans le présent travail à l'évaluation de l'effet du gradient de température sur le comportement dynamique de l'écoulement résultant et plus précisément sur son évolution longitudinale et donc sur la profondeur du domaine.

2. Mise en équations

La configuration traitée consiste en un écoulement émanant d'une cheminée coudée et venant impacter un obstacle de forme parallélépipédique placé en aval. La cheminée émet un mélange d'air et de fumée chimiquement inerte à la vitesse U_0 et à la température T_0 . L'air environnant circule à la vitesse uniforme U_∞ sous une température constante égale à T_∞ . L'écoulement résultant est supposé tridimensionnel, turbulent et stationnaire en moyenne. Il

répond ainsi aux équations de Navier Stokes qui, discrétisées avec la décomposition de Favre, s'écrivent sous la forme suivante :

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

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_i\tilde{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\frac{\partial\tilde{u}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j}\right) + (\bar{\rho}_\infty - \bar{\rho})g\delta_{ij} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_j\tilde{T})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_t}\right)\frac{\partial\tilde{T}}{\partial x_j}\right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_j\tilde{f})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{\sigma_f}\right)\frac{\partial\tilde{f}}{\partial x_j}\right] \quad (4)$$

L'introduction des grandeurs fluctuantes rend ce système ouvert. Nous avons adopté pour sa fermeture le modèle turbulent de second ordre RSM. Son introduction mène à la résolution de l'équation suivante :

$$\frac{\partial}{\partial x_k}\underbrace{(\bar{\rho}\tilde{u}_k\overline{u_i u_j})}_{C_{ij}} = \frac{\partial}{\partial x_k}\underbrace{\mu\frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{u_i u_j})}_{D_{ij}^L} - \underbrace{\rho\left[\overline{u_i u_k}\frac{\partial\tilde{u}_j}{\partial x_k} + \overline{u_j u_k}\frac{\partial\tilde{u}_i}{\partial x_k}\right]}_{P_{ij}} + D_{ij}^T + G_{ij} + \phi_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (5)$$

C_{ij} étant le terme convectif et respectivement D_{ij}^L le terme de diffusion moléculaire, P_{ij} le terme de production dû aux gradients moyens, D_{ij}^T le terme de diffusion turbulente, G_{ij} le terme de production dû à la flottabilité, ϕ_{ij} le terme de corrélation pression - déformation et ε_{ij} le terme de dissipation.

Les équations de l'énergie cinétique turbulente (k) et celle de son taux de dissipations (ε) associées au modèle de fermeture s'écrivent comme suit :

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + \frac{1}{2}(P_{ii} + G_{ii}) - \bar{\rho}\varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{\varepsilon 1}\frac{1}{2}(P_{ii} + C_{\varepsilon 3}G_{ii})\frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2}\bar{\rho}\frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

Pour compléter le problème, outre les systèmes d'équations cités ci-dessus, il faut tenir compte des conditions aux limites récapitulées dans le tableau suivant (tableau1):

Limites	Vitesse	Température	Fraction massique	Energie cinétique	Taux de dissipation
Sortie de la cheminée	$\tilde{u} = U_0,$ $\tilde{v} = 0 \quad \tilde{w} = 0$	$\tilde{T} = T_0$	$\tilde{f}_m = f_{0m}$	$k_0 = 10^{-3}$	$\varepsilon = k_0^{3/2} / 0.5d$
Ecoulement transversal : vent	$\tilde{u} = u_\infty,$ $\tilde{v} = 0, \quad \tilde{w} = 0$	$\tilde{T} = T_\infty$	$\tilde{f}_m = 0$	$k_\infty = 5 \cdot 10^{-3}$	$\varepsilon = k_\infty^{3/2} / 0.2H_T$
Pari de la cheminée, faces des obstacles, sol	$\tilde{u} = 0,$ $\tilde{v} = 0 \quad \tilde{w} = 0$	$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial \tilde{f}_m}{\partial n} = 0$	$k = 0$	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = 0$

Tableau 1: Conditions aux limites

3. Résolution numérique

La résolution des équations moyennées de Navier Stokes décrites ci-dessus est effectuée au moyen de la méthode aux volumes finis. Un maillage non uniforme est appliqué à la totalité du domaine et est particulièrement resserré près de la cheminée et de l'obstacle, là où ont lieu les principales interactions entre l'obstacle et l'écoulement principal. Le système d'équations discrétisées est résolu par la méthode itérative de Gauss-Seidel.

