

Etude d'un écoulement issu d'une cheminée autour d'obstacle : Influence de la hauteur de l'obstacle

Ines BHOURI BAOUAB¹, Nejla MAHJOUB SAID², Hatem. MHIRI¹
GeorgeLEPALEC³, Philippe. BOURNOT³

1: Ecole Nationale d'ingénieurs de Monastir, Tunisie. E-Mail: bhour_i_ines@yahoo.fr

2: Faculté des sciences de Monastir, Tunisie.

3: UNIMECA, Marseille, France

E-Mail: bhour_i_ines@yahoo.fr

Résumé

Une étude expérimentale appuyée par une étude numérique est menée afin de mettre en évidence l'influence de la présence d'un obstacle sur la dispersion des polluants éjectés par une cheminée coudée. L'étude numérique consiste à simuler l'écoulement avec un modèle de fermeture au second ordre, et la validation des résultats est assurée grâce à des mesures à échelle réduite. La partie expérimentale est assurée par la vélocimétrie laser par imagerie de particules (PIV) qui est une technique de mesure non intrusive. Les résultats obtenus ont permis de déterminer l'effet de la variation de la hauteur du bâtiment. Il en a été déduit que la dimension de l'obstacle est un paramètre très influant sur la dispersion des polluants.

Nomenclature

d diamètre de la cheminée,

h hauteur de la cheminée, m

g accélération de la pesanteur, $m.s^{-2}$

k énergie cinétique de turbulence

T température K

$\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w}$ composantes de la vitesse moyenne, $m.s^{-1}$

x, y, z coordonnées cartésiennes, m

n la normale à la surface considérée.

$\overline{u_i u_j}$ Tension de Reynolds

R=vitesse d'éjection /vitesse du vent (U_0/U_∞)

Symboles Grecs

ε Taux de dissipation de l'énergie cinétique de turbulence, $m^2.s^{-3}$

Indices

∞ Milieu ambiant;

o à la sortie de la cheminée,

_ Moyenne,

\sim MoyennedeFavre

1. Introduction

La prise de conscience croissante des dangers de la pollution de l'environnement, et l'effort considérable en vue de les combattre a fait que les problèmes liés à l'impact des fumées et des vapeurs nocives rejetées par les jets, par exemple les cheminées industrielles, sur les bâtiments avoisinants suscitent un intérêt pratique majeur. Cette problématique a fait le sujet de plusieurs recherches expérimentales et numériques.

Mason et al. [1] ont suggéré que les concentrations moyennes au niveau du sol dépendent de la forme des constructions. Près de la cheminée, ils ont observé qu'un panache peut être moins dilué qu'un panache non entraîné. Plus en aval de la source, l'obstacle n'a pas d'influence, les concentrations au niveau du sol convergent vers les mêmes valeurs.

Alan H. Huber [2] a étudié dans une soufflerie l'influence de la largeur et de l'orientation des obstacles par rapport au vent. Il a examiné les profils des concentrations dans le sillage

des bâtiments. Les rapports largeur sur hauteur de ces derniers varient de 2 à 22 pour des angles d'orientation compris entre -30 degrés et + 60 degrés, (0 degrés correspondant à une direction perpendiculaire au vent). La hauteur de la cheminée est égale à 1.5 fois la hauteur du bâtiment. La dispersion latérale du panache issu d'une source ponctuelle placée près du bâtiment est maximale pour un rapport largeur / hauteur égale à 10.

M.H.Mirzai et al [3] ont étudié expérimentalement la structure d'un écoulement autour d'obstacle.

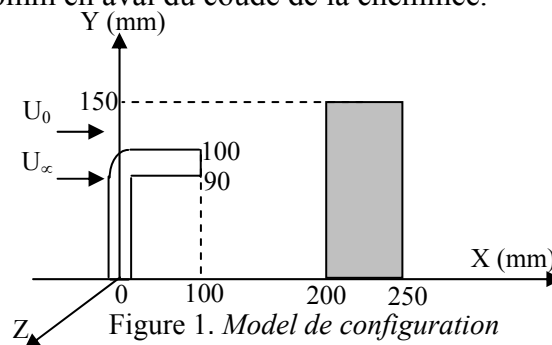
Ils ont montré que le dépôt et le transport du polluant dépend de la forme et de l'orientation du bâtiment aussi bien de la nature de la couche limite.

