

Localisation de la position d'une source en transfert de masse par diffusion-advection turbulente par une méthode de transmittances

Talel MAALEJ^{1,2}, Francis BONTHOUX^{1,3}, Jean-Raymond FONTAINE^{1,3}, Manuel GIRAULT⁴, Denis MAILLET^{1,2}

¹Laboratoire de Modélisation et de Prévention de la Pollution, unité mixte CNRS-INRS

²Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée, Nancy-Université & CNRS, Vandoeuvre-lès-Nancy

³Institut National de Recherche et de Sécurité, Vandoeuvre-lès-Nancy

⁴Laboratoire d'Etudes Thermiques, UMR 6608 CNRS & ENSMA, Futuroscope-Chasseneuil du Poitou (auteur correspondant : talel.maalej@inrs.fr)

Résumé - Nous considérons ici le problème de l'intensité et de la position d'une source de polluant en écoulement turbulent en convection forcée à partir des réponses transitoires en concentration de plusieurs capteurs. L'application d'une méthode d'inversion d'un modèle réduit, développé précédemment, à la vidange d'une chambre à sable est présentée (estimation de l'intensité d'une source) et nous proposons une méthodologie destinée à estimer également la position de celle-ci à partir des mesures de transmittances entre capteurs.

Nomenclature

S	source de polluant, $kg.s^{-1}$	u	vitesse, $m.s^{-1}$
D	coefficient de diffusion, $m^2.s^{-1}$	r_i	rayon vecteur du capteur en P_i , m
C	concentration du modèle, $kg.m^{-3}$	r_s	rayon vecteur de la source en P_s , m
Y	concentration mesurée, $kg.m^{-3}$	Z	impédance temporelle, $s.m^{-3}$
nts	nombre de pas de temps	W	transmittance
Δt	pas de temps de simulation, s	H	fonction de Heaviside
-	indice de Laplace		

1. Introduction

Beaucoup de corps de métiers sont exposés à des risques de contamination en dépit de la ventilation des locaux ; c'est le cas en particulier des égoutiers qui peuvent être confrontés à des concentrations en polluant (H_2S) très élevées. Nous nous intéressons ici au procédé de vidange d'une chambre à sable par un camion pompe, dont une des phases émettrice en H_2S consiste à refouler, après décantation les effluents liquides dans la chambre, avec rejet de H_2S . Des mesures transitoires de concentrations ont été effectuées lors de cette phase.

Nous allons présenter les résultats d'estimation de l'intensité de la source supposée ponctuelle et de position connue, à partir de l'inversion d'un modèle réduit, ce dernier étant au préalable construit par réduction d'un modèle numérique plus fin de diffusion-advection turbulente (Méthode MIM [1, 2, 3]).

Dans un deuxième temps, nous allons nous focaliser sur le problème de l'identification de la position de cette source, à partir d'un modèle semi-analytique de transmittances entre capteurs. Ces transmittances étant estimées au préalable à partir des concentrations mesurées.

2. La cellule de simulation

D'une longueur de 32 m, la chambre à sable souterraine (profondeur de 31,9 m) est un élargissement du réseau d'assainissement qui permet un dépôt des sédiments dans une fosse facilement accessible. La chambre équipée d'un by-pass permet de dévier le flux pendant les opérations de vidange. Le canal principal, d'une largeur d'environ 3 m, est équipé de passage piéton sur les deux côtés.

La chambre à sable est équipée de trois tampons d'entrées d'air (tampon A, tampon D et tampon C) qui sont directement en contact avec l'air atmosphérique, d'un by-pass pour dévier l'eau et la boue au moment de l'intervention et des entrées d'air (entrée E et entrée F) correspondant au raccordement de la chambre avec le reste du réseau.

Un quatrième tampon B, situé au milieu de la chambre à sable, est utilisé pour extraire l'air. L'aspiration est effectuée par deux ventilateurs : le premier (section annulaire B') est placé au-dessus de la sortie d'air pour rejeter l'air aspirée dans l'atmosphère, le deuxième (section circulaire centrale B'') est une ventilation par tuyau à l'intérieur de la chambre. La Figure 1 présente la géométrie de la chambre à sable.

3. Outil de simulation

La simulation numérique en 3 D transitoire a été effectuée à l'aide du solveur Fluent après utilisation du maillage Gambit (530000 noeuds). Un modèle de turbulence $k - \varepsilon$ standard a été utilisé pour produire les cartes de vitesse et de concentration. On a supposé que la source quasi-ponctuelle était localisée à l'intersection de la galerie du by-pass et de la chambre principale au voisinage et l'entrée E (voir la figure 1) et était provoquée par le refoulement en eau du camion-pompe. Les conditions aérauliques sont données dans le tableau 1.