4. Résultats et discussion

Une validation des calculs effectués numériquement s'impose pour pouvoir poursuivre notre travail. Pour ce faire, nous avons confronté les résultats relatifs à la configuration initiale schématisée sur la figure 1. La cheminée est de diamètre 10 mm, de hauteur 100 mm et admet un coude de longueur 100 mm. Un obstacle de forme parallélépipédique de hauteur 150 mm et de largeur 50 mm est placé à 100mm en aval de la source ponctuelle. Le jet éjecté par la cheminée et l'écoulement transverse contiennent de l'air à la même température et le rapport entre la vitesse d'éjection par rapport à celle de l'écoulement transverse est égal à $R = 1,6$. Le domaine de calcul est assez large afin que les frontières du domaine ne perturbent pas l'écoulement.

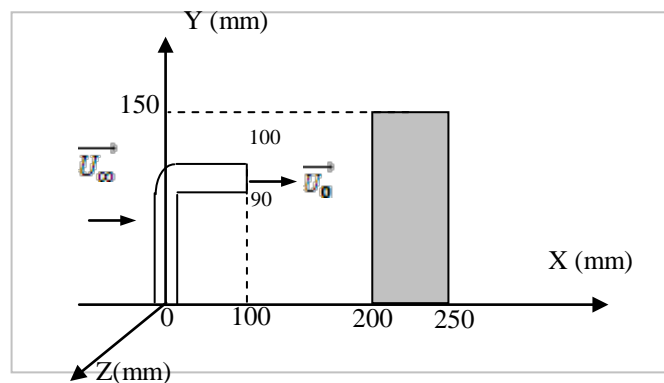


Figure 1. Schéma de la configuration

Afin de valider notre modèle numérique, nous avons comparé ses résultats à des données expérimentales prélevées par la vélocimétrie par imagerie de particules (PIV).

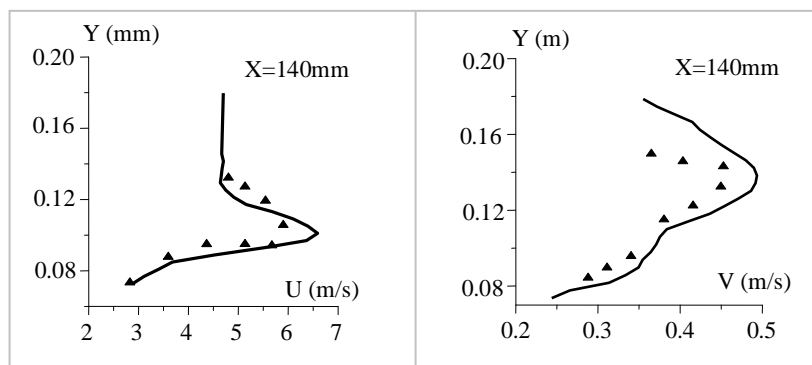


Figure 2. Confrontation des résultats expérimentaux et numériques à la position $X=140$ mm pour $R=1.6$

La figure 2 présente la confrontation des résultats numériques et expérimentaux pour le cas d'un écoulement issu d'une cheminée coudée à la position $X=140$ mm et pour un rapport de vitesse $R= 1.6$. Un bon accord est obtenu et est plus prononcé sur la distribution de la composante longitudinale de la vitesse à cause du faible domaine de variation de la composante verticale rendant sa capture très difficile expérimentalement.

Une fois le modèle est validé, nous ajoutons à l'air émis de la cheminée de la fumée non réactive sous une température variable, l'écoulement environnant étant maintenu à la même température, afin d'approcher au mieux les conditions réelles.

