

La mesure en continu des débits de gaz rejetés par des sources fixes d'origine industrielle

Continuous volumetric flow rate measurement of exhaust gases emitted by industrial stationary sources

Franck DELACROIX (*), Pierre GRANGE (**), Philippe NAVARRI (**)

RÉSUMÉ

Dans de nombreuses installations industrielles, la quantité rejetée d'un polluant atmosphérique doit être déterminée par des mesures en continu, à la fois de la concentration de masse polluante et du taux de gaz rejeté.

Il existe plusieurs méthodes possibles de mesure en continu du taux de gaz rejeté.

Les dispositifs intégrant la vitesse le long du diamètre du conduit sont néanmoins mieux adaptés que les méthodes de mesure faites sur un point isolé.

Deux systèmes commercialisés, basés sur des mesures de pression dynamique et statique et l'effet Doppler utilisant une technique à ultrason, ont été sélectionnés, et comparés avec la méthode du tube statique standard Pitot, sur un incinérateur à ordures.

Une bonne concordance a été obtenue entre les méthodes en continu et celle référencée.

D'ailleurs, il a été clairement démontré que la méthode de mesure de pression statique et dynamique pourrait être affectée par des variations dans les caractéristiques de gaz rejetés, ou par une connaissance insuffisante de leur composition.

La mesure en continu des débits de gaz rejetés à l'atmosphère est souhaitable et dans un grand nombre de cas indispensable pour mieux connaître les flux de polluants émis.

(*) Ademe, 2, square La Fayette, BP 406, 49004 Angers Cedex 01.

(**) CETIAT, Département Energie et Environnement dans l'Industrie, 27-29, bd du 11 Novembre 1918, BP 2042, 69603 Villeurbanne Cedex.

ABSTRACT

In numerous industrial facilities, the quantity of an atmospheric pollutant emitted has to be determined by making continuous measurements of both pollutant mass concentration and exhaust gas flow rate.

There are various methods available to measure continuously a volumetric gas flow rate.

Devices integrating the velocity profile along the diameter of the duct are nevertheless more suitable than single point measurement methods.

Two commercial apparatuses, based on the dynamic and static pressure measurement and Doppler effect using an ultrasonic technique, have been selected and compared with the standardised Pitot static tube method on a waste incinerator.

A good agreement was obtained between the continuous methods and the reference one.

Moreover, it is advisable to make continuous temperature and pressure measurements in order to express the gas flow rate in standard conditions.

Otherwise, it has also been clearly shown that the dynamic and static pressure measurement method can be affected by variations in the characteristics of the exhaust gases or by an insufficient knowledge of their composition.

Les caractéristiques physico-chimiques des effluents gazeux d'origine industrielle (empoussièrément, température, teneurs en composés corrosifs...) rendent cette mesure encore difficile et les performances des quelques équipements présents sur le marché restent par ailleurs assez mal connues dans leurs conditions réelles d'utilisation.

L'Ademe (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) a donc confié au CETIAT

(Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques) la réalisation d'une étude sur les différentes méthodes applicables pour la mesure en continu des débits de gaz émis par les sources fixes d'origine industrielle.

Le cahier des charges associé à cette prestation comportait le recensement des moyens de mesure de débit disponibles sur le marché ainsi qu'une évaluation sur site industriel des techniques susceptibles d'être les plus largement diffusées.

Les principaux enseignements de ces travaux sont présentés succinctement ci-après et feront par ailleurs l'objet d'une publication ultérieure sous forme de rapport d'étude plus complet disponible auprès de l'Ademe.

La sélection des méthodes adaptées à la mesure continue du débit

Au cours d'une première étape, il a paru intéressant de conduire une analyse théorique de l'ensemble des principes de mesure susceptibles d'être utilisés.

Compte tenu des contraintes liées à la nature des gaz (température, composition, empoussièrément...), aux caractéristiques mécaniques (dimension des conduits) et à l'aspect économique, seuls cinq principes de mesure se sont révélés applicables.

Il s'agit des techniques par :

- ultrasons,
- sondes à prises de pression multiples,
- débitmètre massique multipoints à insertion,
- sonde de pression,
- anémomètre à effet vortex.