4. Résultats de simulation

La modélisation directe du phénomène de transport de polluant est effectuée pour une entrée en échelon de valeur $S(t) = 0.2 \text{ kg/s}$. Les courbes de concentration de sortie du modèle en 5 points sont présentées en figure 2 (pas de temps $\Delta t = 5 \text{ s}$ et $nts = 200$ pas de temps).

La figure 1 montre l'effet de la ventilation sur la dispersion de la concentration du polluant traceur à l'intérieur du volume; on remarque que le capteur 1, très proche de l'entrée d'air, affiche une concentration faible par rapport aux autres courbes. Le capteur 3, placé entre la source et la sortie du polluant, est associé à la concentration la plus importante. Le capteur 5, placé à la sortie du tuyau d'aspiration, affiche une concentration plus importante que le capteur 4 placé dans la tourelle d'aspiration. Les réponses théoriques de la figure 2 ont été utilisées pour construire un modèle réduit d'ordre 4 [1].

L'inversion du modèle réduit par la Méthode d'Inversion Modale (MIM) permet d'estimer l'intensité d'émission de la source de polluant à partir des vraies mesures (Figure 3) effectuées pour des capteurs placés aux mêmes points que dans la simulation précédente. On remarque que l'intensité de la source estimée (Figure 4) présente des pics de concentration en avance par rapport aux pics mesurés par les capteurs, ce décalage correspond à $FTS = 20$ pas de temps futur (Méthode de régularisation de J.V.Beck). Même si l'intensité a pu être estimée, nous avons un doute sur la position exacte de cette source. Une méthode permettant de vérifier ou de calculer la position de la source [4, 5, 6] serait très utile.

5. Principe de la méthode des transmittances

Nous visons maintenant, par la méthode des transmittances, à estimer la position d'une source ponctuelle unique à partir de la réponse de n capteurs. Il s'agit donc, dans un premier temps, d'estimer les $(n-1)$ transmittances entre les $(n-1)$ réponses expérimentales et la réponse d'un capteur pris comme référence, en 'court-circuitant l'intensité de la source' c'est un problème d'identification par déconvolution de signaux expérimentaux. Une fois les transmittances estimées, celles-ci doivent être comparées à des modèles réduits de transmittances issus d'une équation d'advection-diffusion à coefficients (vitesse et diffusivité) uniformes en espace et constants en temps, (problème inverse non-linéaire de localisation de la source). Les hypothèses correspondantes sont alors les suivantes :

- le domaine Ω est limité par la frontière $\partial\Omega$
- la source localisée en $P_s(\mathbf{r}_s)$ est une source ponctuelle d'intensité $S(t)$ avec $\mathbf{r}_s = 0$
- les capteurs de concentration en $P_1(\mathbf{r}_1)$ et $P_2(\mathbf{r}_2)$ produisent les concentrations $Y_1 = C_1 + \varepsilon_1$ et $Y_2 = C_2 + \varepsilon_2$, où ε_1 et ε_2 sont les bruits de mesure et \mathbf{r}_i le rayon vecteur du point P_i
- les conditions aux limites et initiales sont homogènes sur la frontière $\partial\Omega$.

5.1. Estimation des transmittances

Comme le système (équation de transport et les conditions aux limites) est linéaire à coefficient constant dans le temps (mais pas dans l'espace), on peut écrire la relation en Laplace qui relie la source et le capteur à l'aide d'une impédance opérationnelle :

$$\bar{C}_1(p) = \bar{Z}_1(p, r_1, r_s) \bar{S}(p) \quad ; \quad \bar{C}_2(p) = \bar{Z}_2(p, r_2, r_s) \bar{S}(p) \quad (1)$$

Si l'on suppose que le signal $C_1(t)$ du capteur 1 décolle le premier, on élimine la source en effectuant le rapport des deux relations précédentes et on obtient la relation suivante:

$$\bar{C}_2(p) = \bar{W}_{21}(p, r_1, r_2, r_s) \bar{C}_1(p) \quad \text{avec} \quad \bar{W}_{21} = \bar{Z}_2(p, r_2, r_s) / \bar{Z}_1(p, r_1, r_s)$$

Ceci peut s'écrire à l'aide d'un produit de convolution:

$$C_2(t) = \int_0^t W_{21}(t-t') C_1(t') dt' = \int_0^t C_1(t-t') W_{21}(t') dt' = W_{21}(t) * Y_1(t) \quad (2)$$

Une fois la déconvolution effectuée de (2) à partir de $C_1(t)$ et $C_2(t)$ ou de leurs versions bruitées $Y_1(t)$ et $Y_2(t)$, on dispose d'une estimation de la transmittance $W_{21}(t)$. Il est possible de répéter l'opération sur les capteurs P_1 et P_j et d'obtenir les autres transmittances. Nous allons noter maintenant $W_j(t) = W_{j1}(t)$.

