

Caractérisation expérimentale d'un panache de contaminant passif au-dessus d'une source thermique. Efficacité de captage d'une hotte d'aspiration.

René DEVIENNE², Jean Raymond FONTAINE¹, Jérémie KICKA¹

¹ Département Ingénierie des Procédés, Institut National de la Recherche et de la Sécurité, Avenue de Bourgogne, BP 27, 54501 Vandoeuvre Lès Nancy Cedex, France

² LEMTA, CNRS UMR 7563

2, avenue de la Forêt de Haye, BP 160, 54504 Vandoeuvre Lès Nancy Cedex, France
auteur correspondant.Rene.Devienne@ensem.inpl-nancy.fr

Résumé

De nombreux procédés industriels utilisent ou génèrent des sources chaudes. Les dégagements de chaleur s'accompagnent généralement d'une dispersion de polluants dans l'enceinte de travail et peuvent provoquer à long terme chez les salariés des maladies professionnelles. La caractérisation des panaches des sources thermiques formés par convection naturelle est nécessaire au dimensionnement des installations de ventilation (hotte ou ventilation par déplacement d'air) afin d'assainir les ambiances de travail.

Nomenclature

| | | | |
|-----------------------|-------------------------------------|-----------------------|--|
| a,b | demi-grands axes, m | x_0, y_0 | coordonnées du centre du panache, m |
| C_1, C'_1, C_2, C_3 | concentration du traceur, ppm | <i>Symboles grecs</i> | |
| m_c, m_e | débits massiques, kg/s | η | efficacité moyenne |
| Q | débit emporté par la hotte, m^3/s | | |
| $Q_{\text{hélium}}$ | débit d'hélium m^3/s | | |
| r_D | rapport de débits | θ | angle d'inclinaison de l'ellipse, $^\circ$ |
| T_s | température de source, $^\circ C$ | | |

1. Introduction

Dans un milieu fluide dont la masse volumique est thermodépendante, toute source de chaleur va engendrer la formation d'un panache ascendant par convection naturelle. Ce panache va nécessairement emprunter au milieu ambiant le débit qui lui correspond, entraînant ainsi divers polluants ou particules en suspension. Il est donc d'un grand intérêt pratique de pouvoir caractériser le développement d'un panache thermique.

Une méthode expérimentale permettant de décrire le panache développé au-dessus d'une source thermique bidimensionnelle est présentée. Un traceur passif, à savoir de l'hélium est injecté au niveau de la surface chaude simulant ainsi l'existence et le transport d'un polluant. Les distributions de température, de vitesse et de concentration en polluant dans une section horizontale du panache, mesurées par une batterie de thermocouples, de sondes thermoanémométriques ou de capteurs de concentration répartis sur une matrice, sont modélisées par une approximation mathématique gaussienne elliptique. La méthode est illustrée pour la caractérisation des panaches thermiques, dynamiques et massiques générés par une source rectangulaire modulable. La mise en place d'une hotte de captage de polluant

au dessus de la source thermique permet la caractérisation du panache obtenu ainsi que la détermination de l'efficacité de captage par la méthode expérimentale du traçage gazeux à l'hélium.

2. Matériels et méthodes

2.1. La cellule expérimentale

La cellule aéraulique, d'une surface de base de $4,8 \times 4,2 \text{ m}^2$ et d'une hauteur de 5,6m, est contenue dans un caisson de hauteur totale 7,4m. En partie basse, elle est limitée par un faux plancher perforé et en partie haute par un faux plafond également perforé. La ventilation de la cellule reliée à une centrale de traitement de l'air est raccordée par 4 gaines de soufflage de diamètre 400mm en textile perforé, en dessous du sous-plancher. La reprise est assurée en partie haute de la cellule par 3 gaines de ventilation raccordées à la centrale d'air. Cette centrale de traitement d'air est constituée d'une batterie de refroidissement, d'une batterie de chauffage et d'un ventilateur. Un dispositif de régulation permet d'ajuster le débit de ventilation entre 2 000 et 10 000 m^3/h et la température de soufflage entre 18°C et 25°C . La batterie de refroidissement possède une puissance maximale de 18 kW.