I.Marvoidis et al [4] a étudié expérimentalement la dispersion du polluant autour d'un obstacle isolé. Le but de cette étude est de varier la forme du bâtiment (cube, cylindre et un obstacle de grande taille) et son orientation par rapport la direction du vent. Ils ont montré que les concentrations du polluant sont affectées par la forme d'obstacle et l'emplacement latéral de la source par rapport à ce dernier.

A l'issu de cette revue bibliographique on a déduit que la forme, la taille et l'emplacement de l'obstacle modifient les caractéristiques massiques d'un écoulement issu d'une source en présence d'un obstacle. Notre travail s'inscrit dans ce contexte puisqu'il constitue une contribution à l'étude de la dispersion des polluants rejetés par les cheminées coudées en présence d'un bâtiment parallélépipédique de hauteur variable.

2. Mise en Equation

On considère une cheminée coudée de hauteur 100mm, de diamètre 10mm ayant un coude de longueur 100mm en présence d'un obstacle parallélépipédique de hauteur 150mm et de largeur 50mm placé à 100mm en aval du coude de la cheminée.



L'écoulement résultant est supposé tridimensionnel, turbulent et stationnaire en moyenne. Il répond donc aux équations de Navier Stokes qui, discrétisées avec la décomposition de Favre s'écrivent sous la forme suivante :

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

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

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

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

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 :

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

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 :

$$\frac{\partial(\overline{\rho\tilde{u}_j k})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{2} (P_{ii} + G_{ii}) - \bar{\rho} \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\overline{\rho\tilde{u}_j \varepsilon})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{1}{2} (P_{ii} + C_{\varepsilon 3} G_{ii}) \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \bar{\rho} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

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	énergie cinétique	Taux de dissipation
Sortie de la cheminée	$\tilde{u} = U_0,$ $\tilde{v} = 0 \quad \tilde{w} = 0$	$\tilde{T} = T_0$	$\tilde{f}_m = f_{0m}$	$k_0 = 10^{-3} v_0^2$	$\varepsilon = k_0^{3/2} / 0.5d$
Écoulement transversal : vent	$\tilde{u} = u_\infty,$ $\tilde{v} = 0, \quad \tilde{w} = 0$	$\tilde{T} = T_\infty$	$\tilde{f}_m = 0$	$k_\infty = 5 \cdot 10^{-3} u_\infty^2$	$\varepsilon = k_\infty^{3/2} / 0.2H_T$
Paroi 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. Résultats Expérimentaux

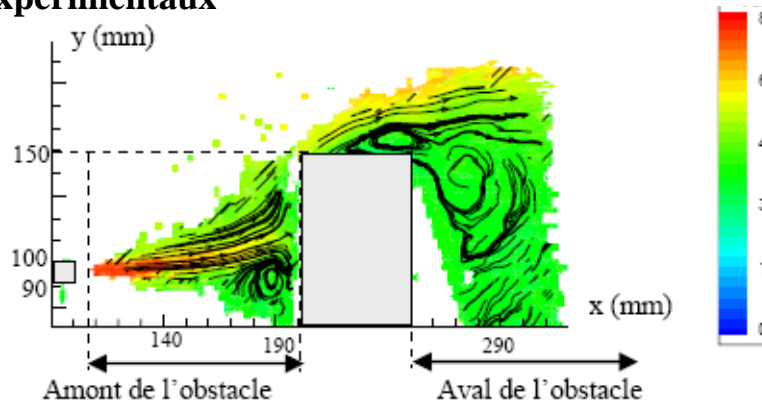


Figure 2. Cartographie de la vitesse pour une cheminée coudée, $U_\infty=8\text{m/s}$, $U_0=8\text{m/s}$

L'étude expérimentale est assurée à l'aide de la technique de mesure (PIV) [5] est une technique de mesure non intrusive qui nous permet d'explorer l'écoulement par des visualisations et des mesures globales des champs instantanés de vitesse. Dans notre cas