5.2. Exploitation des transmittances

Nous allons comparer chaque transmittance $W_{j1}(t)$ à la transmittance issue du modèle réduit de transport (3) où l'axe x_j est défini par les points P_s (origine) et P_i , où l'on a $P_s P_j = r_j$ (voir Figure 5) et :

$$D_j \frac{\partial^2 C}{\partial x_j^2} - u_j \frac{\partial C}{\partial x_j} + S(t) \delta(x_s) = \frac{\partial C}{\partial t} \quad ; \quad C = 0 \quad \text{à} \quad t = 0 \quad ; \quad C \rightarrow 0 \quad \text{quand} \quad x_j \rightarrow \pm\infty \quad (3)$$

Ici, u_j est une vitesse positive constante et D_j le coefficient de diffusion constant. Il est possible d'écrire cette équation dans le domaine de Laplace et d'obtenir une impédance $Z_j^{red}(t, r_j, u_j, D_j)$ entre $S(t)$ et la réponse $C_j(t)$ en $x_j = r_j$. En faisant de même en $x_1 = r_1$, on en déduit une transmittance réduite $W_j(t, r_1, r_j, u_1, u_j, D_1, D_j)$ et une estimation des paramètres peut être effectuée par comparaison aux transmittances W expérimentales estimées à l'étape précédente.

6. Mise en œuvre de l'identification des transmittances

Nous nous plaçons dans le cas où le capteur de référence est celui qui décolle le premier (il s'agit du capteur 1 dans la Figure 2), le capteur 2 étant un des capteurs restants.

Pour l'échantillonnage de la courbe de référence $C_1(t)$, on suppose à $t = 0$ la courbe de concentration $C_1(t)$ est nulle : elle décolle à partir de $t = t_1$. On écrit la courbe de référence $C_1(t)$ sous forme d'une fonction constante par morceaux sur une base de fonctions créneaux unitaires avec $t_k = k \Delta t$:

$$C_1(t) = \sum_{k=1}^{r(t)} C_{1k} (H(t-t_{k-1}) - H(t-t_k)) \quad (4)$$

On fait de même pour $W_{21}(t)$ notée ici $W_2(t)$: $W_2(t) = \sum_{k=1}^{r(t)} W_{2k} (H(t-t_{k-1}) - H(t-t_k))$ où H est la fonction de Heaviside, l'indice étant défini par $r(t) = E(t/\Delta t) + 1$ (E est la partie entière et Δt le pas de temps d'acquisition). C_{1k} et W_{2k} constituent le paramétrage de C_1 et C_2 qui s'écrivent : $C_{1k} = (1/\Delta t) \int_{t_{k-1}}^{t_k} C_1(t) dt$ et $W_{2k} = (1/\Delta t) \int_{t_{k-1}}^{t_k} W_2(t) dt$.

La variation temporelle de la concentration $C_2(t)$ qui décolle après la courbe $C_1(t)$ est donnée par la convolution avec $C_{2i} = C_2(t_i)$ (valeur échantillonnée) et $i = 1 \dots nts$:

$$C_{2i} = \sum_{j=1}^i C_{1,i+1-j} W_{2j} \Delta t \quad (5)$$

On écrit cette dernière équation sous la forme matricielle suivante : $C_2 = \mathbf{M}(C_1)W_2$

$$C_2 = \begin{pmatrix} C_{21} \\ C_{22} \\ \vdots \\ C_{2nts} \end{pmatrix}, \quad W_2 = \begin{pmatrix} W_{21} \\ W_{22} \\ \vdots \\ W_{2nts} \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \mathbf{M}(\mathbf{z}) = \Delta t \begin{pmatrix} z_1 & 0 & \cdots & 0 \\ z_2 & z_1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & z_2 & \ddots & \\ z_{nts-1} & \vdots & \ddots & z_1 & 0 \\ z_{nts} & z_{nts-1} & \cdots & z_2 & z_1 \end{pmatrix}$$

où nts est le nombre temps de mesures.