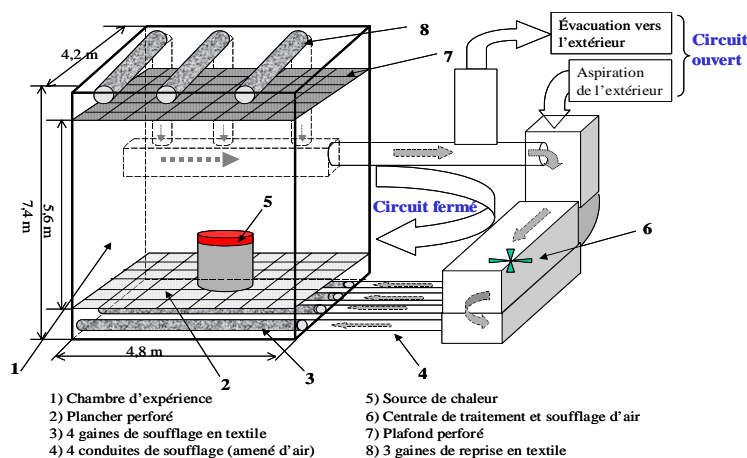


Figure 1 : La cellule expérimentale

2.2 La source thermique

La source thermique est constituée par l'assemblage de deux modules de dimension $1,50 \text{ m} \times 0,25 \text{ m}$. Seule la face supérieure des sources, située à une hauteur de $0,75 \text{ m}$ au-dessus du plancher inférieur, peut être portée à une température ajustable.

2.3 La hotte de captage

La base de la hotte de captage est constituée d'un carré de $1,5 \text{ m}$ de côté, placé au-dessus de la source thermique à hauteur variable. A $0,4 \text{ m}$ au-dessous de cette hotte se trouve un bras articulé supportant les différentes sondes de vitesse, de température et de concentration.

2.4 Description du modèle utilisé

La détermination des débits d'air en conduits et des efficacités de captage du dispositif d'aspiration localisée est effectuée conformément aux normes NFX 10-141 et EN 1093-4 [1]. Le débit d'air aspiré par la hotte Q est calculé à partir de la relation :

$$Q = \frac{Q_{\text{hélium}}}{C_2 - C_1} \quad (1)$$

où $Q_{\text{hélium}}$ désigne le débit d'hélium injecté au niveau de la source

L'efficacité moyenne de captage d'un système d'aspiration est définie comme le rapport du débit massique de polluant directement capté (m_c) au débit massique de polluant émis (m_e) :

$$\eta = \frac{m_c}{m_e} \quad (2)$$

Les mesures de débits peuvent être amenées à des mesures de concentrations telles que :

$$\eta = \frac{C_3 - C_1'}{C_2 - C_1} \quad (3)$$

C_1', C_1 : concentration moyenne de traceur en ambiance en absence de toute génération (avant et après génération)

C_2 : concentration moyenne du traceur dans le conduit d'aspiration lorsqu'il est totalement généré dans celui-ci (concentration de référence)

C_3 : concentration moyenne du traceur dans le conduit lorsque celui-ci est généré au poste de travail et simule l'émission, du polluant (mesure en configuration de travail)

Pour ce qui est de notre dispositif expérimental, nous sommes placés dans une situation intermédiaire relativement aux deux cas théoriquement connus (source linéaire et ponctuelle) [2] et [3] : de ce fait, nous proposons une modélisation des champs dynamique, thermique et massique de la forme :

$$\Delta F(x, y, z) = \Delta F_c(z) e^{-f(x,y)} \quad (4)$$

où ΔF désigne l'écart de température, la composante verticale de vitesse du panache ou l'écart de concentration en polluant.

$f(x, y)$ étant une fonction de x et y telle que [4] [5] :

$$f(x, y) = (x - x_0)^2 \left(\frac{\cos^2 \theta}{b^2} + \frac{\sin^2 \theta}{a^2} \right) + (y - y_0)^2 \left(\frac{\sin^2 \theta}{b^2} + \frac{\cos^2 \theta}{a^2} \right) + (x - x_0)(y - y_0) \sin 2\theta \left(\frac{1}{b^2} - \frac{1}{a^2} \right) \quad (5)$$

Pour un plan de cote z donnée, les lignes isothermes (ou iso-vitesse ou iso-concentration) sont naturellement des ellipses centrées sur le point (x_0, y_0) , de demi-axes a et b , comme indiqué sur la figure 2.