On donne sur la figure 2 la cartographie des vitesses de l'écoulement en présence d'un obstacle de forme parallélépipédique. On remarque sur cette figure que les lignes de courant ont tendance à s'élever verticalement, et qu'une structure tourbillonnaire se forme en aval de l'obstacle suite à l'impact de l'écoulement avec ce dernier. L'écoulement interagit avec le bâtiment, c'est ce dernier qui détermine les échelles de turbulence, cette dernière résultant du décollement des lignes de courant. Après décollement, les couches limites de part et d'autre de l'obstacle se rejoignent en aval pour former le sillage.

4. Validation du modèle

Afin de valider les résultats obtenus par la simulation numérique nous la comparons avec les profils expérimentaux tirés par la technique de mesure PIV.

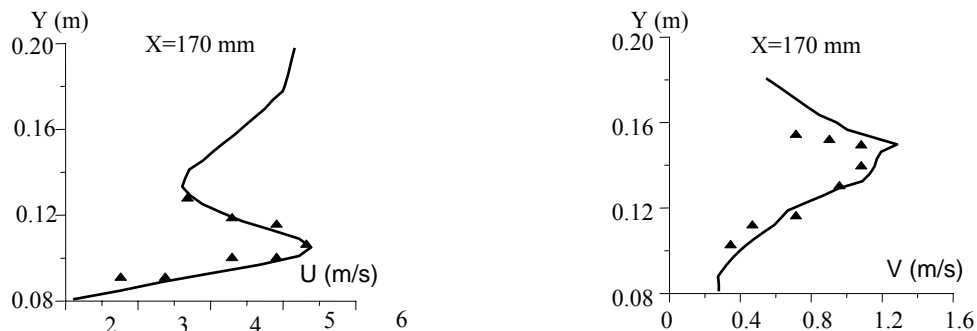


Figure 3. Confrontation des résultats expérimentaux et numériques à la position $X=170\text{mm}$ pour $R=1.6$

Sur la figure 3 on compare les résultats numériques et expérimentaux pour le cas d'un écoulement issu d'une cheminée coudée. Un bon accord est obtenu entre les résultats expérimentaux et numériques à la position $x=17\text{ cm}$ et pour une vitesse d'éjection $U_0=8\text{m/s}$. Cet accord est plus prononcé sur la distribution longitudinale alors qu'il est légèrement moindre sur la distribution de la vitesse verticale à cause des faibles valeurs de cette grandeur ce qui rend sa mesure très difficile expérimentalement.

5. Etude numérique

Une fois le modèle est validé on introduit un gradient de température $\Delta T= 100\text{ K}$ et on injecte une fumée de composition : 20,9% dioxyde de carbone (CO_2), 76,9% d'azote (N_2),

1,8% d'oxygène (O_2), 0,4% dioxyde de soufre (SO_2). En traitant l'évolution de la composition de fumée on a constaté que toutes les espèces (CO_2 , N_2 , O_2 , SO_2) ont le même comportement : c'est pour cette raison que l'on a choisi le dioxyde de carbone comme référence d'étude. Dans cette partie on va étudier l'influence de la hauteur du bâtiment sur les caractéristiques massiques de l'écoulement on considère alors $h=15\text{cm}$, $h=9\text{cm}$ et $h=5\text{cm}$.