Si nous effectuons des mesures Y_2 de C_2 , l'estimateur des moindres carrés ordinaire nous permet d'écrire la transmittance sous la forme suivante :

$$\widehat{W}_2 = (\mathbf{M}(C_1))^T \mathbf{M}(C_1)^{-1} \mathbf{M}^T(C_1) Y_2 \quad (6)$$

Nous présentons en figure 6 l'estimation des 4 courbes de transmittance obtenues par déconvolution des signaux simulés non bruités ($Y_i = C_i$) de la figure 2.

	Entrées Fluent	Sortie Fluent
Sortie tuyau de ventilation B''	$V = 14.85 \text{ m/s}$	$Q_v = 3650 \text{ m}^3 / \text{h}$
Sortie tourelle d'aspiration B'	$V = 7.5 \text{ m/s}$	$Q_v = 5724 \text{ m}^3 / \text{h}$
Entrée E	$V = 0.25 \text{ m/s}$	$Q_v = 846 \text{ m}^3 / \text{h}$
Entrée F	$V = 0.1 \text{ m/s}$	$Q_v = 2120 \text{ m}^3 / \text{h}$
Entrée A	$P = 0 \text{ Pa}$	$Q_v = 2520 \text{ m}^3 / \text{h}$
Entrée D	$P = 0 \text{ Pa}$	$Q_v = 1972 \text{ m}^3 / \text{h}$
Entrée C	$P = 0 \text{ Pa}$	$Q_v = 1890 \text{ m}^3 / \text{h}$

Tableau 1 : Conditions aéraulique et résultats de simulation

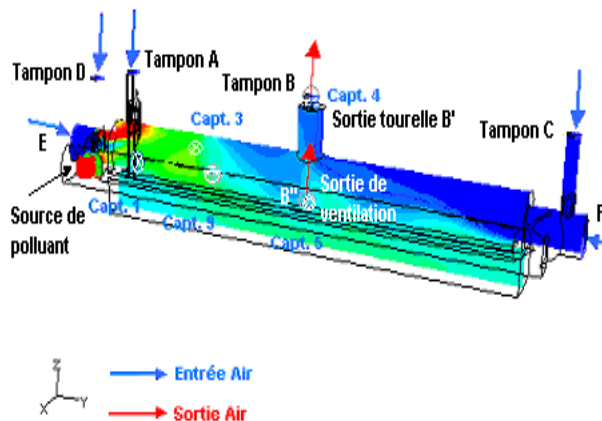


Figure 1 : Génération et distribution du polluant à l'intérieur de la chambre à sable

7. Conclusion

Nous avons appliqué à des mesures de concentration dans une chambre à sable une technique inverse d'estimation d'intensité de source ponctuelle de polluant à l'aide d'un modèle réduit construit à partir d'un modèle détaillé (numérique) de diffusion-advection turbulente. Le problème de la position exacte de la source est un facteur critique auquel nous cherchons à apporter une solution par une nouvelle méthode basée sur les transmittances.