Les méthodes globales telles que les débitmètres à flotteur, les diaphragmes, les cols soniques ou encore les tubes de venturi ont en effet été considérées comme inadaptées en raison de l'importance des débits à mesurer et des pertes d'énergie mécanique engendrées.

D'autres moyens de mesure ont été exclus pour des raisons techniques (débitmètres électromagnétiques ne fonctionnant que sur un fluide conducteur) ou économiques et de mise en oeuvre (vélocimétrie laser).

Finalement, la prise en considération des dimensions des conduits industriels (parfois supérieures à plusieurs mètres) a amené à écarter les méthodes locales ne prenant pas en compte la forme du profil des vitesses et ses éventuelles variations avec le débit et donc à conseiller des méthodes plus globales.

Ainsi, sur la base de ces considérations, les principales méthodes applicables à la mesure du débit en continu ont finalement été réduites au nombre de trois :

- la mesure par ultrasons en montage suivant une ou plusieurs cordes,
- la mesure par sonde à prises de pression multiples suivant un ou deux diamètres (avec système de décolmatage automatique conseillé),
- la mesure par débitmètre massique à insertion suivant un ou deux diamètres.

Cette dernière méthode n'est toutefois guère utilisée qu'aux Etats-Unis. Faute par ailleurs d'agrément CENELEC pour la conformité électrique, il a donc été décidé de l'écarter du programme d'évaluation sur site.

Enfin, un inventaire des appareils actuellement commercialisés en France et en Allemagne a fait apparaître que le matériel disponible correspondait bien aux deux principes retenus.

La campagne d'évaluation sur site

Des essais ont ensuite été organisés afin de comparer les méthodes de mesure par ultrasons et par prises de pression multiples à la méthode de référence décrite dans la fiche technique n° 1.

Le site et le matériel

La campagne de mesures a été réalisée sur les rejets gazeux du four d'incinération n° 1 (capacité 7 t/h) exploité par la société SARP Industries à Limay (78).

Les gaz issus de cette installation sont épurés de leurs polluants gazeux, filtrés et rejetés à l'atmosphère par l'intermédiaire d'une cheminée de 70 m de hauteur environ.

Leurs caractéristiques moyennes relevées lors de cette opération étaient les suivantes : O₂ (12 % sec), CO₂ (8 % sec), H₂O (25 % humide), température (200 °C), pression statique (- 220 Pa), vitesse (23 m/s).

Pour la réalisation des mesures suivant les deux principes retenus, le CETIAT a, d'une part, utilisé une sonde à prises de pression multiples (1) déjà implantée sur la cheminée par l'industriel dans le cadre de l'autosurveillance et, d'autre part, demandé à un fournisseur d'installer un débitmètre par ultrasons (1) en montage simple corde (45°) sur le carneau circulaire d'amenée des gaz à la cheminée.

(1) Se reporter à la fiche technique n° 2 en ce qui concerne les caractéristiques des appareils utilisés.

Fiche technique n°1

METHODE DE REFERENCE

La méthode de référence est décrite par la norme NFX 10-112 relative à la "Mesure de débit des fluides dans les conduites fermées. Méthode d'exploration du champ des vitesses pour des écoulements réguliers au moyen de tubes de Pitot doubles".

Elle consiste à mesurer la pression différentielle (ΔP) existant entre les prises de pression totale (P_t) et statique (P_{stat}) d'un tube de Pitot normalisé placé en un certain nombre de points ainsi que la masse volumique du fluide (ρ) dans les conditions de travail. Les points de mesure (au moins 3 par rayon) doivent être disposés sur un minimum de 2 diamètres perpendiculaires entre eux.

Le matériel nécessaire à l'exploration du profil des vitesses est constitué :

- d'un tube de Pitot normalisé relié à un manomètre différentiel de précision,
- d'un ensemble destiné à caractériser l'écoulement :
 - pression absolue,
 - température,
 - composition des gaz (azote (N_2), oxygène (O_2), dioxyde de carbone (CO_2) et humidité (H_2O) essentiellement).