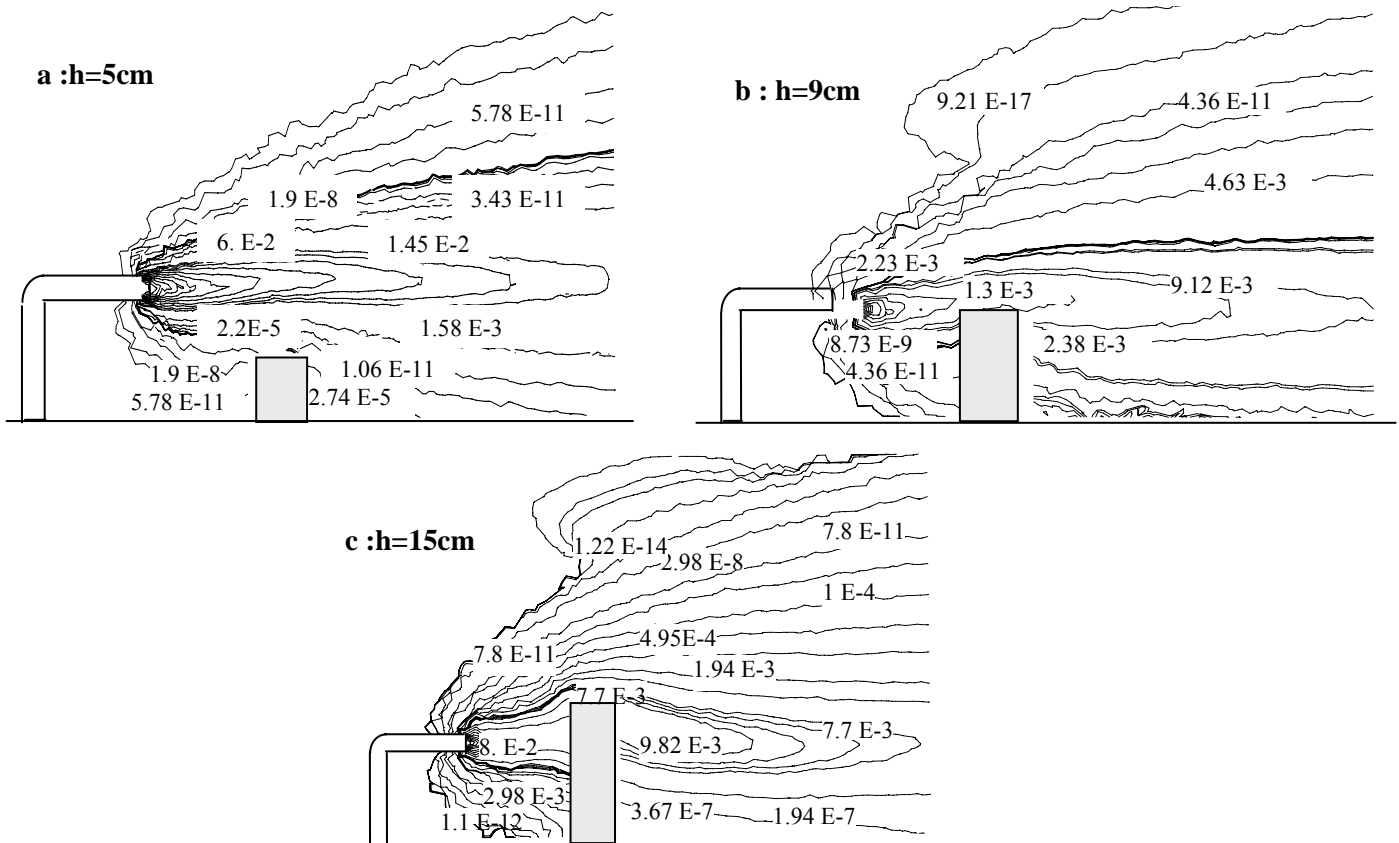


Figure 4 .contours de la fraction massique de CO_2 pour différentes hauteurs du bâtiment et pour $R=1.6$

On présente sur la figure 4 les iso lignes de fraction massique de CO_2 pour différentes hauteurs du bâtiment.

Les iso lignes de la fraction massique affirment bien que la hauteur de l'obstacle influe sur le rabattement du polluant au niveau du sol et aux alentours du bâtiment.

Pour le cas d'un obstacle ayant la hauteur 5cm (inférieur à celle de la cheminée coudée), la fraction massique de CO_2 déposée sur le toit est de l'ordre de $2.2 \text{ E-}5$ et au sol amont du bâtiment est de l'ordre de $5.78 \text{ E-}11$ par contre en aval du bâtiment, elle est de l'ordre de $2.7 \text{ E-}5$. Ces faibles fractions sont obtenues car le panache est horizontal à une hauteur $y=10 \text{ cm}$ il ne rencontre pas l'obstacle dans son chemin.

