

POINT DE REPÈRE

MESURE DES DÉBITS D'AIR EN CONDUIT - INCERTITUDE LIÉE AU NOMBRE ET À LA POSITION DES POINTS DE MESURES

► Francis BONTHOUX,
INRS, département Ingénierie des procédés
► Jean-Raymond FONTAINE,
INRS, département Ingénierie des procédés

La réduction des expositions aux polluants atmosphériques est souvent assurée par la mise en œuvre d'un débit d'air (captage des polluants, apport d'air neuf...). Le contrôle des débits prescrits est généralement réalisé par intégration des vitesses dans la section d'un conduit. Les normes associées à cette mesure sont rarement applicables aux réseaux de ventilation en raison des faibles longueurs droites disponibles et ne fournissent pas d'éléments permettant d'estimer les incertitudes dans ces conditions opératoires dégradées. Les travaux présentés ici, basés sur l'étude paramétrique de tronçons de réseau de ventilation présentant des singularités (coudes, Y, registre...), complètent ces normes en apportant un modèle empirique d'estimation de l'incertitude. Il prend en compte la distance entre le plan de mesure et la singularité, le nombre de traverses et le nombre de points par traverse. Au-delà de la connaissance de l'incertitude de mesure, ce modèle permet d'optimiser le nombre de points de mesure en fonction de la configuration du réseau de ventilation.

Les préconisations contenues dans les normes ISO 3966 (10-112) et ISO 7145 (X10-113), relatives aux mesures des débits de fluide dans les conduites fermées par tube de Pitot, permettent d'obtenir une erreur limite sur le débit inférieure à 2 %. Sur site, ces préconisations sont peu applicables, la géométrie de l'installation n'offrant que rarement les longueurs droites nécessaires pour réaliser les mesures. Par ailleurs, le plus souvent l'hygiéniste ne recherche pas une telle précision pour établir son diagnostic, 5 % suffisent.

Dans l'ISO 3966 [1], le débit est estimé avec un minimum de 12 points de mesure pour les conduits circulaires et 25 pour les conduits rectangulaires ; la méthode est alors fastidieuse à mettre en œuvre. La norme ne fournit pas directement de contraintes quant aux longueurs droites, mais indique que la section de mesure doit se trouver loin de toutes perturbations pouvant créer des turbulences ou des dissymétries dans l'écoulement (en théorie au moins 40 D, en pratique au moins 8 D).

L'ISO 7145 [2] propose une méthode de mesure en un seul point. Le point de mesure pouvant se trouver, soit au centre du conduit, soit à la distance de $0,121 D$ de la paroi, là où, pour un écoulement turbulent établi, la vitesse correspond à la vitesse débitante (ou vitesse moyenne dans la section) (cf. Figure 1). Cette norme indique les distances minimales à respecter en aval de la perturbation en fonction du type de singularité. Elles varient de 30 à 80 D pour la méthode « $0,121 D$ », valeurs rarement rencontrées sur site.

La norme indique que la mesure au centre n'est possible que si l'on possède un étalonnage préalable du facteur de conduit (Pipe factor). Ce ratio, égal à U_d / U_c , dépend entre autres du Reynolds et de la rugosité du conduit et, si elles sont proches, des singularités.

Pour un conduit « lisse » (cas des conduits industriels), les valeurs pour un profil établi sont indiquées Tableau I. A titre d'exemple, une vitesse de 12 m/s dans un conduit lisse de diamètre 100 mm donne un Reynolds de 10^5 et un Pipe factor de 0,83.

En pratique, l'étalonnage préalable n'est pas réalisé et les longueurs droites pour atteindre l'établissement de l'écoulement ne sont pas suffisantes ; la valeur communément retenue de 0,90 est plus élevée que les valeurs proposées Tableau I. Guffey [3] propose une valeur moyenne de 0,88.

L'EPA (Environmental Protection Agency, 2000) propose une méthode (40-CFR-60- Method 1) où le nombre de points de mesure est conditionné par la distance séparant le plan de mesure de la singularité amont et de la singularité en aval (cf. Tableau II). Le nombre de points à retenir étant le plus grand des deux. Dans le cas d'un conduit circulaire, les points doivent être répartis sur deux diamètres. La méthode précise qu'il est possible de positionner le plan de mesure jusqu'à 2 D après une singularité « amont » et $\frac{1}{2} D$ avant une singularité « aval », mais les incertitudes résultantes ne sont pas précisées.

En pratique, la compacité recherchée dans l'implantation des installations de ventilation ou les contraintes d'accès peut conduire à des longueurs droites disponibles inférieures à 8 D. Au-delà du questionnaire général sur l'incertitude de mesure, l'intérêt même de réaliser la mesure se pose alors.