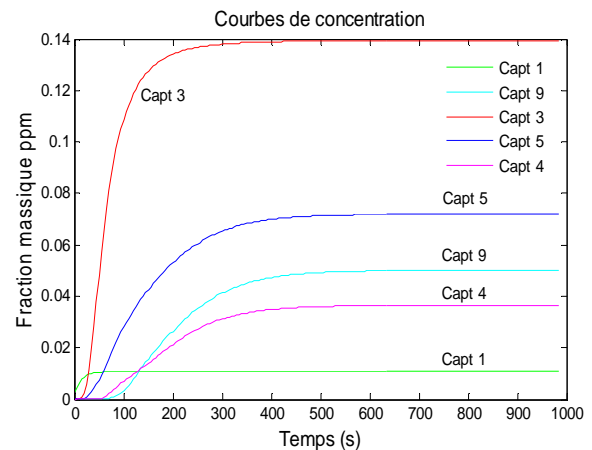


Figure 2 : Courbes de concentration des capteurs de polluant

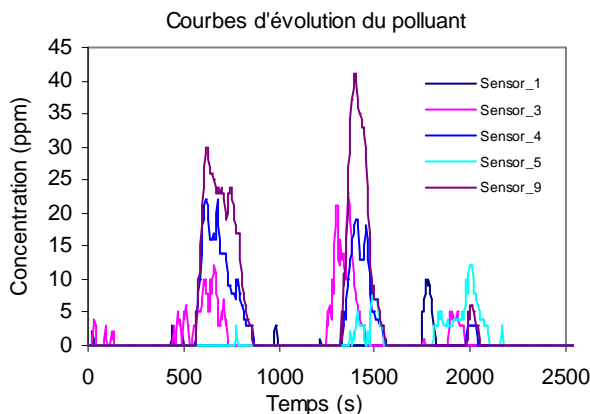


Figure 3 : Courbes d'évolution du polluant H_2S

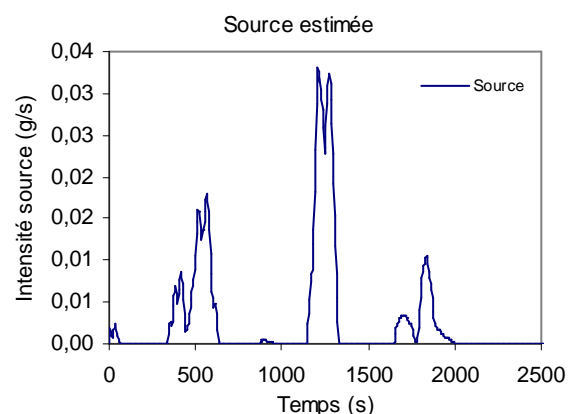


Figure 4 : Source estimée par la méthode MIM

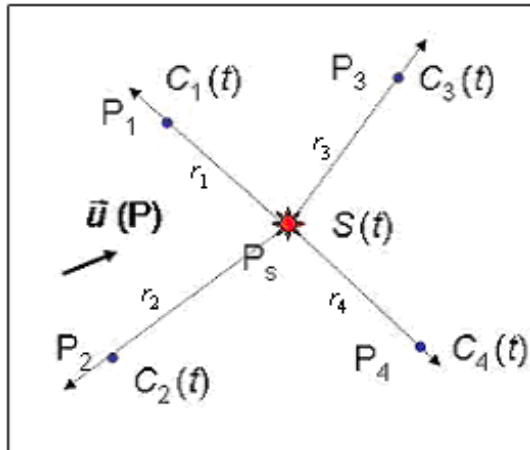


Figure 5 : Méthode des transmittances

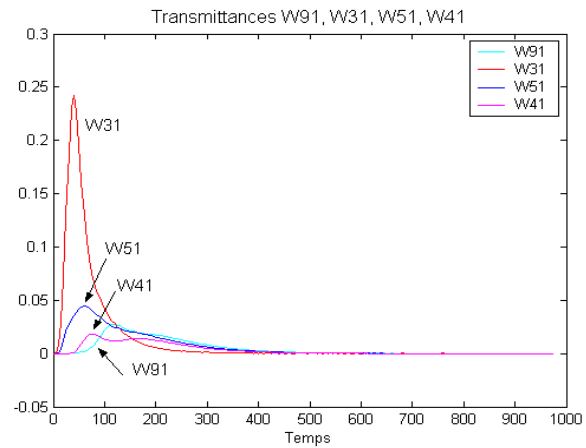


Figure 6 : Courbes des transmittances

Références

- [1] M. Girault, D. Maillet, J.-R. Fontaine, R. Braconnier, F. Bonthoux. Estimation of time-varying gaseous contaminant sources in ventilated enclosures through inversion of a reduced model, *International Journal of Ventilation*, vol. 4, n°4, pp. 365-380, march 2006.
- [2] M. Girault, D. Maillet, F. Bonthoux, B. Galland, P. Martin, R. Braconnier, J.-R. Fontaine. Estimation of time-varying pollutant emission rates in a ventilated enclosure: inversion of a reduced model obtained by experimental application of the Modal Identification Method, *Inverse Problems*, vol. 24, Issue 1, 01 5021, 22 pages, february 2008.
- [3] M. Girault, D. Maillet, Y. Rouizi, Y. Favennec, D. Petit. Estimation of position and time-varying intensity of a heat source using reduced models built with the Modal Identification Method, Communication n°47, 6th International Conference on Inverse Problems in Engineering: Theory and Practice, ICIPE 2008, Dourdan, June 16-19, 2008, to be published in *Journal of Physics: Conference Series*.
- [4] X. Liu, Z. Zhai. Inverse modelling methods for indoor airborne pollutant tracking: literature review and fundamentals, *Indoor Air 2007*; 17; 419-438
- [5] T. Zhang, Q. Chen. Identification of contaminant sources in enclosed spaces by a single sensor, *Indoor Air 2007*; 17; 439-449
- [6] T. F. Zhang, Q. Chen. Identification of contaminant sources in enclosed environments by inverse CFD modelling, *Indoor Air 2007*; 17; 167-177