Pour un obstacle de hauteur 9 cm c'est-à-dire de 1 cm moins à la hauteur de la cheminée coudée, on note que la direction horizontale du panache est un peu dévié car ce dernier rencontre l'obstacle sauf dans la région haute de la face frontale ensuite continue sa trajectoire La fraction massique de CO_2 déposé au sol en amont de l'obstacle est de l'ordre de $4 \text{ E-}11$ (presque le même que le cas précédent) mais on .remarque que la concentration déposée au niveau du toit et de l'ordre de $1.3 \text{ E-}3$ (100 fois la valeur obtenue pour un obstacle de faible hauteur)

La fraction massique CO_2 déposée en aval de l'obstacle est de l'ordre de $3\text{E-}3$.

La figure 4.b montre que l'impact du polluant se fait à une distance plus importante que celle pour le cas du bâtiment de faible hauteur.

Pour le cas d'un obstacle de hauteur plus élevée d'une fois et demie la hauteur de la cheminée, on note que le polluant est dirigé directement vers la face frontale. La fraction massique de CO₂ au sol amont est de l'ordre de 1 E-2. La fraction massique de CO₂ déposée au sol en aval de l'obstacle pour cette configuration est de l'ordre de 6.E-7 car la partie inférieure du panache est piégée dans cette zone.

La fraction massique de CO₂ déposée au niveau du toit de l'obstacle est de l'ordre de FCO₂=6.8 E-3. Cette valeur est inférieure à celle obtenue dans le cas d'un obstacle de hauteur 9 cm. On note que la distance d'impact du polluant est plus grande que celle obtenue pour le cas d'un obstacle de 9 cm.

On peut conclure que plus la hauteur de l'obstacle est importante plus la distance d'impact de polluant est importante.

Le tableau 2 affirme d'avantage ce qu'on a décrit sur la figure 4. La fraction massique de CO₂ déposée au niveau du sol et aux alentours de l'obstacle est plus importante pour h=15cm..

	h=5cm	h=9cm	h=15cm
Mass fraction of CO ₂ present at the ground	1.02 E-5	7.81 E-5	4.1 E-4
Mass fraction of CO ₂ present at different faces of the building	3.61 E-5	3.9E-4	1.89 E-2

Tableau 2. Effet de la hauteur de l'obstacle

Conclusion

La partie expérimentale de ce présent travail nous a permis de mettre en évidence l'influence de la présence d'un obstacle de forme parallélépipédique sur la dispersion des polluants éjectés par une cheminée coudée. En effet une fois l'écoulement rencontre l'obstacle il le contourne et passe aux alentours de ses faces, on note ainsi la naissance d'une zone de recirculation en aval de l'obstacle.

Dans une deuxième partie nous avons étudié le transfert massique de l'écoulement éjecté par la cheminée et contenant une fumée non réactive et soumis à un gradient de température $\Delta T = 100$ K en présence d'un obstacle de hauteur variable.

Il a été déduit que lorsque la hauteur de l'obstacle est moins élevée que celle de la cheminée on a une meilleure dilution et diffusion des polluants dans l'atmosphère avant de se rabattre au sol.

Références

[1]: G. Salaun penquer et al. (1984), expérimentation en soufflerie pour vérification et adaptation des coefficients intervenant dans le modèle mathématique de la dispersion des effluents dans l'atmosphère, Rapport env. N° XII.

[2]: Alan H. Huber (1989), the influence of building width and orientation on plume dispersion in the wake of building. *Atmospheric Environment* vol. 23, N°10, 2109-2116.

[3]: M.H.Mirzai, Wind tunnel investigation of dispersion of pollutants due to wind flow around a small building, *Atmospheric Environment* vol. 28, N°11, 1819-1826, 1994.

[4]: Marvoidis, I., Griffiths, R.F., Hall, D.J., 2003 Fields and wind tunnel investigation of plume dispersion around single surface obstacles. *Atmospheric Environment* 37, 2903-2918.

[5]: Mahjoub. Said., N., Mhiri, H., El Golli, S., Le Palec, G., Bournot, P., Three dimensional experimental and numerical modelling of flow behaviour near wake of circular cylinders *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*