FIGURE 1

Profil de vitesse turbulent

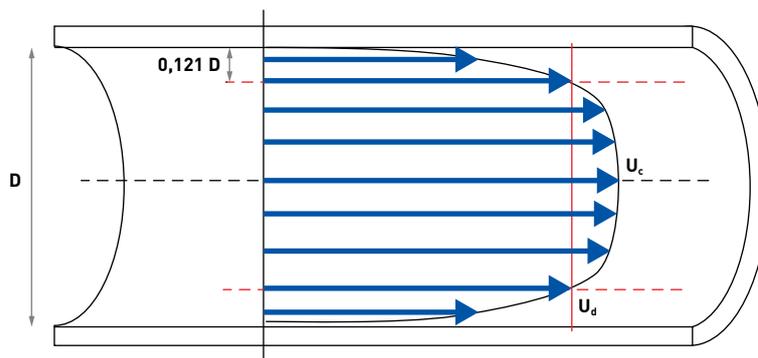


TABLEAU I

Pipe factor pour les conduits lisses

Reynold (Re)	10^4	5.10^4	10^5	5.10^5	10^6
Pipe factor (Pf)	0,77	0,82	0,83	0,85	0,86

TABLEAU II

Nombre de points de mesure en fonction des longueurs droites disponibles

Singularité en amont de la section de mesure		Singularité en aval de la section de mesure	
L/D	Nombre	L/D	Nombre
De 2 à 6	16	De 0,5 à 1,5	16
De 6 à 7	12	De 1,5 à 2	12
> 8	8	> 2	8

TABLEAU III

Singularités testées

Entrée tube droit	
Coude à 90°	
2 coudes 90° coplanaires	
2 coudes 90° non coplanaires	
Jonction Y	
Jonction Y avec réduction	
Registre ouvert	
Registre fermé (volet à 30°)	

FIGURE 2

Evolution du profil de vitesse U/U_d pour un coude (l'axe des vitesses couvre U/U_d de 0,7 à 1,3)

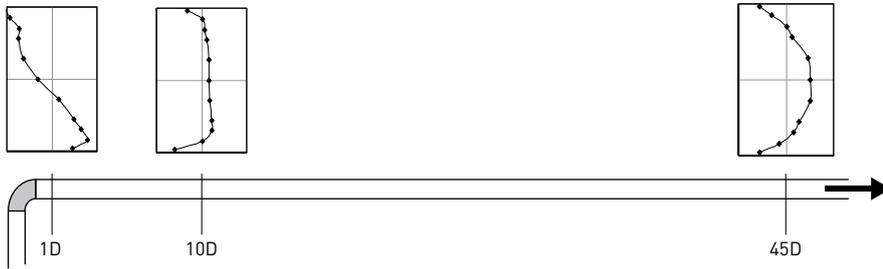


TABLEAU IV

Schémas de points étudiés

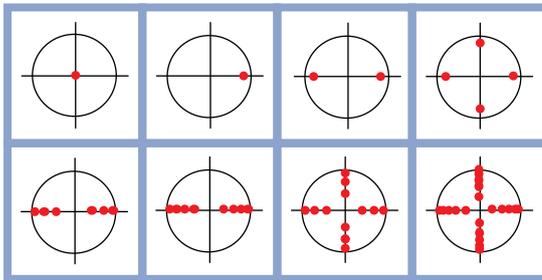


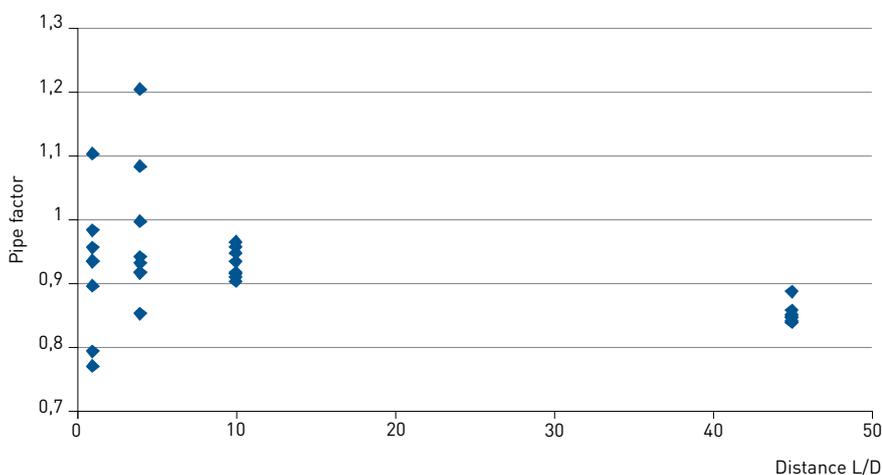
TABLEAU V

Pipe factor Pf toutes singularités confondues

Distance de la singularité amont	10 D	45 D
Moyenne	0.932	0.852
Ecart type	0.023	0.015