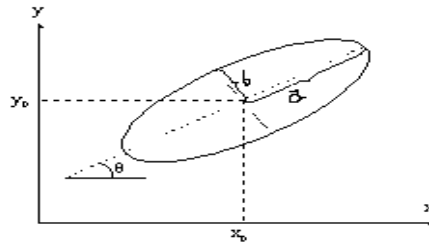


Figure 2 : Définition des paramètres géométriques d'une ligne iso-vitesse, à une cote fixée

3. Résultats

3.1 Représentation des iso-concentrations avec le modèle gaussien elliptique

A partir des résultats expérimentaux et moyennant la programmation de l'équation (5), un solveur numérique permet la détermination des paramètres du modèle, un approche au sens des moindres carrés étant privilégiée. Un exemple de détermination des caractéristiques du panache de concentration (panache massique) est fourni par le tableau I. les paramètres du modèle gaussien elliptique étant connus, les lignes d'iso concentrations en hélium peuvent être aisément tracées, voir figure 3 .

| Z (m) | Θ (°) | x ₀ (m) | y ₀ (m) | a (m) | b (m) | ΔC (ppm) |
|-------|-------|--------------------|--------------------|-------|-------|----------|
| 1,25 | 93,29 | 0,12 | 0,123 | 0,51 | 0,23 | 215,8 |
| 1,5 | 92,71 | 0,143 | 0,092 | 0,49 | 0,28 | 182,5 |
| 1,75 | 91,67 | 0,124 | 0,096 | 0,51 | 0,33 | 156,5 |
| 2 | 92,98 | 0,123 | 0,069 | 0,5 | 0,35 | 138,3 |
| 2,25 | 91,79 | 0,164 | 0,068 | 0,51 | 0,35 | 121,9 |
| 2,5 | 88,29 | 0,131 | 0,062 | 0,52 | 0,38 | 107,6 |
| 2,75 | 90,33 | 0,155 | 0,056 | 0,52 | 0,4 | 98,2 |
| 3 | 92,87 | 0,164 | 0,077 | 0,53 | 0,44 | 95,2 |
| 3,16 | 89,66 | 0,149 | 0,051 | 0,54 | 0,45 | 86,4 |

Tableau I Caractéristiques du panache de concentration

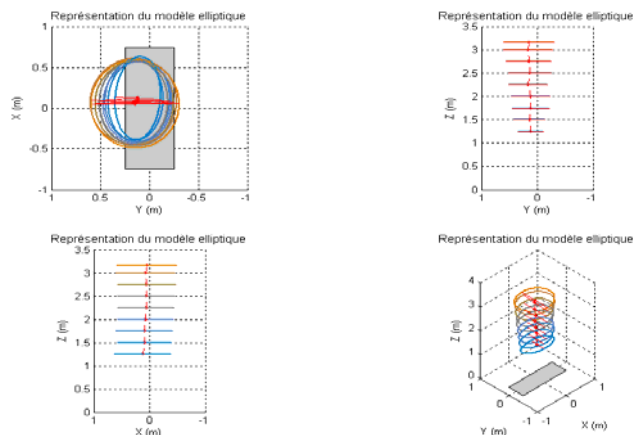


Figure 3 : Modèle elliptique et projection des iso-concentrations sur les plans (x, y) et (y, z)

D'une manière générale, l'évolution des paramètres du modèle gaussien elliptique appliquée au champ des concentrations est caractérisée par les points suivants:

- Il existe un décalage peu important (12cm suivant y et négligeable suivant x) du centre du panache relativement au centre de la source
- Les directions principales des ellipses d'iso concentration coïncident avec les directions des axes de symétrie de la source.
- Dans le domaine testé ($0 < z < 3.16$ m), le rayon massique b, dirigé suivant l'axe y, croît linéairement en fonction de la cote alors que le rayon a, dirigé suivant l'axe x, demeure pratiquement constant en fonction de la cote.
- Le panache est stable d'un point de vue spatial.

3.2 Modélisation de la courbe d'efficacité en fonction du débit d'air aspiré par la hotte

La formule 5 appliquée aux champs des vitesses permet de calculer le débit d'air emporté par le panache à différentes cotes.

Le rapport r_D du débit d'air aspiré par la hotte au débit du panache apparaît comme un paramètre permettant une modélisation simple de l'efficacité moyenne de captage [6].