La vitesse moyenne débitante ($\bar{V}$) est obtenue à partir de la moyenne arithmétique des valeurs obtenues au cours de l'exploration du champ des vitesses.

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad \text{où } V_i \text{ est la vitesse au point } i,$$

obtenue à partir de

$$V_i = \alpha \sqrt{\frac{2 \Delta P_i}{\rho}}$$

avec α : coefficient de débit du tube de Pitot égal à 1 pour un Pitot du NPL ou de type CETIAT

ΔP_i : pression différentielle existant entre les prises de pression totale et statique au point i (en Pa)

ρ : la masse volumique des gaz (en kg/m^3)

Si l'on néglige l'écart par rapport au gaz parfait :

$$\rho = \frac{P_t M}{R T}$$

avec

- T : température des gaz (en K)
- P_t : la pression dans le conduit (en Pa)
- R : la constante des gaz parfaits 8,314 S.I.
- M : la masse molaire du gaz liée à sa composition (O_2 , N_2 , CO_2 , H_2O principalement).

Le débit volumique exprimé dans les conditions réelles de l'effluent est égal au produit de la vitesse moyenne débitante par la section de la conduite. Une correction classique de température et de pression permet enfin de l'exprimer dans les conditions normales ($0^\circ C$ et 101 325 Pa).

$$Q_{V, TPN} = Q_{V, TP} \frac{273}{273 + T} \frac{P_t}{101\,325}$$

La méthode de référence, quant à elle, a été mise en oeuvre au niveau de la passerelle équipant la cheminée et utilisée pour le contrôle périodique de cette installation (cf. figure 1).

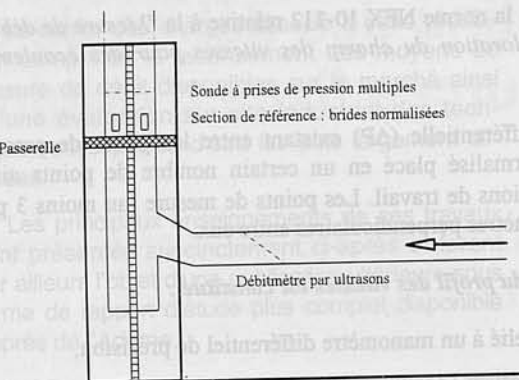


Figure 1. Implantation des sections de mesures sur le circuit de rejet des gaz
Establishment of measurement sections of the gaz discharge circuit

Les conditions aérauliques rencontrées au niveau de chaque section sont indiquées sur le tableau 1.

Tableau 1.
Conditions aérauliques au niveau des sections de mesures

Table 1.
Ventilation conditions at the measurement section level

	Longueurs droites disponibles (en diamètres hydrauliques)	
	En amont	En aval
Sonde à prises de pression multiples	6	> 10
Débitmètre à ultrasons	8	3
Méthode de référence	4,5	> 10

Résultats

Stabilité du débit et profil des vitesses

Lorsque l'installation fonctionne à son régime nominal, les variations du débit n'excèdent pas $\pm 5\%$ par rapport à la valeur moyenne (cf. figure 2).

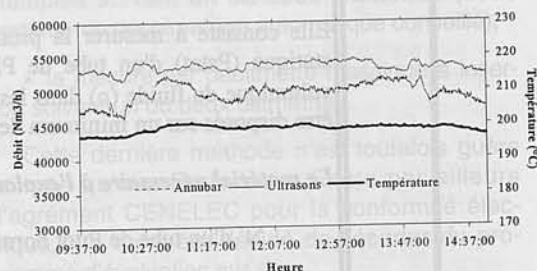


Figure 2. Variations du débit et de la température à la cheminée
Variations in the discharge and temperature at the smokestack

Bien que située à plus de 4 diamètres hydrauliques de l'arrivée des gaz dans la cheminée, la section utilisée pour les mesures de référence présente un profil de vitesses encore perturbé (cf. figure 3). L'exploration du profil des vitesses a donc été affinée en réalisant 4 points de mesures par rayon suivant 2 diamètres perpendiculaires, soit un total de 16 points pour toute la section.