FIGURE 3

Dispersion des Pipe factor pour l'ensemble des singularités en fonction de la distance L/D



APPROCHE EXPÉRIMENTALE

Afin de modéliser les incertitudes, l'INRS a réalisé une étude sur l'impact des singularités les plus couramment rencontrées sur les réseaux de ventilation. Les contraintes en termes de longueur droite concernant essentiellement les singularités placées en amont de la section de mesure, seul cet aspect a été étudié. Huit singularités (cf. [Tableau III](#)) ont été installées successivement sur un réseau de ventilation de diamètre 200 mm comportant des longueurs droites importantes ($> 50 D$). Les mesures de vitesse ont été réalisées à l'aide d'un tube de Pitot installé dans un dispositif assurant le positionnement avec une incertitude inférieure au mm. Les vitesses moyennes ont été choisies supérieures à 15 m/s afin de se placer dans des conditions favorables (pression différentielle supérieure à 200 Pa). L'exploration des champs de vitesse a été réalisée à 1 D, 4 D, 10 D et 45 D de la singularité. Un total de 21 points de mesure a été réalisé dans chaque plan : 2 traverses (horizontale et verticale) suivant un schéma « log-linéaire » à 10 points ; un point supplémentaire au centre a été acquis. Les 11 mesures de vitesse réalisées sur chaque axe permettent, par interpolation, de simuler les résultats relatifs à des schémas comportant moins de points (cf. [Tableau IV](#)). Avec ces données, l'erreur induite par la réduction du nombre de points et la proximité de la singularité peut alors être estimée. Un exemple d'évolution des profils de vitesse est donné [Figure 2](#).

RÉSULTATS

L'ensemble des profils mesurés présente une continuité, sauf pour la singularité « Registre fermé à 30° », où à 1 D la perturbation est telle que la mesure n'est pas réalisable.

PIPE FACTOR (FACTEUR DE CONDUIT)

Les mesures relatives à chaque singularité montrent une évolution vers le profil théorique qui à 45 D est quasi indépendant de la singularité en amont. A 10 D, l'ensemble des profils obtenus se

révèle plus plat que le profil à 45 D. Les valeurs du Pipe factor relevées à 10 D et 45 D sont très peu dépendantes du type de singularité en amont (cf. Tableau V).

La valeur à 45 D de 0,85 recoupe celle indiquée tableau 2 (ici $Re \approx 2 \cdot 10^5$). La valeur à 10 D justifie la valeur opérationnelle plus élevée (0,90) pour les situations de terrain où les longueurs droites dépassent rarement les 10 D. En dessous de cette distance de 10 D, la mesure en un point au centre devient très aléatoire et il n'est pas raisonnable de proposer un coefficient moyen pour le Pipe factor (cf. Figure 3).

MODÉLISATION DE L'INCERTITUDE

L'exploitation des 224 situations de mesures générées permet d'établir un modèle d'estimation de l'incertitude sur la vitesse moyenne. La méthode de construction du modèle est détaillée dans un autre article scientifique [4]. Le modèle permet d'estimer l'erreur maximale liée à la position de la section de mesure par rapport à la singularité et au schéma de points utilisé pour réaliser l'exploration. Les autres facteurs tels que l'étalonnage des appareils de mesure, l'incertitude sur le diamètre du conduit... devront faire l'objet d'un traitement spécifique de la part de l'utilisateur.

Le modèle permet d'estimer l'erreur maximale en % (E) à partir des trois paramètres :

k : nombre de traverses (validé jusqu'à k = 2)

p : nombre de points par traverse (validé jusqu'à k = 10)

L/ D : longueur droite de conduit/ diamètre du conduit

$$E = 0,7 \frac{1}{\left(\frac{L}{D}\right)^{0,7}} \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{6\left(1 - e^{-\frac{p}{6}}\right)}$$

La Figure 4 compare les erreurs maximales expérimentales à celles issues de la modélisation.

Le Tableau VI fournit un outil opérationnel pour le choix du schéma de point à appliquer en fonction de l'incertitude recherchée. La zone en bleu correspond aux configurations où l'erreur sera inférieure à 5 %.