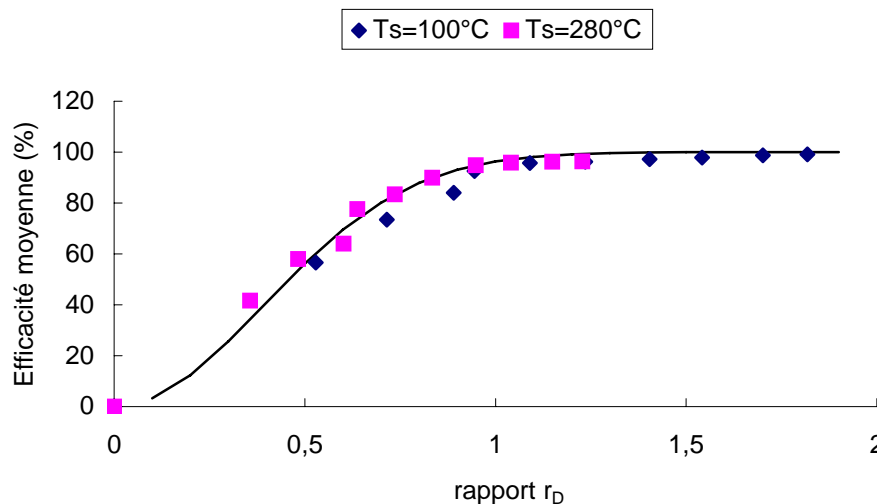


Figure 4 : Modélisation de la courbe d'efficacité en fonction du rapport r_D pour 2 températures de source $T_s=100^\circ\text{C}$ et $T_s=280^\circ\text{C}$

Sur la figure 4, les valeurs de l'efficacité sont reportées en fonction de ce rapport, les points correspondant aux deux températures de source $T_s=100^\circ\text{C}$ et $T_s=280^\circ\text{C}$ se regroupent en une courbe unique qui peut être approchée par l'équation $\eta=1-\exp(-3.3r_D^2)$, approximation testée dans le domaine $0.3 < r_D < 2$.

4. Conclusion

Cet article présente la caractérisation expérimentale, par la méthode du traçage gazeux à l'hélium, du transport d'un contaminant passif au-dessus d'une source thermique. Les résultats montrent que les distributions de concentration en polluant (hélium), de vitesse et de température d'air sont similaires et peuvent être approximées par une fonction gaussienne elliptique : dans chaque plan horizontal les iso-concentrations, les iso-vitesses et les isothermes sont des ellipses.

Une hotte de captage a été placée au-dessus de la source à une hauteur donnée. L'efficacité de captage du dispositif a été déterminée par la méthode du traçage gazeux à l'hélium ; elle représente la fraction du débit de traceur émis au niveau de la source captée par la hotte.

Le débit d'air emporté par le panache à une cote donnée apparaît comme une grandeur fondamentale pour la caractérisation des performances d'un système de captage. En effet son efficacité est maximale dès que le débit d'air aspiré par la hotte à une cote z est égal au débit d'air emporté par le panache à la même cote (rapport r_D proche de 1).

La méthode par traçage gazeux à l'hélium n'est cependant pas optimale pour évaluer des efficacités de captage proche de 100% à cause du bruit de fond généré par la concentration résiduelle en hélium dans l'air qui est de l'ordre de 5ppm. Dans ce cas, l'utilisation du SF₆ (hexafluorure de soufre absent dans l'air) comme gaz traceur serait plus appropriée.

Références

- [1] NF EN 1093-4 (1996), *Sécurité des machines- Evaluation de l'émission de substances dangereuses véhiculées par l'air*, partie 4 : Efficacité de captage d'un système d'aspiration- Méthode de traçage
- [2] Morton BR (1958) *Forced plumes* J. Fluid Mech 5 : 151-163
- [3] Morton BR, Taylor FRS and Turner JS (1956) *Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources* . Pro Roy Soc A 234 , 1-23
- [4] Blaise J (2008) *Influence de la géométrie d'une source thermique sur le développement du panache*, thèse de l'Université Henri Poincaré, Nancy, France
- [5] Fontaine J.R., Devienne R., Rose S (2006) - *Numerical simulation and experimental validation of plume flow from a heated disk*. *Numerical Heat Transfer, Part A Applications*, Vol 50, N°7, pp. 645-666
- [6] Bender M (1979) Fume Hoods, open canopy types. *Their ability to capture pollutants in various environments* Am. Industrial Hygiene Assoc. J. 40, pp 118-127