Les mesures par exploration du profil des vitesses demandant 30 minutes environ, les valeurs fournies dans le tableau de résultats pour les mesures par prises de pression multiples et ultrasons correspondent à la moyenne de leur signal pendant la durée de l'exploration au tube de Pitot (cf. tableau 2).

Dans le cadre de cette campagne d'évaluation sur site, huit mesures comparatives ont été réalisées à un débit voisin de 52 000 Nm³/h. Si l'on considère les sources d'erreurs possibles (détermination du diamètre de la cheminée, positionne-

Fiche technique n° 2 Caractéristiques des appareils utilisés lors de la campagne d'évaluation sur site

Sondes à prises de pression multiples	Débitmètre à ultrasons
Distribution : Auxitrol	Distribution : Panametrics
Type : Annubar modèle classique DCR	Modèle : CEM68
Montage : en conduit vertical par bossage et support côté opposé	Version : haute température (260 °C maximum sans refroidissement des transducteurs)
Dimensions de la sonde : conçue pour un conduit de 119 cm de diamètre interne	Montage : simple corde à 45°
Nombre de prises de pression : 6	Etendue de mesure : 0,03 à 45 m/s
Calcul de la sonde : pour de l'air	Gamme de travail : 0-60 000 Nm³/h
Paramètres de calcul : température et pression constantes (220 °C et 1 015 Mbar)	Paramètres de calcul : température et pression constantes (200 °C et 1 000 mbar)
Signal de sortie : courant	Signal de sortie : courant

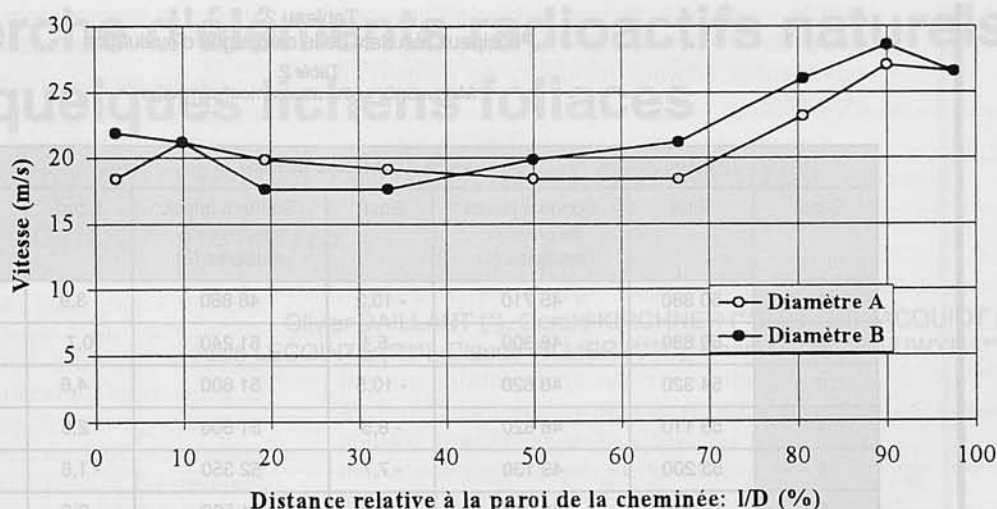


Figure 3. Profil des vitesses établi par la méthode de référence
Speed profile established by the reference method

ment du tube de Pitot, stabilité de la pression dynamique en chaque point, caractéristiques de l'écoulement gazeux...) l'incertitude de la méthode de référence est de l'ordre de 3 à 4 %.

Au cours de ces mesures, nous avons constaté que le débit partiel obtenu par exploration de l'un des diamètres était légèrement inférieur au débit moyen de quelques pour-cent (cf. figure 3).

D'après les résultats (cf. tableau 2), il apparaît que l'écart moyen entre les mesures par ultrasons et les valeurs obtenues par exploration au tube de Pitot est inférieure à 2% (-0,5 % en moyenne, variations de - 2,5 % et + 3,5 %) ce qui est conforme aux performances annoncées par le constructeur.