Maintenant nous nous pouvons procéder à l'évaluation de l'impact du gradient entre ces deux températures sur le champ dynamique résultant et plus particulièrement sur l'évolution des composantes longitudinale et verticale de la vitesse. Pour ce faire, cinq différents gradients ont été testés ; à savoir $\Delta T=0K$, $100K$, $300K$, $500K$, et $700K$. Le cas où le gradient est nul servira de référence pour les cas ultérieurs.

La figure 3 montre une évolution propre de la composante longitudinale de la vitesse pour les différentes sections du domaine considérées : $x=140mm$, $X= 230mm$ and $X= 290mm$.

On note que la valeur initiale et la valeur finale de la vitesse sont les mêmes sous tous les gradients de température testés : le départ se fait à partir d'une valeur nulle ou presque alors qu'à la fin on retrouve la vitesse de l'écoulement environnant \tilde{U}_∞ .

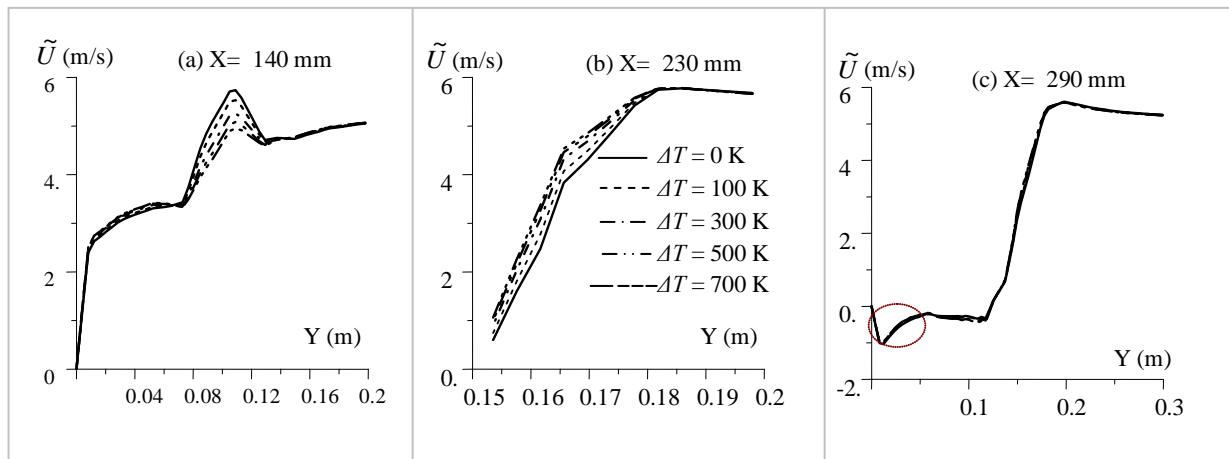


Figure 3 : Variation verticale de la vitesse longitudinale sous différents gradients de température dans les différentes zones du domaine ($X =cte$) et sur le plan $z=0$

Sur la figure 3. a (en amont de l'obstacle) nous voyons que la vitesse longitudinale atteint un pic pour $Y= 100$ mm, ce qui correspond à la section d'éjection de la cheminée pour les différents gradients de température imposés. Ce pic traduit la transition du noyau potentiel vers le milieu environnant. Suite à ce pic, la vitesse diminue révélant le développement d'une zone de recirculation générée par la présence de l'obstacle. Le jet éjecté par la cheminée à une température plus élevée est caractérisé par une densité plus faible, la diffusion de ses molécules se fait donc de façon plus rapide permettant ainsi de traverser l'écoulement plus facilement, sa vitesse tend donc plus rapidement vers la vitesse de l'écoulement environnant ($U_\infty=5m/s$) ; ce qui justifie la décroissance du pic atteint à mesure que le gradient imposé est important.

Sur le toit de l'obstacle $X= 230$ mm (figure 3. b) on est au sein de l'écoulement résultant : l'évolution de la vitesse longitudinale augmente à mesure que le gradient de température grimpe et ce à cause de l'accélération du jet éjecté par la cheminée lorsqu'il est chauffé. En effet la fumée chauffée voit sa densité baisser, ce qui génère une agitation thermique plus prononcée et donc une vitesse globale de l'écoulement plus importante.