FIGURE 4

Validation du modèle d'estimation de l'erreur maximale

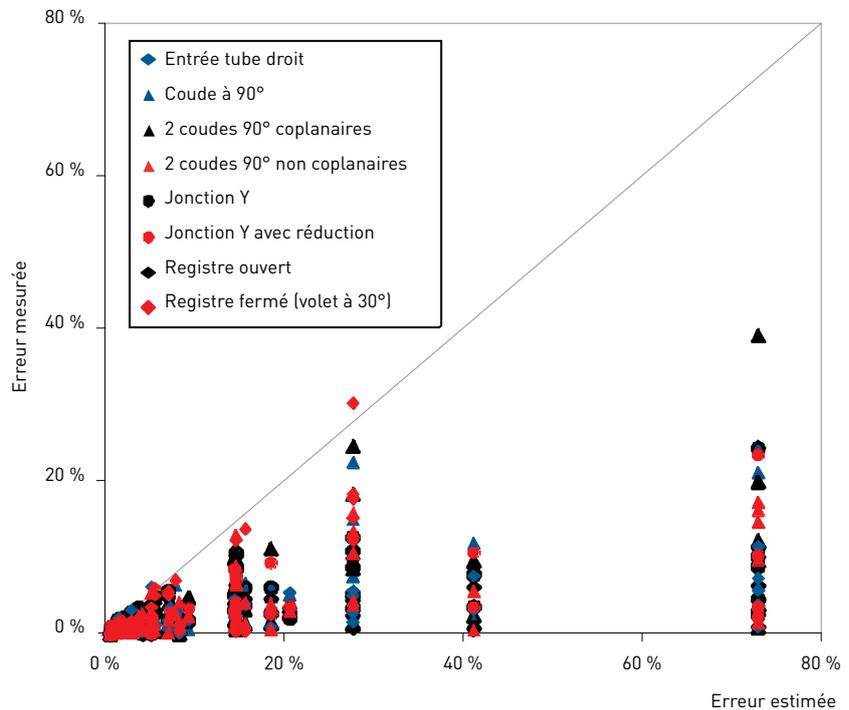


TABLEAU VI

Schémas de points étudiés

	E : Erreur maximale en %								
	k	p	k ² p	Distance singularité L/D					
				2	4	6	10	20	50
	1	1	1	47	29	22	15	9	5
	1	2	2	25	16	12	8	5	3
	2	2	4	13	8	6	4	3	1
	1	6	6	11	7	5	4	2	1
	1	10	10	9	5	4	3	2	1
	2	6	12	6	3	3	2	1	1
	2	10	20	4	3	2	1	1	1

CONCLUSION

Le modèle proposé, prenant en compte la distance entre le plan de mesure et la singularité, le nombre de traverses et le nombre de points par traverse, permet d'estimer la limite supérieure de l'erreur de mesure imputable à ces paramètres. Les éléments apportés ici peuvent être exploités pour :

- vérifier a priori que la mesure est envisageable et qu'elle fournira le niveau d'incertitude requis ;

- optimiser le coût de la mesure en adaptant le schéma de points à la configuration du réseau ;

- estimer l'incertitude de mesure.

Les résultats montrent que même dans la situation très dégradée d'une mesure à 2 diamètres d'une singularité, un schéma en 20 points permet d'estimer le débit avec une incertitude inférieure à 5 %. A l'inverse, à plus de

50 diamètres d'une singularité, un seul point (à 0,121 D de la paroi) permet d'obtenir cette incertitude de 5 %.

L'étude fournit aussi des éléments sur l'utilisation du Pipe factor lors de mesure réalisée via un seul point au centre du conduit. La valeur de ce coefficient permet de corriger les survitesses rencontrées dans la partie centrale des conduits pour en déduire la vitesse moyenne. Normalement, la mesure du débit en un point ne peut se faire que si ce coefficient a été préalablement déterminé par une mesure précise du débit. En pratique, ce coefficient est ignoré (ou pris égal à 1). Les résultats montrent qu'il n'est pas raisonnable d'utiliser des valeurs par défaut de ce coefficient à moins de 10 diamètres d'une singularité. Pour des réseaux classiques de ventilation, entre 10 et 40 diamètres une valeur par défaut de 0,90 peut être considérée et au-delà de 40 diamètres une valeur de 0,85.

BIBLIOGRAPHIE

[1] International Organisation of Standardization. *Measurement of fluid flow in closed conduits – Velocity area method using Pitot static tubes* (ISO 3966), Geneva, 1977.

[2] International Organisation of Standardization. *Determination of flowrate of fluids in closed conduits of circular cross-section – Method of velocity measurement at one point of the cross-section* (ISO 7145), Geneva, 1982.

[3] GUFFEY S.E., WANG L.T. – *Error from using shortcut estimates instead of full Pitot traverses*. ACGIH/AIHA National Conference, 1998.

[4] BONTHOUX F., FONTAINE JR. – *Measurement of flow rate in a duct by investigation of the velocity field - Uncertainty linked to the position and number of measurement points*. Room Vent 2002, Copenhagen.