Par contre, cet écart est voisin de 10% (- 9 % en moyenne, variations de - 5 % à - 11 %) pour les mesures par sonde à prises de pression multiples.

Le principal avantage de la mesure par ultrasons est qu'elle ne dépend pas de la composition du gaz. Par contre ce n'est pas le cas de la mesure par sonde à prises de pression multiples. Sur cette installation, où la sonde était calibrée sur de l'air, une erreur de plus de 3 % liée à la prise en compte d'une composition des gaz erronée a été mise en évidence.

En fait, le tableau 2 montre que les écarts entre la sonde à prises de pression multiples et la méthode de référence peuvent être sensiblement réduits (de 9 à 3 % en moyenne) si l'on tient compte de la masse volumique réelle de l'effluent gazeux (température et composition).

L'écart résiduel de 3 % est vraisemblablement lié à une répartition non homogène du débit dans la section de mesure de la sonde à prises de pression multiples qui n'intègre le profil de vitesses que suivant un seul diamètre.

Cette campagne d'évaluation nous a permis de montrer qu'une sonde à prises de pression multiples doit donc être calibrée pour ses conditions de travail. Une composition moyenne, préalablement mesurée, peut être suffisante. Toutefois, si des variations importantes des caractéristiques des gaz sont à craindre, une correction plus complexe intégrant en particulier les taux d'oxygène, de dioxyde de carbone et d'humidité pourra s'avérer nécessaire.

Conclusion

Au terme de ces travaux, il apparaît que l'écart moyen entre la mesure par ultrasons ou par sonde à prises de pression multiples et la méthode de référence par exploration du profil des vitesses à l'aide d'un tube de Pitot peut être d'environ 2 à 3% à condition :

- de réaliser ces mesures sur des portions possédant suffisamment de longueurs droites,
- de prendre en compte les caractéristiques réelles des gaz pour la sonde à prises de pression multiples (température, pression et composition),
- de prévoir une mesure de température et de pression afin de ramener le débit aux conditions normales (0 °C et 101 325 Pa) et d'associer un calculateur permettant de réaliser cette correction.

Il est enfin recommandé d'installer un dispositif de décolmatage pour la sonde à prises de pression multiples, en particulier si la teneur en poussières des gaz est élevée.

L'utilisation d'un dispositif de mesure de débit en continu par ultrasons ou par sonde à prises de pression multiples, conçu et installé en respectant ces principales recommandations, permet donc moyennant les précautions métrologiques d'usage d'envisager la mise en place d'une procédure d'autosurveillance incluant cette mesure dans des conditions apparaissant satisfaisantes.

Tableau 2.
Principaux résultats de la campagne d'évaluation

Table 2.
Main results of the assessment campaign

Mesure de débit							
Essai	Pitot	Sonde à prises de pression multiples (1)	Ecart	Sonde à prises de pression multiples (2)	Ecart	Ultrasons	Ecart
1	50 880	45 710	- 10,2	48 880	- 3,9	50 180	- 1,4
2	50 880	48 300	- 5,1	51 240	0,7	52 650	3,5
3	54 320	48 620	- 10,5	51 800	- 4,6	52 970	- 2,5
4	53 110	48 620	- 8,5	51 800	- 2,5	52 970	- 0,3
5	53 200	49 130	- 7,7	52 350	- 1,6	53 680	0,9
6	53 270	48 340	- 9,3	51 500	- 3,3	52 690	- 1,1
7	53 090	47 300	- 10,9	50 820	- 4,3	52 180	- 1,7
8	52 870	46 780	- 11,5	50 260	- 4,9	51 680	- 2,3
Moyenne	52 703	47 850	- 9,2	51 081	- 3,1	52 375	- 0,6
Minimum	50 880	45 710	- 11,5	48 880	- 4,9	50 180	- 2,5
Maximum	54 320	49 130	- 5,1	52 350	0,7	53 680	3,5

- (1) Mesures brutes fournies par la sonde à prises de pression multiples.
(2) Mesures corrigées des caractéristiques réelles des gaz (composition et température).