En aval de l'obstacle $X=290\text{mm}$ (figure 3. c) les courbes de la vitesse longitudinales sont presque superposées pour les différents gradients de température testés. A cette position ce paramètre n'a plus d'effet sur le comportement dynamique de l'écoulement. On note aussi que la vitesse longitudinale prend des valeurs négatives pour $Y < 100\text{ mm}$ ce qui traduit la perturbation de l'écoulement en aval du bâtiment.

On donne sur la figure 4 les contours de la vitesse longitudinale dans le plan $Z=0$ pour un rapport de vitesse $R=1.6$ sous différents gradients de température. La figure 4 révèle la présence d'une zone d'écoulement piégé entre la cheminée et l'obstacle. On note que l'augmentation du gradient de température génère moins d'écoulement piégé. En effet, les iso contours de la vitesse sous ces conditions sont plus déviés puisque la fumée a tendance à se disperser plus rapidement.

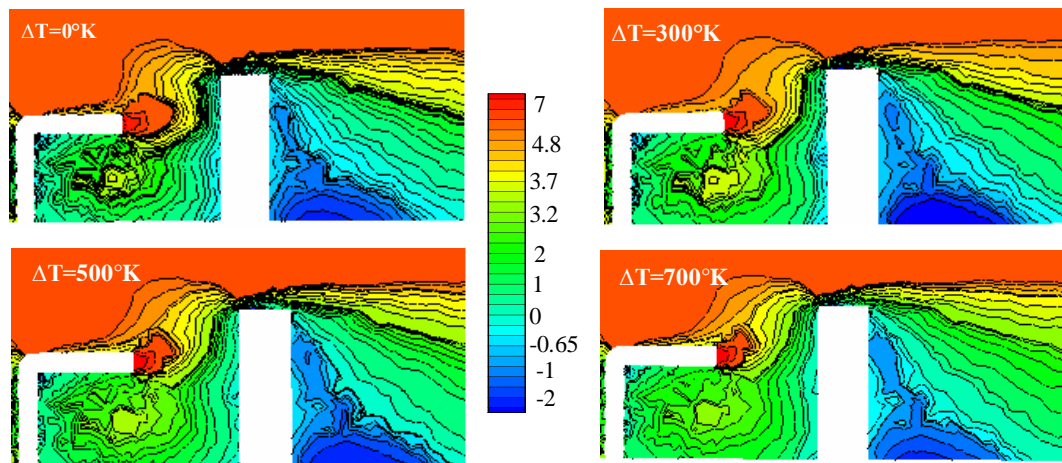


Figure 4. Contours de la vitesse longitudinale dans le plan $Z=0$ sous différents gradients de température

5. Conclusion

Ce travail a permis d'étudier le comportement dynamique d'un écoulement issu d'une cheminée coudée en présence d'un obstacle parallélépipédique sous différentes températures au sein d'un écoulement transversal de température constante. Ce paramètre influence fortement l'évolution de la vitesse longitudinale de l'écoulement. En effet le jet éjecté par la cheminée à forte température est caractérisé par une densité plus faible, ses molécules diffusent donc plus rapidement permettant ainsi de traverser l'écoulement plus facilement. De cette manière, la composante longitudinale de la vitesse tend plus rapidement vers la vitesse de l'écoulement environnant.

Références

- [1] S. Becker "flow around three-dimensional obstacles in boundary layers". Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, Vol. 90, 2002, pp. 265-279.
- [2] J. Ehrhard, "On a new nonlinear turbulence model for simulating flows around building-shaped structures". Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics Vol. 88, 2000 pp. 91-99.
- [3] M. Bouterra, Dispersion d'un polluant en milieu stratifié: application aux problèmes de la pollution urbaine. Thèse de Doctorat, Faculté des sciences mathématiques physiques et naturelles de Tunis, Tunisie, 2001.
- [4] N. Mahjoub Saïd, « Etude de la dispersion d'un panache issu d'une cheminée: application de la maîtrise de la dispersion d'un polluant », Thèse de Doctorat, Ecole nationale d'ingénieurs de Monastir, Tunisie, 2002.